

Robotisert tankrensesystem for fiskeyngeloppdrett

Håvard Lein Braa

Master i teknisk kybernetikk
Oppgaven levert: Juli 2011
Hovedveileder: Jo Arve Alfredsen, ITK



MASTEROPPGAVE

Kandidatens navn: Håvard Lein Braa
Fag: Teknisk kybernetikk
Oppgavens tittel: Robotisert tankrensesystem for fiskeyngeloppdrett
Engelsk tittel: Robotic tank cleaning system for fish juvenile production

Oppgavens tekst

Intensiv oppdrettsproduksjon av marin fiskeyngel består av en rekke prosesser og operasjoner som tradisjonelt krever betydelig manuell arbeidsinnsats. Det er derfor ønskelig av både prosessstekniske og bedriftsøkonomiske grunner å innføre en høyere grad av automatisering i slike systemer. Marin yngelproduksjon etter intensive metoder foregår i innendørs tanker av varierende størrelse der god tankhygiene er en betingelse for å oppnå gode produksjonsvilkår for yngelen. Det er imidlertid et faktum at tankmiljøet, spesielt gjennom fôringen, er utsatt for organisk belastning som gir gode vekstvilkår for uønskede elementer (bakterier) i tanken, og som i verste fall kan utsette yngelen. Vannbehandling og rensing av bunn og vegger i tankene er derfor sentrale oppgaver i slike produksjonssystemer, men som i dag krever mye tid og ressurser.

Formålet med denne oppgaven er å utvikle en prototype på et konsept for effektiv rensing av slike tanker. Det foreslås en robotisert farkost som kan programmeres til å traversere bunn og vegger i tanker som er karakteristiske for denne type produksjon, og som i størst mulig grad fjerner avfall og biofilm fra tanken uten å påvirke fiskelarvene på en negativ måte. Generelt omfatter oppgaven følgende punkter:

- Bakgrunnsundersøkelse med vekt på beskrivelse av eventuelle beslektede systemer
- Utarbeidelse av kravspesifikasjon (funksjonelle, ikke-funksjonelle) for ovennevnte rensekonsept
- Design og realisering av mekatronikk, maskin- og programvare som til sammen utgjør en tilstrekkelig utviklet prototype av farkosten
- Planlegging og gjennomføring av tester for å kartlegge farkostens egenskaper
- Diskusjon av resultater og dokumentasjon av systemet

Oppgaven gitt: 7. februar 2011
Bsvarelsen leveres innen: 1. juli 2011
Utført ved: Institutt for teknisk kybernetikk, NTNU
Veiledere: Jo Arve Alfredsen, ITK, NTNU
Morten Omholt Alver, SINTEF/NTNU

Trondheim, 7. februar 2011

Jo Arve Alfredsen

Faglærer

Forord

Denne rapporten er skrevet i løpet av våren 2011, etter et prosjekt gjennomført ved Institutt for Teknisk Kybernetikk ved NTNU. Rapporten beskriver utviklingen av et nytt konsept for et automatisert tankrensesystem for marin yngelproduksjon. Oppgaven har resultert i utvikling av en prototype for en autonom robot. Roboten har som mål å forenkle rensing av oppdrettstanker, ved at den utfører krevende arbeid som i dag gjøres manuelt. Dette vil være et viktig bidrag for å sikre gode vekstvilkår for yngelproduksjonen i fremtiden.

I rapporten beskrives de valgte løsningene og arbeidet som ble gjort underveis i utviklingen. Dette gjelder både mekanikk, elektronikk og programvare. Prosjektet hadde som mål å utvikle et fungerende konsept og en prototype for uttesting ved NTNU Sealab i Trondheim.

Selv om prosjektet er rettet mot spesifikke behov ved NTNU, er det vektlagt stor fleksibilitet i de valgte løsningene. Det betyr at konseptet kan skaleres til andre tankstørrelser, for oppdrettsnæring eller annen industri. Dette gjør prosjektet innovativt og interessant. Jeg ser også på prosjektet som et bidrag til faglig utvikling.

Dette er et prosjekt som er finansiert av NTNU. På grunn av begrensede midler til prosjektet, har det ikke vært mulig å skaffe alt av ønskelig utstyr. Dette gjelder spesielt presist måleutstyr for dokumentasjon av systemets nøyaktighet.

Jeg vil benytte anledningen til å takke veilederne Jo Arve Alfredsen, Morten Omholt Alver og Werner Storøy for bistand og tilbakemeldinger underveis i prosjektet. Jeg vil også takke ansatte ved NTNU Sealab for utlån av tank for test under prosjektet, og Kongsberg Seatex AS for utlån av klimaskap i forbindelse med temperaturkalibreringer.

Håvard Lein Braa

Trondheim, juni 2011.

Sammendrag

Denne prosjektoppgaven beskriver utvikling og konstruksjon av en prototype av en autonom tankrenserobot for marin yngelproduksjon. Gjennom oppgaven har det blitt utviklet et nytt konsept og en prototype som viser mulighetene for et automatisk tankrensesystem. Det valgte konseptet baserer seg på en selvgående robot som kjører på tankens utside, med en magnetisk kobling til en rensepute på tankens innside. Gjennom et riktig forhold mellom masse og friksjonskrefter, kan prototypen både bevege på seg og henge fast på tanken. Ved bruk av permanentmagneter har dette latt seg løse. På grunn av riktig dimensjonering av krefter og tilpassede løsninger er det utviklet en farkost som kan traversere både tankens bunn og tankens vegger uten problemer.

Det er utviklet et renskonsept for å løsne avfallet fra den begrodde tanken, med minimale forstyrrelser av yngelen. Dette ble løst med et roterende magnetfelt gjennom tankveggen til en roterende rensepute på tankens innside. Praktiske tester i tank med vann og tørrfor viser at renseren løsner avfallet fra tankveggen, ved at det løses opp i vannet.

Et konsept for utnyttelse av en enkelt robot for automatisert rens av flere tanker har blitt utviklet. Gjennom et egenutviklet brosystem kan dette løses. En prototype av et brosystem har blitt utviklet og testet på en enkelt tank. Resultatene viser at konseptet kan utvikles til et komplett tankrensesystem for en hel tankrigg. Systemet skal enkelt kunne installeres. Det har blitt løst ved å utvikle et grafisk brukergrensesnitt til en PC. Med trådløs dataoverføring til roboten, kan rensesystemet enkelt installeres. En operatør kan også overvåke robotens posisjon og status via brukergrensesnittet.

Valg av sensorer på roboten har blitt gjort med tanke på å oppnå tilstrekkelig presisjon med en lav investeringskostnad. Gjennom kalibreringsrutiner og praktiske testing er sensorenes ytelser verifisert mot ønskede egenskaper. Det benyttede sensoroppsettet har tilstrekkelig nøyaktighet, liten fysisk utforming og er prisgunstig. Et fungerende posisjonerings- og navigasjonssystem er utviklet basert på angitte waypoints på tankene. Testkjøring med systemet har vist gode resultater. En posisjonsnøyaktighet på ca 2 cm er oppnådd for hele tankveggen. Dette er vurdert som godt nok for den gitte oppgaven. På tankbunnen ble ikke nøyaktigheten testet.

I løpet av prosjektet er det utviklet elektronikk. Et design bestående av to kretskort er planlagt med tanke på stor fleksibilitet for fremtidig bruk. Elektronikken har vist gode egenskaper gjennom testing underveis i prosjektet.

Målet med oppgaven var å utvikle et konsept og en tilstrekkelig utviklet prototype for et renskonsept. Den utviklede prototypen har ikke de mekaniske egenskapene som trengs for å sikre stabilitet og robusthet i et ferdig produkt. Når vi ser på de valgte løsninger og oppnådd funksjonalitet opp mot den gitte oppgaven, er grunnlaget for et bra konsept og en produksjonsmodell lagt. Ved hjelp av utviklet teknologi vil et helautomatisk rensesystem fjerne dagens behov for manuell arbeidsinnsats i forbindelse med tankrensing.

Innhold

1	Innledning.....	18
2	Bakgrunn	20
2.1	Ønskede spesifikasjoner	21
2.2	Utfordringer.....	21
2.3	Hva finnes på markedet?.....	21
2.4	Konklusjon	24
3	Valg av konsept	25
3.1	Utvendig ring med hjul for høydejustering	25
3.2	Utvendig ring med gjengespindler for høydejustering	26
3.3	Ring med gjengespindler for høydejustering festet til vogn	27
3.4	Viskerarm videreutvikling.....	28
3.5	Autonom robot innvendig i tank	29
3.6	Autonom robot utvendig på tank med magnetisk kobling gjennom tankvegg.....	30
3.7	Konklusjon	31
4	Oversikt over systemet.....	32
4.1	Systembeskrivelse maskinvare.....	32
4.2	Systembeskrivelse av robotens programvare	33
4.3	Grafisk brukergrensesnitt på PC.....	34
4.4	Flere bruksområder	34
4.5	Testtrigg.....	34
5	Mekanisk utforming	35
5.1	Bakgrunn	35
5.2	Mulige løsninger	36
5.3	Magnetisk kraft	38
5.4	Friksjon	49
5.5	Krefter på robot.....	54
5.6	Valgte tekniske løsninger for robot.....	61
5.7	Valgt løsning for rensesystem	63
5.8	Bevegelse mellom tanker	68
5.9	Diskusjon	72
5.10	Konklusjon	73
6	Motorer og drivverk	74
6.1	Bakgrunn	74

6.2	Motorteknologi	74
6.3	Beregning av motorturtall på drivende hjul	74
6.4	Beregning av nødvendig motoreffekt for drivende hjul.....	75
6.5	Motor til roterende rensar	76
6.6	Beregning av nødvendig motoreffekt for rensesmotor	78
6.7	Diskusjon	79
6.8	Konklusjon	80
7	Posisjoneringssystem	81
7.1	Bakgrunn	81
7.2	Koordinatsystemer	81
7.3	Navigasjon	84
7.4	Diskusjon	89
7.5	Konklusjon	89
8	Sensorer.....	90
8.1	Bakgrunn	90
8.2	Aktuelle sensorer.....	90
8.3	Mulige sensorløsninger	91
8.4	Valgt sensorløsning	92
8.5	Sensorer.....	95
8.6	Diskusjon	104
8.7	Konklusjon	104
9	Batteri og lading	105
9.1	Batteriteknologi.....	105
9.2	Diskusjon	106
9.3	Konklusjon	106
10	Trådløs kommunikasjon	108
10.1	Bakgrunn	108
10.2	Mulige teknologier	108
10.3	Valgt teknologi.....	108
10.4	Diskusjon	108
10.5	Konklusjon	109
11	Elektronikk design	110
11.1	Bakgrunn	110
11.2	Valgte løsninger.....	110

11.3	Power-kort.....	111
11.4	CPU-kort	117
11.5	Diskusjon	125
11.6	Konklusjon	126
12	Programvare på robot	127
12.1	Bakgrunn	127
12.2	Oversikt over programmet	127
12.3	Detaljert beskrivelse.....	130
12.4	Diskusjon	178
12.5	Konklusjon	178
12.6	Energieffektiv programvare.....	198
12.7	Diskusjon	199
12.8	Konklusjon	199
13	Grafisk brukergrensesnitt på PC.....	200
13.2	Diskusjon	208
13.3	Konklusjon	208
14	Test av konsept.....	209
14.1	Tørr tank	209
14.2	Sagflis og vann	209
14.3	Fylt tank med tørrfor	210
14.4	Alternative konsepter for utviklet teknologi.....	211
14.5	Diskusjon	211
14.6	Konklusjon	212
15	Posisjonsnøyaktighet.....	213
15.1	Bakgrunn	213
15.2	Høyden	213
15.3	Nøyaktighet	218
15.4	Akselerometerets påvirkning	220
15.5	Diskusjon	222
15.6	Konklusjon:	222
16	Konklusjon	223
17	Videre arbeid	225
	Bibliografi	227
	Vedlegg.....	231

Vedlegg A: Konstruksjon av tankrigg.....	232
A. Konstruksjon av tankrigg.....	233
B. Utviklingsfase robot.....	235
C. Elektronikk design	249
D. Digitale vedlegg	252

Figurer

Figur 1: En Qodtech-rigg.....	18
Figur 2: Innvendig i tanken	20
Figur 3: Bilde av tankriggen utvendig.....	21
Figur 4: Vindusvaskerobot [1]	22
Figur 5: Veggvaskerobot [2]	22
Figur 6: Bassengrenseren Nitro Wall-Scrubber [3].....	23
Figur 7: Robotarm [4]	23
Figur 8: Tidligere prosjekt i form av viskerblader.....	24
Figur 9: Mulig konsept med utvendig ring og magnetisk overføring	25
Figur 10: Mulig konsept med utvendig ring og magnetisk overføring	26
Figur 11: Prinsipp ring med gjengespindler for høydejustering festet til vogn.....	27
Figur 12: Innvendig viskere i tank.....	28
Figur 13: Autonom robot innvendig i tank	29
Figur 14: Prinsipp for autonom robot utvendig på tank	30
Figur 15: Overordnet system.....	32
Figur 16: Systembeskrivelse programvare på roboten	33
Figur 17: Tankrigg.....	34
Figur 18: Mulige prinsipper for renseutstyr på robot	37
Figur 19: Renserens sirkel blir større enn robotens	38
Figur 20: B-H kurve for et permanentmagnetisk materiale	39
Figur 21: Måling av magnetisk holde kraft mellom magneter og stålplater	41
Figur 22: Magnetisk kraft mellom ringmagnet og stålplate	41
Figur 23: Området 2-8 mm	42
Figur 24: Beregning av magnetisk flukstetthet for sylindermagnet.....	43
Figur 25: Beregning av magnetisk flukstetthet for sylindermagnet med metallplate bak.....	44
Figur 26: Beregning av magnetisk tiltrekningskraft, flate sider mot hverandre	45
Figur 27: Magnetisk tiltrekningskraft, sylindervegger mot hverandre	46
Figur 28: Test med sylindermagneter mot hverandre	46
Figur 29: Magnetisk kraft avhengig av avstanden.....	47
Figur 30: Feil mellom modell og målinger ved økende avstand.....	48
Figur 31: To forskjellige mulige sammenhenger mellom friksjonskraften og den relative hastigheten.....	49
Figur 32: Coulomb's friksjonsmodell	50
Figur 33: Praktiske friksjonstester mot tankens innside.....	51
Figur 34: Praktiske friksjonstester mot tankens utside	51
Figur 35: Krefter på robot pekende horisontalt	54
Figur 36: Plott av krefter ved stillestående robot horisontalt rettet	57
Figur 37: Krefter på robot ved kjøring vertikalt.....	58
Figur 38: Plott av krefter ved robot kjørende vertikalt oppover.....	59
Figur 39: Plott av krefter ved robot kjørende vertikalt oppover for dagens prototype.....	60
Figur 40: Nødvendig motormoment på hver motor	60
Figur 41: Robot med sylindermagneter på tankens innside	62
Figur 42: Fleksibel kropp	62
Figur 43: Renseutstyret tilpasser seg tankens utforming.....	63

Figur 44: Renseren med to eller fire kontaktpunkter.....	64
Figur 45: Rensersens påvirkning på robot	65
Figur 46: Gravitasjonsfeltets påvirkning på robot.....	66
Figur 47: Magnet i rensereputens senter.....	67
Figur 48: Polplassering for robotens hjul	68
Figur 49: Polplassering for robotens rensesystem.....	68
Figur 50: Prototype for brosystem	69
Figur 51: Prinsipp for brosystem	70
Figur 52: Sylindermagnetenes bevegelse.....	71
Figur 53: Sylindermagnetenes innkapsling.....	71
Figur 54: RC-servo RCS M4315	75
Figur 55: Tilpassing av optisk enkoder i servo.....	76
Figur 56: Magnetisk tiltrekningskraft ved rensersens kontaktpunkter	77
Figur 57: Moment på resemotorens aksel	78
Figur 58: Turtall som funksjon av spenning på ubelastet servo.....	79
Figur 59: Body-koordinatsystem	82
Figur 60: Koordinatsystemet Area.....	82
Figur 61: Koordinatsystemet Wall.....	83
Figur 62: Koordinatsystemet Bottom	83
Figur 63: Waypoints på tankvegg.....	84
Figur 64: Waypoints på tankbunn	84
Figur 65: Alternativ løsning med roterbare skinner	85
Figur 66: Brosystem med "veikryss".....	85
Figur 67: Brosystem med bro mellom hver tank.....	86
Figur 68: Brosystem sett fra siden.....	86
Figur 69: LOS-guidance.....	87
Figur 70: Pure Pursuit Guidance.....	88
Figur 71: Constant Bearing Guidance	88
Figur 72: Krav til nøyaktighet i heading.....	92
Figur 73: Valgt løsning for tankvegg.....	93
Figur 74: Valgt løsning for tankbunn	94
Figur 75: Bourns ENS1J.....	96
Figur 76: VTI SCA3000	97
Figur 77: Sharp IR-avstandsmålere [23]	98
Figur 78: Prinsipp for IR-avstandsmåler [23].....	99
Figur 79: Avstandsmålerenes plassering på grunn av minimumsavstanden	99
Figur 80: Spenningens avhengighet av avstanden	100
Figur 81: Fargeavhengighet for 2D120XF	100
Figur 82: Fargeavhengighet for 2YA21	101
Figur 83: Temperaturtest av IR-avstandsmålere i klimaskap	101
Figur 84: Temperaturavhengighet for sensor med kort rekkevidde	102
Figur 85: Temperaturavhengighet for sensor med lang rekkevidde.....	102
Figur 86: Plassering av linjefølgingsensorer.....	103
Figur 87: Fairchild QRE1113	104
Figur 88: Typisk utladningskurve for et 3-celle LiPo-batteri [28]	105

Figur 89: Plassering av ladestasjon på en tankrigg.....	106
Figur 90: XBee-modul	108
Figur 91: Prinsipp for oppdeling i to kretskort	110
Figur 92: Power_kort.....	111
Figur 93: Prinsipp Power-kort.....	112
Figur 94: Nødstop og sikring til batteriet	112
Figur 95: Ladekrets	113
Figur 96: Maksimalt strømtrekk motor	114
Figur 97: To motordrivere med strømmålere	115
Figur 98: Strømmåler motor.....	115
Figur 99: CPU_kort	117
Figur 100: Blokkdiagram for CPU-kortet	118
Figur 101: Beskyttelseskretser	119
Figur 102: Traco Power TSR1-2450	121
Figur 103: Spenningsregulator for linjefølgingsensorer	121
Figur 104: Spenningsregulator til en IR-avstandsmåler	122
Figur 105: Regulator for mikrokontroller og Xbee	122
Figur 106: Regulator for akselerometer	122
Figur 107: Interface for en IR-avstandsmåler.....	123
Figur 108: Koblingsskjema for linjefølgingsensorer.....	124
Figur 109: Spenningsdelere for en enkoder	124
Figur 110: Spenningsdeler og LP-filer for spenningsmåling.....	125
Figur 111: Oversikt over programvarens hovedfunksjoner	128
Figur 112: ModeController() i programvaren.....	130
Figur 113: ModeControllerens innganger og utganger	131
Figur 114: ModeControllerens logikk for rens av tank.....	133
Figur 115: WirelessComm() i programvaren	134
Figur 116: SensorCalibration() i programvaren	136
Figur 117: Test av temperatursensor	137
Figur 118: Kalibrert temperatursensor.....	138
Figur 119: Akselerometerets temperaturavhengighet	140
Figur 120: Spenning som funksjon av avstanden på en IR-avstandsmåler	143
Figur 121: Polynom for kurvetilpasning	144
Figur 122: Linearisert avstandssensor	145
Figur 123: Avvik mellom linearisert sensor og ideell sensor	145
Figur 124: Kollektorstrømmens avhengighet av emitterstrømmen [26]	146
Figur 125: Kollektorstrøm som funksjon av avstanden [26]	147
Figur 126: Test av linjefølgingsensor	148
Figur 127: Oversikt programvare	149
Figur 128: Oppbygning av estimatoren	151
Figur 129: Prinsipp for heightEstimator().....	152
Figur 130: Sprangrespons for estimert heading.....	153
Figur 131: Høydemåling med avstandssensorer	154
Figur 132: Kalibreringstrigg for høydemåling.....	155
Figur 133: IR-distance ved høyde 100 mm.....	155

Figur 134: IR-distance ved høyde 400 mm.....	156
Figur 135: Høydeestimat med trigonometri for høyde 100 mm.....	157
Figur 136: Høydeestimat med trigonometri for høyde 400 mm.....	157
Figur 137: Kurvetilpasning 2.ordens polynom ved høyde 100 mm	159
Figur 138: Kurvetilpasning 2.ordens polynom ved høyde 100 mm	159
Figur 139: Høydeestimat ved 2.ordens funksjon og trigonometri ved høyde 100 mm	160
Figur 140: Høydeestimat ved 2.ordens funksjon og trigonometri ved høyde 400 mm	160
Figur 141: 2.ordens polynomer for høydene 100 mm og 400 mm	161
Figur 142: Kontroll av høydeavhengig polynom.....	163
Figur 143: Test av høydeestimat	164
Figur 144: Høydefeil for høydene 100-400 mm	165
Figur 145: Logikk for valg av IR-avstandssensor til høydeestimering.....	166
Figur 146: Høydeavhengig ir_heading_max.....	167
Figur 147: IR-sensorens egenstøy ved høyden 40 cm	167
Figur 148: IR-sensorens egenstøy ved høyden 10 cm	168
Figur 149: Prinsipp HeadingEstimator()	168
Figur 150: Blokkskjema for AngleEstimator().....	169
Figur 151: Blokkskjema for RadiusEstimator() på tankbunn	170
Figur 152: Estimering av radius på tankbunn, sett fra tankens underside.....	170
Figur 153: Test av radius-estimat basert på avstandsmåler	171
Figur 154: Flytskjema for Logic-funksjon for radius-estimat.....	172
Figur 155: Robot på tankens bunn	173
Figur 156: Roll og pitch sin avhengighet av cone_angle	173
Figur 157: Yaw's avhengighet av cone_angle.....	174
Figur 158: Differansen mellom pitch og yaw	174
Figur 159: Cone_angle som funksjon av pitch-yaw.....	175
Figur 160: 2.ordens polynom	176
Figur 161: Hastighetsmåling ved tidspunktene 1-4.....	177
Figur 162: Guidance()-blokk i programvaren	179
Figur 163: Guidance-systemets blokker	180
Figur 164: Linjefølgingsalgoritme for tankvegg.....	181
Figur 165: Linjefølgingsalgoritme for tankbunn	183
Figur 166: Enkel linjefølgingsalgoritme [25].....	184
Figur 167: Forbedret linjefølgingsalgoritme.....	185
Figur 168: Guidance ved height=400 mm	186
Figur 169: Guidance ved height=400 mm	187
Figur 170: Controller()-blokken i programvaren	188
Figur 171: Oppbygning av Controller()	189
Figur 172: Retning- og hastighetsregulator på tankvegg	190
Figur 173: Multivariabel regulator for heading.....	191
Figur 174: Multivariabel regulator med foroverkobling.....	192
Figur 175: SpeedController()	193
Figur 176: Retning- og hastighetsregulator på tankbunn	195
Figur 177: Sprangrespons for implementert PID-HeadingController()	196
Figur 178: Ustabilitet ved hastighetsreferanse 2 mm/s.....	196

Figur 179: Speedcontroller() ved hastighetsreferanse 5 mm/s	197
Figur 180: En hastighetsregulator på hver motor	197
Figur 181: Feedback linearization controller for hver motor	198
Figur 182: Hovedfunksjonene i programmet	201
Figur 183: Realtime plot	203
Figur 184: Cleaning setup	203
Figur 185: Time planner	204
Figur 186: Tank setup	204
Figur 187: Sensordata	205
Figur 188: Estimator	205
Figur 189. Guidance system	206
Figur 190: Controller	206
Figur 191: Alarm	207
Figur 192: Setup	207
Figur 193: 3D-modell av tank	208
Figur 194: Rensing av tankvegg med sagflis og vann	209
Figur 195: Rensing av tankbunn med sagflis og vann	210
Figur 196: Test med tørrfor og vann på tankens bunn	210
Figur 197: Høydeestimat ved height 100 mm	213
Figur 198: Lookahead distance 80 mm	214
Figur 199: Lookahead distance 40 mm	214
Figur 200: Lookahead distance 250 mm	214
Figur 201: Økt gain i HeightEstimator()	215
Figur 202: Redusert gain i HeightEstimator()	216
Figur 203: Ytterligere redusert gain i HeightEstimator()	216
Figur 204: Unøyaktighet i høydeestimatets funksjon av <i>headingen</i>	217
Figur 205: Test ved height 400 mm	217
Figur 206: Kontroll av konstant avvik med lookahead distance senket	218
Figur 207: Aktuell heading under kjøring ved høyden 10 cm	218
Figur 208: Avstandssensorens nøyaktighet ved height 100mm	219
Figur 209: Sammenheng mellom akselerometerets feil og høydefeil	220
Figur 210: Estimator for heading error	220
Figur 211: Integralvirkning på avviket	222
Figur 212: Rørramme i Autocad 3D Figur 213: Sammensveist rørramme	233
Figur 214: Ferdig tankrigg	233
Figur 215: Magnetenes plassering	235
Figur 216: Tester med to typer hjul	235
Figur 217: Hjul på testtanken	236
Figur 218: Magnet som hjul	236
Figur 219. Robot med to hjul	237
Figur 220: Robot med to hjul og oppsamler	237
Figur 221: Flere prototyper med fire hjul	238
Figur 222: Rensesystem som oppsamler	239
Figur 223: Forsøk med roterende renser, to kontaktpunkter	239
Figur 224: Roterende renser med to kontaktpunkter sett fra tankens inside	240

Figur 225: Renser med fire kontaktpunkter påmontert robot med to hjul	240
Figur 226: Simulering av avfall på tankveggen	241
Figur 227: Fleksibel sammenfesting av de fire kontaktpunktene formet som en firkant.....	241
Figur 228: Fleksibel sammenfesting av de fire kontaktpunktene formet som et kryss	242
Figur 229: Rens av tankbunn, sett fra innsiden og utsiden	242
Figur 230: Tilvirkning av robotens kropp.....	243
Figur 231: Robotens kropp ferdigstilt.....	243
Figur 232: Metallbro	244
Figur 233: Enkel testtrigg for å bevege sylindermagnetene til siden	245
Figur 234: Sylindermagneter og renser på tankens innside.....	245
Figur 235: Dagens prototype av brosystem	246

Tabeller

Tabell 1: Permanentmagnetiske materialers egenskaper [6]	40
Tabell 2: Friksjonskoeffisienter mot tankens innside.....	51
Tabell 3: Friksjonskoeffisienter mot tankens utside	52
Tabell 4: Modes	132
Tabell 5: Variabelen placement.....	132
Tabell 6: Data fra robot til PC	135
Tabell 7: Data fra PC til robot	135
Tabell 8: Heading-verdier i måling	155
Tabell 9: Cone_angle-vinkler målt.....	173

Forkortelser

ADC	Analog to Digital Converter
CPU	Central Processing Unit
DAC	Digital to Analog Converter
DC	Direct Current
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read Only Memory
EPDM	Ethylene Propylene Diene Monomer
IR	Infra-Red
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IC	Integrated Circuit
I ² C	Inter-Integrated Circuit
LED	Light Emitting Diode
LOS	Line Of Sight
LDO	Low DropOut
MOS	Metal Oxide Semiconductor
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor
NI	National Instruments
NdFeB	Neodymium Iron Boron
POM	Polyoxymethylene
PPR	Pulses Pr Revolution
PWM	Pulse-Width Modulation
RF	Radio Frequency
RTC	Real-Time Clock
RS-232	Recommended Standard 232
RPM	Revolutions Per Minute
SmCo	Samarium Cobalt
SPI	Serial Peripheral Interface
SRAM	Static Random Access Memory
TTL	Transistor-Transistor Logic
TWI	Two Wire Interface
USART	Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter
WLAN	Wireless Local Area Network

1 Innledning

Denne rapporten beskriver arbeidet som er gjort i forbindelse med utvikling av en prototype for en autonom robot. Robotens oppgave er å rense oppdrettstanker, ved at den fjerner avfall og biofilm fra tankens innside. Dette bør skje uten å påvirke produksjonsvilkårene i tanken på noen negativ måte. Målet med oppgaven er å utvikle et automatisk rensesystem for å slippe det tidkrevende arbeidet som i dag gjøres manuelt. På NTNU Sealab finnes 18 like forsøktanker fordelt på to såkalte Qodtech-rigger. Det er ønskelig at et fungerende rensesystem skal brukes for å sikre optimale vekstforhold for yngelen under forsøk ved Sealab.



Figur 1: En Qodtech-rigg

I prosjektets første fase ble det laget en tidsplan for gangen i prosjektet. På grunn av begrenset tid i forhold til prosjektets størrelse, ble tidsplanen laget med minimalt rom for problemer og forsinkelser. Avvik i forhold til tidsplanen har oppstått underveis, og resultert i at systemet ikke har blitt testet så mye i praksis som det var ønskelig. I tillegg var det ønskelig å utvikle sprutsikker mekanikk og en kompakt elektronikk. Dette har ikke blitt prioritert, da uttesting av konseptet er en nødvendighet og danner grunnlaget for valg av komponentene. Avviket i tidsplanen er en kombinasjon av følgende:

- De mekaniske utfordringene i dette prosjektet er meget store. Prototyping har derfor tatt mye mer tid enn planlagt. I praksis har omtrent halve arbeidstiden hatt fokus på mekanikk. Robotens bevegelse mellom tankvegg og tankbunn har gitt spesielt store utfordringer.
- Det er utviklet en mer avansert funksjonalitet enn først planlagt. Dette gjelder spesielt utvikling av brosystem slik at en robot kan rense flere tanker. Mye tid har gått med til prototyping av brosystemet.

Opgaven er av praktisk art, så design og konstruksjon av mekanikk har vært nødvendig for å kunne gjennomføre prosjektet. Beskrivelser og illustrasjoner av de mekaniske løsningene er gjort for at leseren skal kunne se helheten i prosjektet. De kybernetikk-relaterte temaene er likevel vektlagt mest i rapporten. Løsningene er beskrevet ned til det detaljnivået leseren har nytte av for å forstå prinsippene og begrunnelsene. Detaljer på kildekodenivå er utelatt fra rapporten, da dette blir for omfattende.

Denne rapporten er skrevet for personer med teknisk bakgrunn. Derfor forventes det at leseren er kjent med en del grunnleggende prinsipper innen elektronikk, reguleringsteknikk og fysikk. Rapporten er delt inn i 17 kapitler.

Kapittel 2 gir en beskrivelse av den spesifikke arbeidsoppgaven. Her gjennomgås også resultatet av en gjennomført bakgrunnsundersøkelse. Denne undersøkelsen ble gjennomført i en forprosjektfase for å finne mulige løsninger som finnes på markedet i dag. Tilsvarende løsninger blir her vurdert mot det praktiske problemet. I kapittel 3 forklares mulige renskonsepter til den spesifikke arbeidsoppgaven basert på egne ideer. Her begrunnes også valg av konsept for videreføring i prosjektet. En overordnet beskrivelse av det valgte konseptet, med en enkel innføring i de valgte løsningene gjøres i kapittel 4. Dette innebærer både elektronikk, mekanikk og programvare.

Kapitlene 5-13 forklarer de tekniske løsningene mer i detalj. Dette er tekniske kapitler som er delt opp etter naturlige delprosjekter som jeg har jobbet med underveis i prosjektet. For hvert tema spesifiseres et delmål eller et gitt problem. Etter hvert blir de valgte løsninger på problemene forklart. Hvert kapittel oppsummeres med en konklusjon basert på oppnådde resultater. I de tekniske kapitlene forklares først den mekaniske utformingen av robotsystemet. Videre beskrives posisjoneringssystemet og valgte komponenter på roboten. Dette i form av sensorer, motorer, trådløs kommunikasjon osv. Utvikling av elektronikken forklares i kapittel 11, elektronikk design.

Kapitlene 12 og 13 omhandler programvaren som er utviklet i prosjektet. Dette gjelder både programvare på robot og på et grafisk brukergrensesnitt til PC. Leseren bes huske at en endelig prototype ikke ble ferdig under prosjektet. Endringer og videreutvikling av programvaren vil derfor foregå i ettertid. Optimale innstillinger av regulatorer er ikke prioritert i denne rapporten, da det forventes endringer i mekanikken i en neste prototype. Nødvendige oppgraderinger av motorene vil endre regulatorenes respons betraktelig. Regulatorer er derfor stort sett beskrevet i form av blokkskjema og ønskede responser. Kapitlene gir likevel en god indikasjon på valgte prinsipper og løsninger.

I kapittel 14 gis en beskrivelse av praktiske tester av konseptet gjennomført på en tank. Også ideer for andre konsepter med bruk av den utviklede teknologien blir vist her. Kapittel 15 gjennomgår en innstilling av systemets viktigste parametre. Fra de viste resultatene beskrives den oppnådde posisjonsnøyaktigheten for rensesystemet. Dette i sammenheng med målinger gjennomført på en reell tank.

Rapporten avsluttes med en konklusjon og en gjennomgang av viktige punkter for videreutvikling av prosjektet. Under videreutvikling forklares tanker og ideer omkring nødvendige og oppgraderinger. Dette både med hensyn til funksjonalitet og faglig interesse for mulige fremtidige studentprosjekter.

Som vedlegg A følger en beskrivelse av konstruksjonen av en tankrigg. Dette ble gjennomført i prosjektets første fase, da det var nødvendig med en tank for å teste prototyper på. Vedlegg B beskriver hovedpunktene fra prototypingsfasen. Ulike prototypers fordeler og ulemper er vurdert fra praktisk testing. Dette er kombinert med bilder, illustrasjoner og mekaniske tegninger. Forklaringene er nyttig bakgrunnsinformasjon for studenter som skal videreføre prosjektet. For andre lesere kan det også være interessant lesing. I vedlegg C presenteres koblingskjema for det planlagte elektronikkdesignet. MATLAB-kode og datablader som er av interesse i rapporten ligger vedlagt som et digitalt vedlegg D. Her finnes også video fra prototyping og testing. Det anbefales å se videoen for å få en bedre helhetlig forståelse av konseptet.

2 Bakgrunn

Dette kapitlet viser behovet for tankrensing ved NTNU Sealab. Først gis en beskrivelse av systemets arbeidsoppgave med aktuelle utfordringer og ønskede spesifikasjoner. Deretter presenteres en sammenfatning av en gjennomført bakgrunnsundersøkelse av beslektede systemer som finnes på markedet i dag.

Arbeidsoppgaven

Under marin yngelproduksjon er tankhygiene en betingelse for å oppnå gode produksjonsvilkår. Vannbehandling og rensing av bunn og vegger i tankene er derfor sentrale oppgaver i slike produksjonssystemer. I dag krever dette mye tid og ressurser. For å slippe dette slitsomme og tidkrevende arbeidet, er det ønskelig å konstruere et konsept som gjør jobben og sikrer stabile forhold i tanken. En annen ulempe med varierende tankhygiene er et ekstra usikkerhetsmoment under gjennomføring av oppdrettsforsøkene.

Figur 2 viser hvordan en av tankene ved NTNU Sealab ser ut innvendig. Her er det rør både for innløp og utløp av saltvann. Dette gir en god sirkulasjon i tanken. På utløpet er det plassert et filter for at yngelen ikke skal forsvinne fra tanken. På disse spesifikke tankene gjøres oppdrettsforsøk på torskeyngel. Tilsvarende rensbehov gjelder også for andre arter.



Figur 2: Innvendig i tanken

Figuren viser at rørene i tanken begrenser den innvendige plassen tilgjengelig for et rensesystem. Dette må det tas hensyn til under valg av konsept.

Tankriggen består av en bordplate på et understell av en rørramme. I bordplaten er det et sirkulært hull for hver tank. Figur 3 viser hvordan det ser ut utvendig på tankriggen. En del slanger, rør og ventiler gjør at ledig plass også her er svært begrenset.



Figur 3: Bilde av tankriggen utvendig

2.1 Ønskede spesifikasjoner

Rensesystemets viktigste egenskaper kan oppsummeres som:

- Innretningen skal påvirke yngelen i tanken minst mulig
- Rensesystemet må rense hele tanken innvendig, slik at alt avfall løsner fra tankens overflate
- Valgte materialer skal ikke avgi farlige stoffer i vannet som kan påvirke yngelen
- Løsningen bør være korrosjonsbestandig
- Innretningen bør være selvgående, slik at behovet for menneskelig påvirkning er lavt

2.2 utfordringer

De største utfordringene for utvikling av konseptet har blitt vurdert som:

- Det er lite plass i og rundt tankene
- På Sealab er det totalt 18 stk tanker. Et avansert system på hver tank gir mye vedlikehold og muligheter for feil
- Systemet bør fungere på forskjellige tankstørrelser
- Konseptet må være robust og tåle det korrosive miljøet
- Både tankvegg og tankbunn må renses
- Det må undersøkes hvordan avfallsrestene påvirkes av det valgte rensesystemet, og om oppsamling er nødvendig

2.3 Hva finnes på markedet?

I en forprosjektfase ble det foretatt en bakgrunnsundersøkelse for å finne eventuelle beslektede systemer. Det enkleste hadde vært om det fantes en løsning på markedet som kunne tilpasses dette problemet direkte. Beslektede systemer som finnes på markedet er følgende:

2.3.1 Vindusvaskesystemer

Det finnes mange varianter av systemer for vask av vinduer på større bygninger. Her benyttes ofte vakum for å holde roboten fast i glasset. Alternativt benyttes forskjellige skinnesystemer for å holde

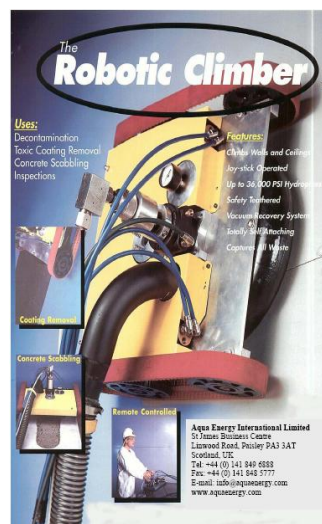
vaskeanordningen fast. Figur 4 viser et bilde av en vindusvaskerobot[1]. Felles for disse systemene er at de er ganske store og inneholder svært mye mekanikk og slanger.



Figur 4: Vindusvaskerobot [1]

2.3.2 Veggvaskeroboter

Tilsvarende som for vask av vinduer, finnes det robotiserte løsninger for vask av vegger. Figur 5 viser bilde av en veggvaskerobot levert av firmaet Aquaenergy [2]. Robotic Climber benytter trykkluft for å danne et vakum. Slik holder roboten seg fast til vegger eller tak. Det benyttes en høytrykksspyler montert på roboten for rens av veggene. Veggvaskerobotene er som vindusvaskerobotene, store og lite egnede til rens av innvendige tankvegger til oppdrett.



Figur 5: Veggvaskerobot [2]

2.3.3 Bassengrensere

Det finnes utallige varianter av selvgående bassengrensere. De fleste er batteridrevne roboter. En propell benyttes for å oppnå tilstrekkelig kraft mot bassengveggen, samtidig som skitt og fremmedlegemer suges opp gjennom et filter. Hjul eller belter sørger for bevegelse på veggene. Figur 6 viser bassengrensere Nitro Wall-Scrubber [3].



Figur 6: Bassengrenseren Nitro Wall-Scrubber [3]

Felles for bassengrenserne på markedet er at de er for store for vårt formål. En hurtig roterende propell vil trolig skape mye forstyrrelser for livet i en oppdrettstank. Fiskeyngelen vil sannsynligvis suges inn i renserens filter.

2.3.4 Robotarmer

Robotarmer finnes i alle mulige fasonger og størrelser. Disse kan programmeres til å gjøre det arbeidet som i dag gjøres av mennesker. En renseanordning kan utvikles for å festes på robotarmen.

Ulempen med mange tanker, er at det trengs en robotarm på hver tank. Alternativt trengs et skinnesystem for forflytning av armen fra en tank til en annen. Dette blir fort en stor og kompleks løsning. Et annet problem er at mange rør og slanger blir til hinder for robotarmen. Figur 7 viser et bilde av en industriell robotarm [4].



Figur 7: Robotarm [4]

2.3.5 Viskerarm

Det har blitt gjennomført et prosjekt tidligere ved NTNU Sealab for å løse den gitte oppgaven. Dette resulterte i en motordrevet roterende dobbel visker i tanken. Viskeren er saktegående, for å gi minst mulig forstyrrelser i tanken. Figur 8 viser et bilde av den roterende viskeren. I prinsippet fungerer denne som en vindusvisker på en bilrute.



Figur 8: Tidligere prosjekt i form av viskerblader

Tester under oppdrettsforsøk gav dårlige resultater. Ved forsøk oppnådde man 100 % dødelighet i tanken. I ettertid ble det konkludert med at gummien i viskerbladene gav giftige stoffer i vannet som tok livet av yngelen. I tillegg oppstod problemer fordi tanken ikke hadde perfekt rund form. Dette resulterte i at det på enkelte steder i tanken ikke ble god nok kontakt og fjerning av det organiske materialet.

2.4 Konklusjon

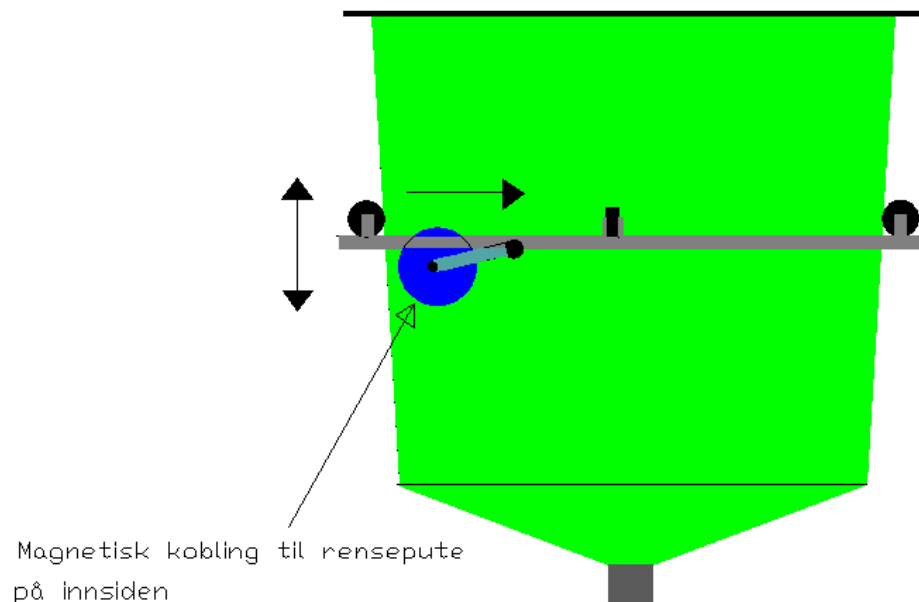
Det finnes ingen ferdige løsninger på markedet som kan direkte tilpasses denne arbeidsoppgaven. Store innretninger i tanken vil trolig gjøre mer skade enn de gjør nytte. En videreutvikling av prosjektet bestående av en viskerarm er trolig det beste av konseptene som finnes tilgjengelige. Et studie av nye mulige konsepter bør derfor gjennomføres. Dersom et bedre konsept finnes, bør dette videreføres.

3 Valg av konsept

I dette kapitlet forklares mulige nye konsepter for et tankrensesystem. Disse er i hovedsak basert på egne ideer, etter en vurdering av forholdene ved Sealab. Det foregående prosjektet bestående av en viskerarm tas også med i vurderingen. Til slutt gis begrunnelse for valgt konsept for videreføring og realisering.

3.1 Utvendig ring med hjul for høydejustering

Det benyttes en ring utvendig på tanken som kan både høydejusteres ved hjelp av motoriserte hjul og roteres i det horisontale planet. Ringen må være todelt, med roterende del nederst. Ved å montere en arm fra denne ringen til en magnetisk kobling til en rensepute på tankens innside, oppnås et system for traversering av hele tanken. Figur 9 viser prinsippet ved at den blå sirkelen slepes etter den roterende ringen. Den blå sirkelen har en magnetisk kobling til en rensepute på tankens innside. Hjulene må være fjærbelastet inn mot tanken da diameteren øker med høyden.



Figur 9: Mulig konsept med utvendig ring og magnetisk overføring

Fordeler:

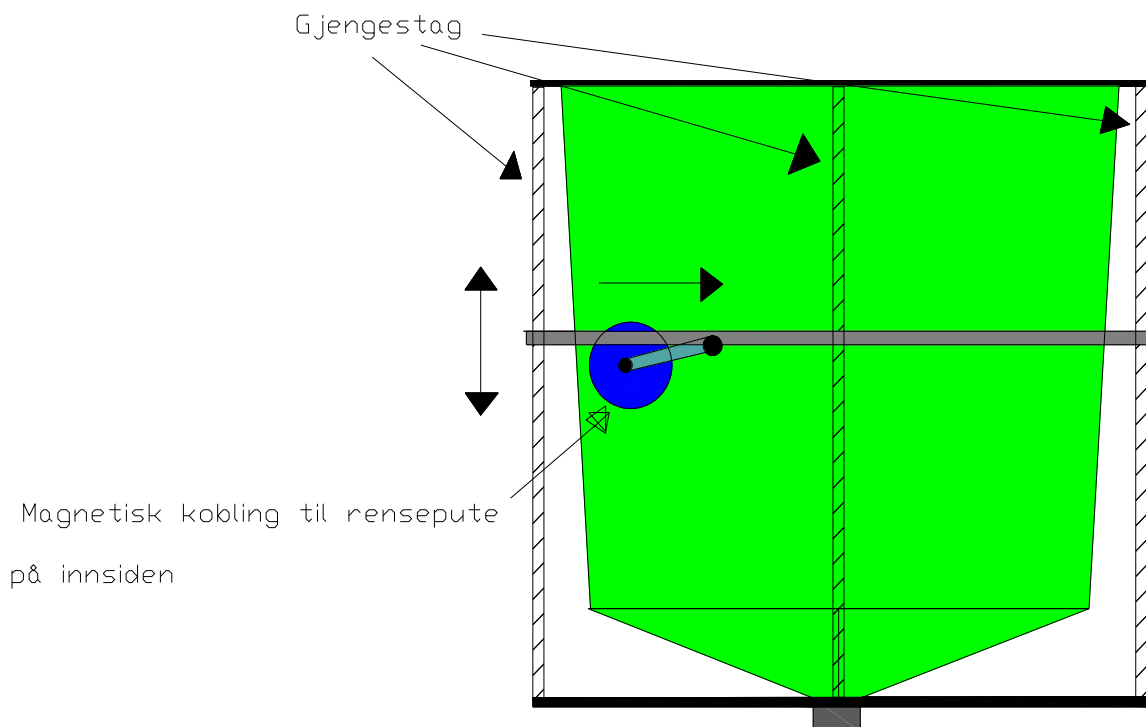
- Enkel posisjonering ved å måle høyden til toppen
- Robust
- Ingen fastmontering, høydehjul klemmer seg fast til tanken
- Ideelt for høyderegulering med steppermotor

Ulemper:

- Ringen må ha en motor pr hjul. Det betyr minimum 3 motorer i tillegg til rotasjon av ringen
- Vanskelig bevegelse på tankbunn
- Må ha en ring på hver tank
- Dersom tankveggen er for skrå, vil ringen falle ned

3.2 Utvendig ring med gjengespindler for høydejustering

Tilsvarende det foregående konseptet kan gjengespindler benyttes for justering av høyden. Spindlene må da festes mot bordplaten i toppen. Med dette systemet kan ringen beveges lengre ned enn det foregående konseptet.



Figur 10: Mulig konsept med utvendig ring og magnetisk overføring

Fordeler:

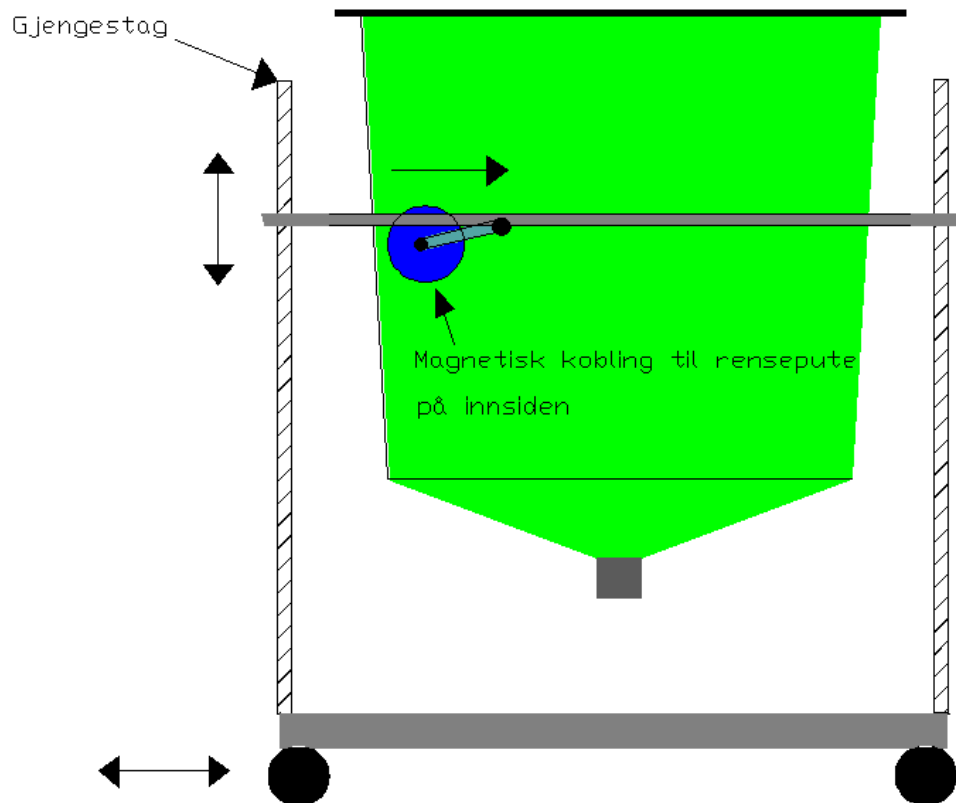
- Enkel posisjonering ved å måle høyden til toppen
- Kan tilpasses alle tankutforminger
- Robust
- Ideelt for høyderegulering med steppermotor

Ulemper:

- Må ha en stor reim som driver alle gjengestagene likt, eventuelt flere motorer
- Må ha en ring på hver tank
- Skitt eller korrosjon på gjengespindlene kan låse fast systemet

3.3 Ring med gjengespindler for høydejustering festet til vogn

Konseptet er i prinsippet likt det foregående, men her er gjengespindlene festet til en vogn som kjøres på gulvet. Når ringen senkes helt ned, kan vognen kjøre til neste tank. Dette krever at ingen rør eller hindringer er i området. Konseptet krever da en ombygging av hele tankriggen og rørsystem.



Figur 11: Prinsipp ring med gjengespindler for høydejustering festet til vogn

Fordeler:

- Kan utvikles til forflytte seg mellom alle tankene. En robot er tilstrekkelig

Ulemper:

- Krever plass og ryddighet under tankene
- Må ha en stor reim som driver alle gjengestagene likt, eventuelt flere motorer
- Mye ombygging av rørsystemer og bord er nødvendig
- Avansert mekanikk
- Vanskelig posisjonering
- Krever motorer på vognhjul i tillegg til motorer på gjengestag og roterende ring

3.4 Viskerarm videreutvikling

Dette innebærer en videreutvikling av det foregående prosjektet som gav dårligere resultater. Gjennom å endre noe på mekanikken og benytte andre materialer, bør det være mulig å få til en fungerende løsning. Konseptet innebærer fast installasjon av et visker-system på hver tank.



Figur 12: Innvendig viskere i tank

Fordeler:

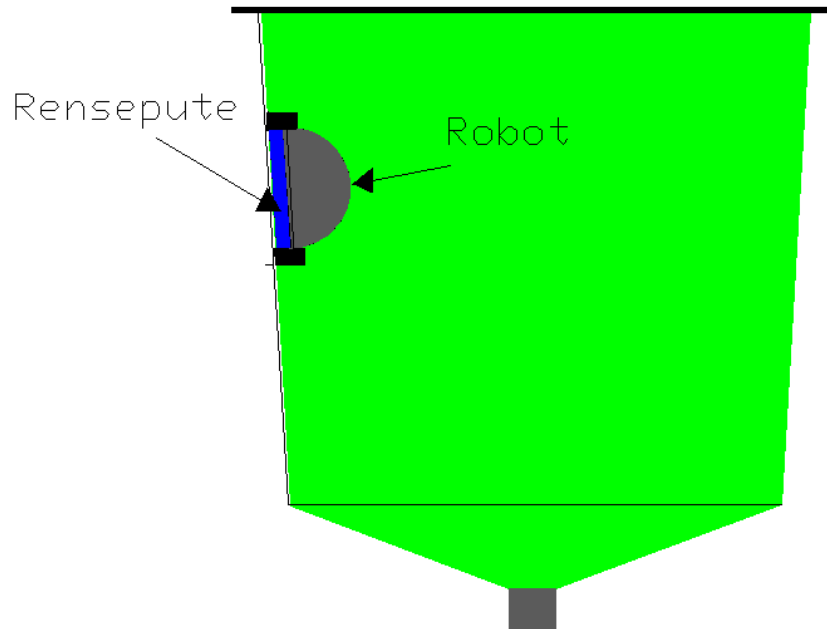
- Ingen utfordringer med posisjonering
- Rimelig løsning
- Robust

Ulemper:

- Ett system for hver tank
- Ovale tanker gir ujevnt trykk mot tanken
- Lite faglige utfordringer

3.5 Autonom robot innvendig i tank

Konseptet innebærer en autonom robot med påmontert rensepute innvendig i hver tank. Roboten må posisjonere seg og traversere hele tanken. For å få feste til tankveggen, bør roboten ha en vakumpumpe med et sugesystem eller en saktegående propell.



Figur 13: Autonom robot innvendig i tank

Fordeler:

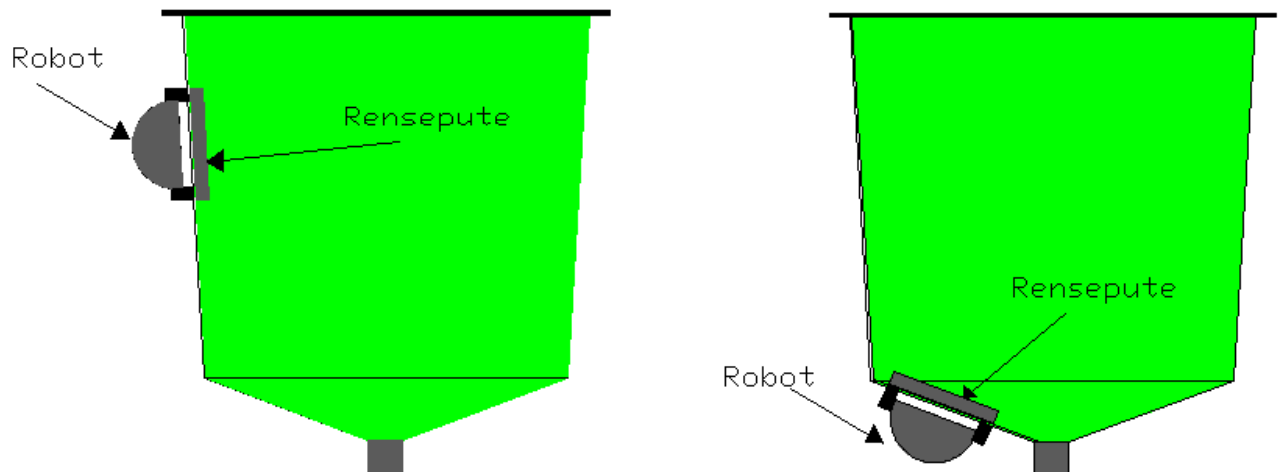
- Ingen utvendige deler på tanken
- Kan brukes på alle tanktyper

Ulemper:

- Robot må være vanntett
- Det er lite plass i tanken
- Vanskelig posisjonering under vann
- Innvendig overflate på tanken må være glatt for å holde vakum
- Vanskelig opplading av robotens batterier
- Må ha en robot pr tank, da forflytting mellom tanker skaper smitterisiko. Alternativt må roboten enkelt kunne desinfiseres.

3.6 Autonom robot utvendig på tank med magnetisk kobling gjennom tankvegg

Konseptet innebærer at en robot traverserer tanken utvendig med en magnetisk kobling til tankens innside. På tankens innside følger en rensepute etter robotens bevegelser. Dette konseptet vil fungere for tanker som ikke er av ferromagnetisk materiale, og ikke har for tykke vegger. Dersom roboten er saktegående og den innvendige renseputen er fysisk liten, er det mulig å utvikle et system som gir minimale forstyrrelser i tankmiljøet.



Figur 14: Prinsipp for autonom robot utvendig på tank

Fordeler:

- Lite fast installasjon
- Ingen elektriske deler inne i tank
- Kan skaleres til alle tankstørrelser
- Det kan utvikles et konsept for kjøring mellom flere tanker. Da er bare en robot nødvendig på hver tankrigg.
- Ingen smittefare, da innvendig rensesystem holdes i samme tanken
- Kan videreutvikles til å samle opp avfallet
- Nytt konsept
- Faglig utfordrende

Utfordringer:

- Robot må posisjonere seg nøyaktig
- Farkosten må henge fast både på tankveggen og tankbunnen
- Robot må kunne forflytte seg mellom tankvegg og tankbunn
- Utstyret må være korrosjonsbestandig og innkapslet
- Man kan risikere at tankveggen er fuktig på utsiden
- Roboten må kjøre så sakte at den ikke forstyrrer miljøet i tanken

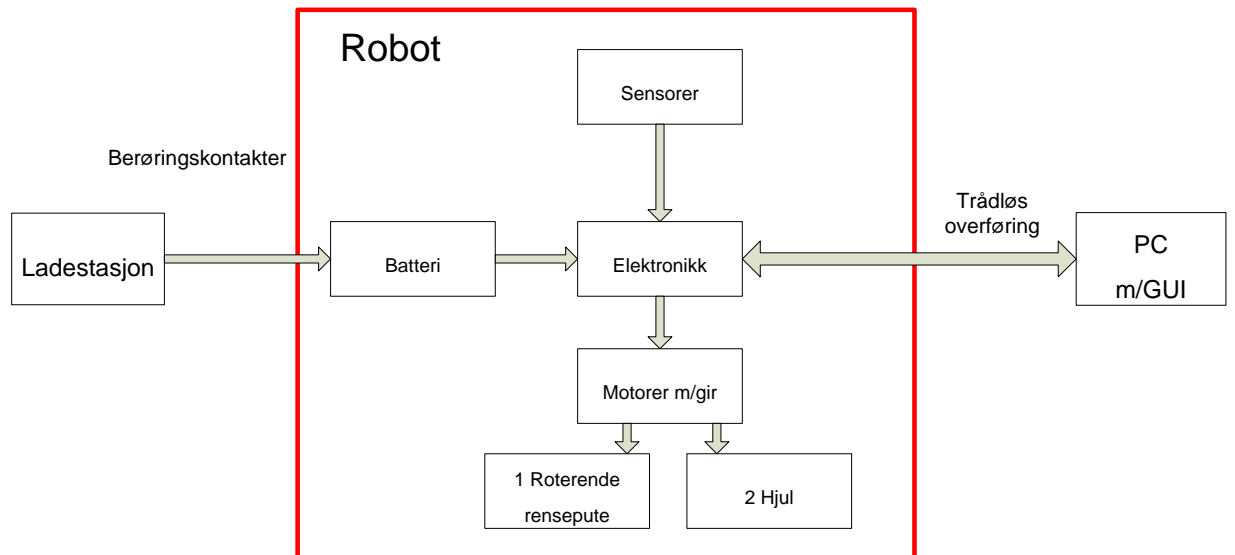
3.7 Konklusjon

Basert på en total vurdering av egenskaper til de nevnte konseptene, ble konseptet med en autonom robot på tankens utside (3.6) vurdert som den beste løsningen. Robotsystemet kan skaleres til andre tankstørrelser. Dette gir fordeler, også med tanke på andre bruksområder innen oppdrettsnæring eller industri. En annen viktig faktor, er at den innvendige rensere kan holdes adskilt i hver tank. Dette er viktig med tanke på smittefare mellom tankene, og sparer manuelt arbeid i form av desinfisering. Konseptet er interessant og utfordrende, da ingen tilsvarende løsning er å finne på markedet.

4 Oversikt over systemet

Denne delen gir en overordnet beskrivelse av det valgte konseptet. Det gis en innføring i de valgte tekniske løsninger for roboten, både maskinvare og programvare. Alle tekniske løsninger blir beskrevet mer grundig i de påfølgende kapitlene.

4.1 Systembeskrivelse maskinvare



Figur 15: Overordnet system

Figur 15 viser en prinsippskisse av robotsystemet. Selve roboten består i hovedsak av disse komponentene:

- Ramme med hjul og nødvendig mekanikk
- Rensepute innvendig i tanken med magnetisk kobling til robot
- To motorer for fremdrift
- En motor for rotasjonsbevegelse av renseputen
- Sensorer
- Elektronikk
- Batteri

Eksterne komponenter som tilkobles roboten er:

- Ladestasjon
- PC

Tilkobling til ladestasjonen skjer ved at roboten kommer i kontakt med dens ladepoler. Alternativt kan en mer avansert magnetisk overføring av energi til batteriet utvikles. Fordelen med induksjon er at problemet med korrosjon og slitasje på ladepoler ikke er tilstedet.

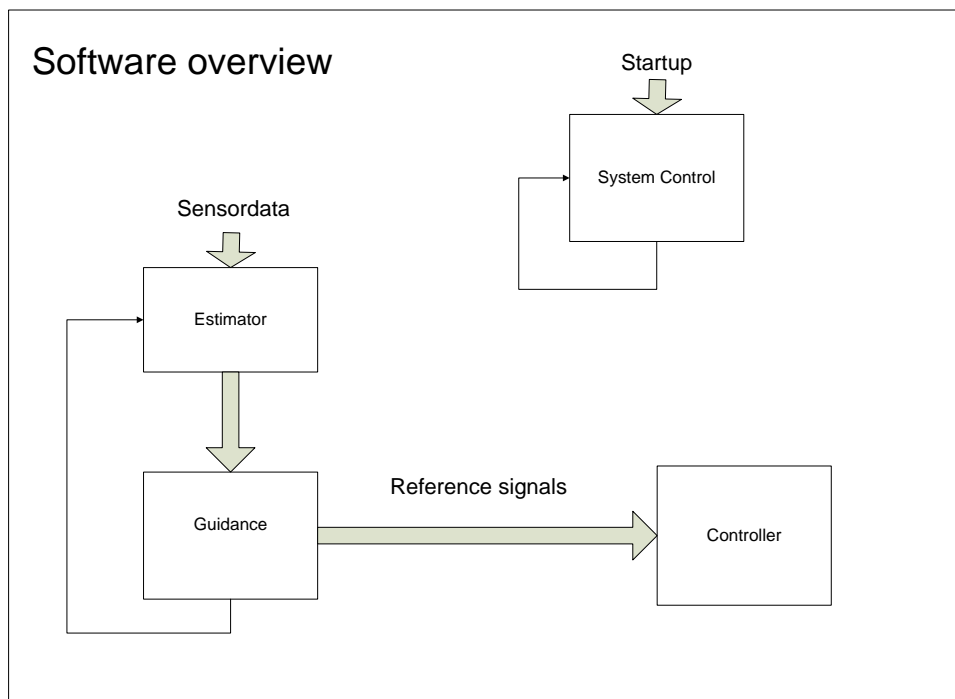
Trådløs kommunikasjon med PC benyttes for overvåkning og start av rensesystemet. Hvilke tanker skal renses og til hvilke kjøretider overføres trådløst. I tillegg har man stor nytte av den trådløse linken for logging av data i en testfase.

4.1.1 Automatisk rens av flere tanker

Et konsept som benytter en og samme robot for å rens flere tanker er utviklet. Dette betyr at man kun trenger en robot på hver tankrigg. Forflytning mellom tankene skjer på et brosystem. En mer grundig beskrivelse av dette vil bli gitt i kapittel 5.8.

4.2 Systembeskrivelse av robotens programvare

Roboten styres av en egenutviklet programvare på en mikrokontroller. Figur 16 viser et overordnet blokkdiagram for robotens programvare.



Figur 16: Systembeskrivelse programvare på roboten

Programvaren er i prinsippet bygd opp av fire hovedfunksjoner:

System Control tar seg av de viktige beslutningene i systemet. Dette er typisk rutiner for sikkerhetssjekk, trådløs kommunikasjon og oppstart av rensesprosessen. Denne blokken forteller resten av programmet hva som skal gjøres videre.

Estimatoren har som oppgave er å vite hvor roboten befinner seg på tanken. Dette innebærer estimering av flere parametre som beskriver både robotens posisjon og retning. Parametrene beregnes fra leste sensordata.

Guidance styrer roboten slik at den følger en ønsket rute. Til dette benyttes Estimatorens beregnede estimater og en spesifisert rute. Guidance-systemet styrer Controlleren ved hjelp av referansesignaler for hastighet og retning.

Controlleren er bygd opp av flere regulatorer som styrer motorene for fremdrift. Dette er nødvendig for å holde riktig hastighet og retning. Controlleren styrer også motoren for den roterende renseputen.

4.3 Grafisk brukergrensesnitt på PC

Det har blitt utviklet et brukergrensesnitt for å forenkle den trådløse kommunikasjonen mellom robot og PC. Programmet benyttes i hovedsak for overvåkning og oppstart av rensesystemet. I tillegg er det grafiske brukergrensesnittet et nyttig hjelpeverktøy under utviklingen, da man kan lese ut alle robotens viktigste parametre i form av grafer. En beskrivelse av det grafiske brukergrensesnittet er gitt i kapittel 13.

4.4 Flere bruksområder

Det utviklede konseptet kan skaleres opp til større tanker. Det gjør det aktuelt med hensyn på oppdrettsanlegg i større skala eller andre industrielle formål. Tekniske løsninger som er fleksible er derfor valgt der det er mulig.

4.5 Testrigg

Det ble laget en testrigg for å gjøre arbeidet under prototyping enklere. Denne ble bygd av en ramme sveist sammen av stålrør. En tilsvarende tank som på Qodtech-riggen ble montert.

Tanken har en veldig flat bunn, noe som gjør en robots bevegelse mellom tankvegg og tankbunn vanskelig. Testing på en annen tank med mer skrå bunn ville gitt en enklere, men mindre realistisk problemstilling. Vedlegg A beskriver bygging av testriggen.



Figur 17: Tankrigg

5 Mekanisk utforming

I dette kapitlet blir de valgte mekaniske løsningene vist. Både beregning av magnetiske krefter og friksjonskrefter gjøres, da dette ligger til grunn for realisering av konseptet. Valgte løsninger begrunnes ved hjelp av skisser, teoretiske beregninger eller gjennomførte målinger.

5.1 Bakgrunn

Under planleggingen av prosjektet var det ingen klare retningslinjer for hvordan mekanikken på roboten burde være. Mange mekaniske utforminger ble derfor vurdert og praktisk testet i en prototypingsfase. I dette kapitlet beskrives flere mulige løsninger med sine fordeler og ulemper. En illustrativ beskrivelse av flere utviklede prototyper ligger vedlagt rapportens vedlegg B.

5.1.1 Viktige egenskaper

Det er mange viktige egenskaper som ligger til grunn for utformingen av robotsystemet. De viktigste mekaniske egenskapene er følgende:

- **Enklest mulig mekanikk**

Under utvikling av mekanikk bør det benyttes enkle løsninger der det er mulig. Løsningene bør ha få komponenter. Dette gjelder for eksempel få motorer og bevegelige deler. Dette vil kjøre farkosten mindre utsatt for feil og billigere å produsere.

All elektronikk plasseres på selve roboten. Sannsynligheten for feil blir større og feilsøkingen vanskeligere dersom roboten må kommunisere med annen elektronikk på hver tank for styring av for eksempel servoer eller solenoider. Det bør kun være en lader og et brukergrensesnitt som tilkobles roboten eksternt.

- **Minst mulig renseenhet innvendig i tanken**

Tilgjengelig plass innvendig i hver tank er begrenset på grunn av rør og slanger. Den innvendige enheten bør allikevel dimensjoneres så liten som mulig, da en stor enhet vil forstyrre yngelen i større grad.

- **Robotens størrelse**

Den utvendige robotens størrelse bør stå i forhold til tankens størrelse, slik at den kan bevege seg fritt og kan rense hele tankens overflate. Dersom roboten dimensjoneres for liten, vil den bruke unødvendig lang tid på å rense en tank.

- **Lav hastighet**

Farkostens hastighet bør være så lav at yngelen i tanken forstyrres i liten grad. Sannsynligheten for at yngel blir klemt mellom renesystemet og tanken er også mindre dersom hastigheten er lav.

- **Robot bør aldri falle ned fra tanken**

Robotsystemet bør ikke løsne fra tanken ved for eksempel lavt batterinivå eller andre feil. Dersom den faller ned på gulvet, kan man risikere at den ødelegges.

- **Bevegelse mellom tanker**
Det er ønskelig at en robot skal kunne rense flere tanker, ved at den forflytter seg fra en tank til en annen uten menneskelig hjelp.
- **Lavt energiforbruk**
For at roboten skal ha lengst mulig driftstid mellom hver lading, er det viktig at den er så energieffektiv som mulig. Dette bør det tas hensyn til under dimensjonering av både mekanikk og elektronikk.
- **Innkapsling**
Tankens utside er i utgangspunktet et tørt område. Man kan allikevel risikere at det renner over vann i tanken. Dette skaper fuktige omgivelser for roboten. Da det benyttes saltvann under yngeloppdrettsforsøkene, arbeider roboten i et svært korrosivt miljø. Innkapsling av elektronikken er derfor nødvendig.

5.1.2 utfordringer

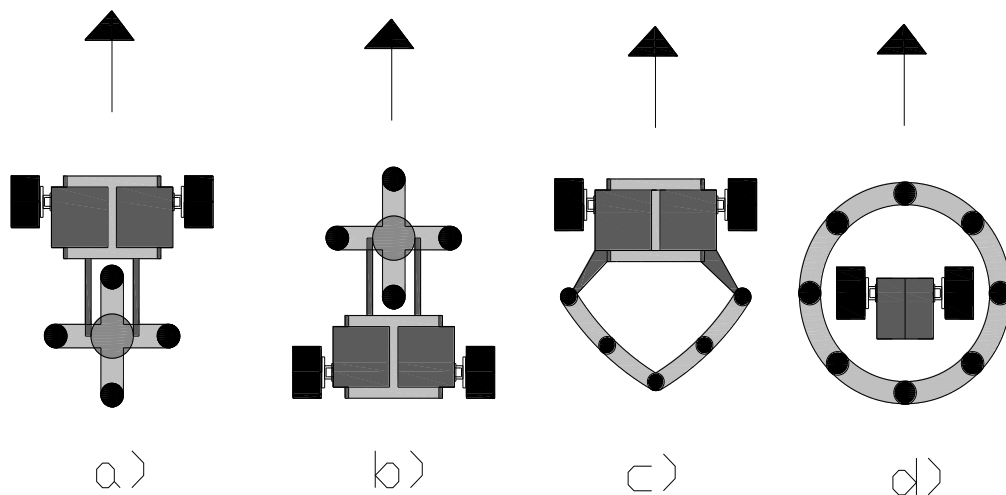
De største utfordringene i forbindelse med utvikling av robotsystemet er følgende:

- **Bevegelse fra tankbunn til tankvegg**
Når roboten skal flytte seg mellom tankveggen og tankbunnen, må den passere en vinkel. Dette er vanskelig både for roboten på utsiden, og renseputen innvendig i tanken.
- **Bevegelse mellom tanker**
Da det er ønskelig at roboten skal forflytte seg fra en tank til en annen, er det nødvendig at den henger fra seg renseutstyret før det kjører videre. Dette er svært krevende, da roboten må finne det igjen når den kommer tilbake. Enkle løsninger er mekanisk vanskelig å konstruere. Det kreves at man tar hensyn til dette underveis i utviklingen.
- **Liten robot**
Det er utfordrende å konstruere roboten liten nok til de aktuelle tankene, ettersom sensorer og motorer som er sterke nok, krever en viss størrelse.
- **Posisjonering**
For at roboten skal kunne traversere hele tanken kreves det at den til enhver tid vet sin egen posisjon. utfordringer rundt dette er gode sensorer og algoritmer. Spesielt utfordrende er posisjonering og bevegelse på tankens bunn.
- **Renserens kraft mot tankens innside**
Renseren bør ha nok kraft mot tankveggen innside til at begroingen løsner. Dersom kraften blir for stor, risikerer man at belegget på tankens innside slites ned over tid. Dette er ikke ønskelig. En annen ulempe er at roboten da også bruker unødvendig mye energi.

5.2 Mulige løsninger

Robotens mekaniske løsninger har blitt utviklet gjennom en kombinasjon av teoretiske beregninger og praktisk testing. De viktigste valgene er følgende:

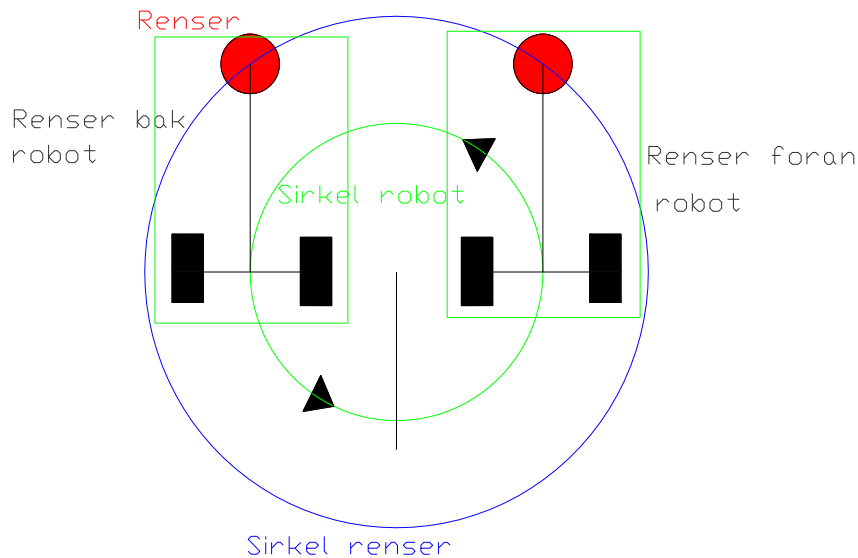
- Hjul eller belter**
 For en selvgående robot er det i hovedsak hjul eller belter som kan benyttes for overføring av krefter mellom motorer og tankvegg. Dette er nødvendig for i sikre fremkommelighet. Fordelen med belter er at kontaktflaten mot tanken blir større. En ulempe er derimot at den praktiske svingradiusen til roboten øker. En annen ulempe er at et langt stivt belte vil skape utfordringer ved bevegelse mellom tankvegg og tankbunn. Fleksible belter er også mulig, men krever mye mekanikk. Hjul er vurdert som det beste alternativet for god framkommelighet. Ved bruk av kun to hjul er også mulighetene for en mindre robot tilstedet.
- To eller fire hjul**
 Roboter med både to og fire hjul har blitt testet i en prototypingsfase. Fordelen med fire hjul er at roboten får bedre grep mot underlaget. De største ulempene er at robotens svingradius blir større og roboten blir unødvendig lang. En bør også huske at fire små motorer bruker mer energi enn to større, da friksjonen i hver motor og den totale massen er av betydning. En robot med to hjul er derfor benyttet i valgt konsept.
- Renseutstyr**
 Flere prinsipper for renseutstyrets utforming og plassering på roboten er vurdert som mulige å realisere. Figur 18 viser de fire mest aktuelle prinsippene.



Figur 18: Mulige prinsipper for renseutstyr på robot

a) Roterende rensepute bak robot

En roterende rensepute er plassert bak robotens hjul. En av fordelene med en roterende renser er at dens rotasjonshastighet kan reguleres uavhengig av robotens hastighet. Dette gjør at det kan renses mer grundig enn om renseputen slepes etter farkosten. Ulempen med å plassere renseputen et stykke foran eller bak hjulene er at renseputen har vanskelig for å rens inntil senter i bunnen av tanken. En robot der renseputen er plassert på midten (figur d), vil ikke ha dette problemet. Figur 19 viser problemet, som kun gjelder ved rens av tankbunnens senter. Renseren (rød prikk) får en større sirkel (blå) enn roboten (grønn).



Figur 19: Renserens sirkel blir større enn robotens

b) Roterende renspute foran robot

Prinsippet er likt det forrige, men den roterende rensen er plassert foran robotens to hjul.

c) Oppsamler bak robot

Renseren er en oppsamler bak roboten. Ulempen med en rensere som ikke roterer, er at den er tyngre for roboten å trekke, da en større kontaktflate behøves. En risikerer at renseren ikke renses tankveggen godt nok dersom oppsamlerens kraft mot tankveggen ikke jevn og stor nok.

d) Roterende renspute rundt robot

En roterende renspute rundt roboten er trolig den beste løsningen med tanke på dens gode bevegelighet og mulighet for å renses helt inntil røret i bunnen av tanken. En utfordring er når roboten skal henge fra seg rensputen i tanken ved kjøring mellom flere tanker.

En annen utfordring er robotens mekanikk, i forbindelse med bevegelse mellom tankvegg og tankbunn. Den ytre renseren må da være fleksibel nok til å passere kanten.

5.2.1 Valgt metode for rensutstyr

På tross av problemer ved tankrensing inntil utløpsrøret, har prinsipp a) har blitt valgt. Dette begrunnes med gode mekaniske egenskaper ved kjøring mellom tankvegg og tankbunn. Tester viser at denne utformingen fungerer bra i praktisk bruk. En viss avstand mellom hjul og rensesystem er nødvendig, da rensens magneter tiltrekkes av hjulenes magneter.

I praksis er det mer rom for plassering av sensorer ved robotens motorer og hjul. Ettersom avstandsmålere benyttes i valgt sensorløsning, bør disse plasseres lengst mulig foran på roboten. På den måten registrerer roboten avstandsendringer eller gjenstander i deteksjonsområdet på et tidligere tidspunkt. Løsning a) er derfor å foretrekke.

5.3 Magnetisk kraft

Dersom valgt robotkonsept skal kunne realiseres, trengs en sterk magnetisk kobling gjennom tankveggen. I denne delen forklares bakgrunnen for valg av magneter på roboten. De viktigste

egenskaper til permanentmagneter forklares og ses i sammenheng med det praktiske problemet. Også teorien som ligger til grunn for et utviklet magnet-kraftberegningsprogram blir forklart.

5.3.1 Permanentmagneter

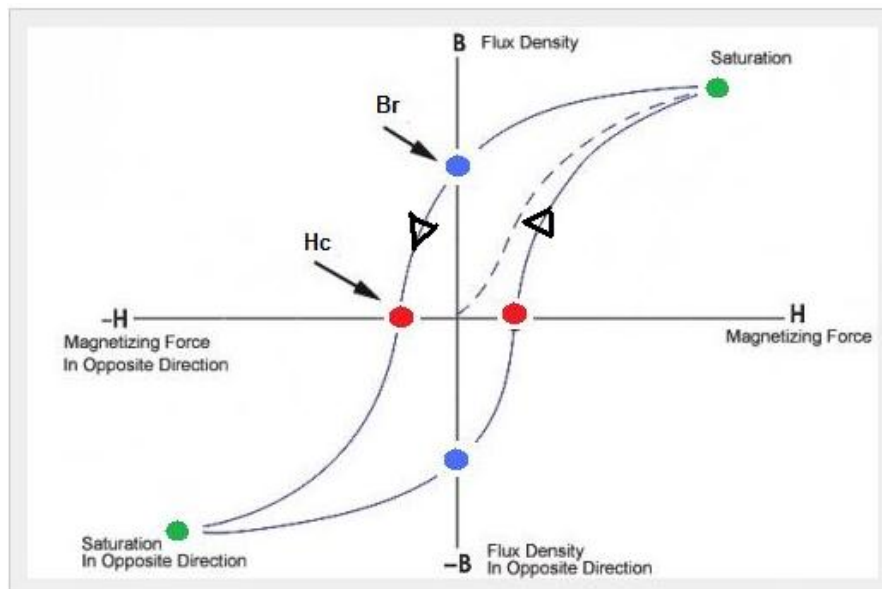
For å oppnå nødvendig magnetisk kraft mellom utvendig robot og innvendig renspute kan det enten benyttes elektromagneter eller permanentmagneter. Fordelen med permanentmagneter i forhold til elektromagneter er at roboten ikke bruker elektrisk energi for å holde seg fast. En annen viktig egenskap er at den magnetiske kraften er konstant, uavhengig av om robotens batteri tappes ned. Ulempen med permanentmagneter er derimot at magnetfeltet ikke kan endres uten å endre plassering av magnetene eller at man skjermer magnetfeltet. Endringen i den magnetiske fluksen i en permanentmagnet over tid er minimal [5]. Permanentmagneter er derfor vurdert som den beste løsningen for å oppnå nødvendige krefter gjennom tankveggen.

5.3.2 Magnetisk materiale

Det finnes i hovedsak fire klasser av magnetiske materialer som benyttes i permanentmagneter i dag. Dette er Neodymium Iron Boron (NdFeB), Samarium Cobalt (SmCo), Ceramic og Alnico [6]. Innenfor hver av klassene finnes en rekke graderinger. Egenskapene som skiller disse materialene vises best på en BH kurve.

B-H-kurve

En B-H-kurve viser sammenhengen mellom tilført magnetisk feltstyrke (H) og materialets magnetiske flukstetthet (B).



Figur 20: B-H kurve for et permanentmagnetisk materiale

De viktigste egenskapene til det magnetiske materialet kan ses i sammenheng med B-H kurven og er følgende:

Residual Induction, Br:

Br er punktene der hysteresekurven krysser B-aksen. I praksis beskriver dette den maksimale flukstettheten for materialet dersom det var plassert i en lukket sløyfe. I følge definisjonen er dette

uten luftgap, så verdien har derfor ingen praktisk nytte [6]. En høy Br -verdi betyr i praksis at magneten er sterk.

Coercive Force, H_c :

H_c er krysningspunktene mellom hysteresekurven og H -aksen. Verdien angir nødvendig eksternt tilført demagnetiserende felt for at materialets magnetiske flukstetthet skal bli null. Verdien måles etter at magneten først har vært i metning. H_c beskriver materialets evne til å holde på magnetiseringen, avhengig av det eksterne magnetfeltet [6].

Intrinsic Coercive Force, H_{ci} :

H_{ci} angir punktet hvor materialet begynner demagnetiseringsprosessen. Denne verdien kan være både større eller mindre enn H_c , avhengig av materialet. En verdi på ca 2 ganger H_{ci} er typisk nødvendig for full magnetisering [7].

Maximum energy product, BH_{max} :

BH_{max} representerer punktet på hysteresekurven der produktet av B og H , også kalt energiproduktet, har sitt maksimumspunkt. Større BH_{max} betyr i praksis at en trenger en fysisk mindre magnet for å oppnå samme magnetiske styrke.

Tabell 1 viser en oversikt over de vanligste magnetiske materialenes egenskaper [6].

Tabell 1: Permanentmagnetiske materials egenskaper [6]

Material	Grade	Br	H_c	H_{ci}	BH_{max}	T_{max} (Deq C)*
NdFeB	39H	12,800	12,300	21,000	40	150
SmCo	26	10,500	9,200	10,000	26	300
Alnico	5	12,500	640	640	5.5	540
Ceramic	8	3,900	3,200	3,250	3.5	300

Alle de fire magnetiske materialene i Tabell 1 tåler temperaturer over 150 °C, og kan dermed benyttes på roboten uten problemer. Valget av magnetisk materiale bør derfor skje på grunnlag forholdet mellom magnetisk styrke og vekt/størrelse. Materialenes korrosjonsbestandighet er ikke viktig, da det forventes at alle deler må kapsles inn.

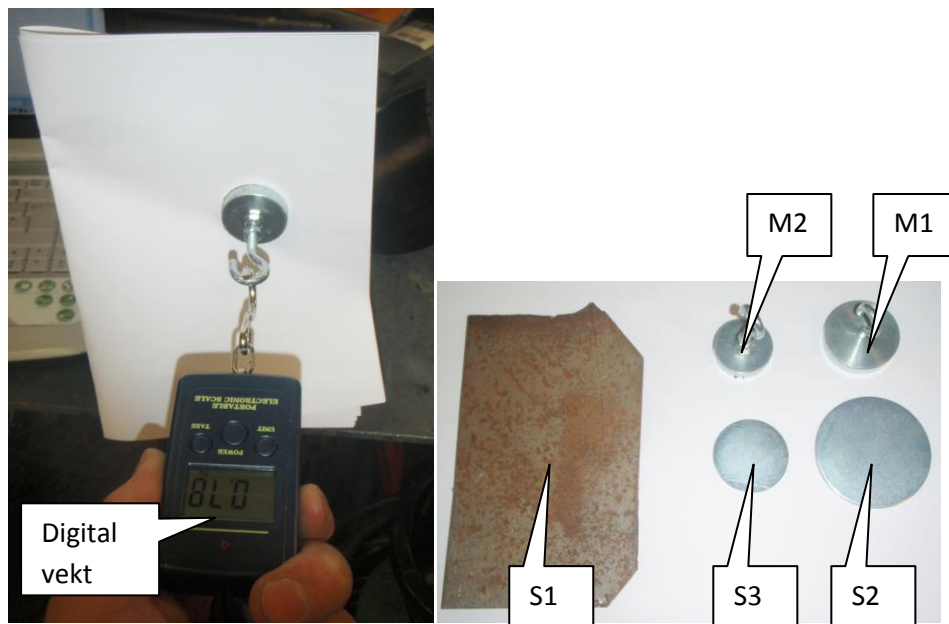
Neodymium Iron Boron magneter er de sterkeste magnetene som er tilgjengelige på markedet i dag[8]. Tabell 1 viser materialets gode egenskaper. Enkelte graderinger av dette materialet fås med Br -verdier opp mot 14,1 kilogauss [6]. På grunn av at materialet har best forhold mellom vekt/størrelse og magnetisk styrke, bør det benyttes i alle robotens magneter.

5.3.3 Test av magnetisk tiltrekningskraft mellom ringmagnet og stålplate

I prosjektets første fase ble ringmagneter vurdert som aktuelle for å skape nødvendige magnetiske krefter mellom roboten og renseputen. Målinger av magnetisk tiltrekningskraft mellom NdFeB-ringmagneter og stålplater ble gjennomført for å vurdere tiltrekningskraftens avhengighet av avstanden og stålplatens størrelse.

Forskjellige avstander mellom magneten og stålplaten ble tilpasset ved å legge mellom en kjent tykkelse papir. Ringmagneter med to ulike størrelser (M1: $\varnothing 40$ mm, M2: $\varnothing 32$ mm) ble testet mot

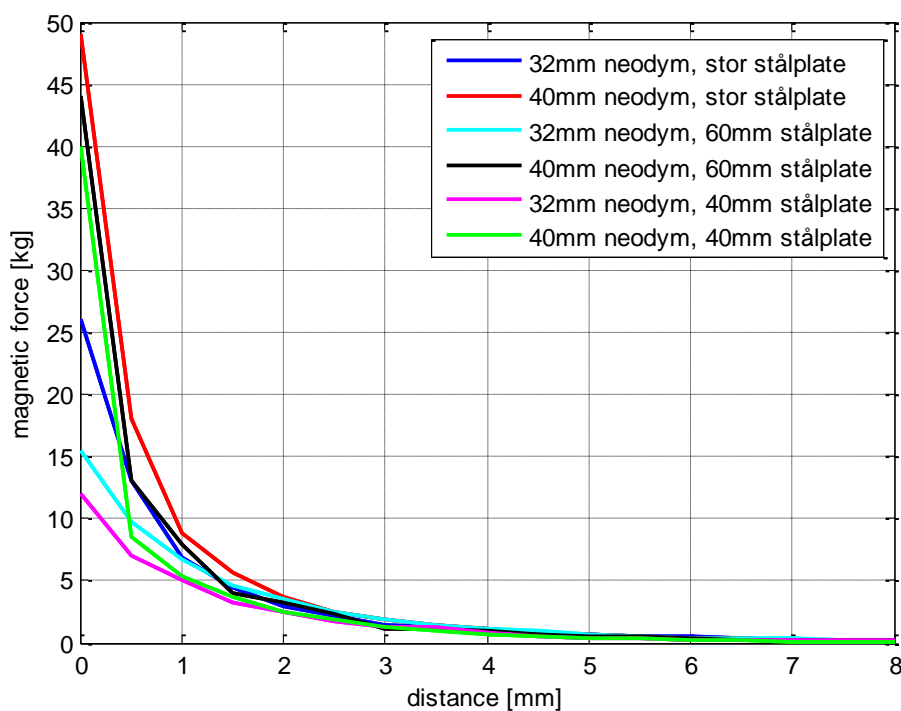
stålplater av tre ulike størrelser (S1: 80x120x4 mm, S2: \varnothing 60x1 mm, S3: \varnothing 40x1 mm). Den maksimale magnetiske kraften ble målt ved å trekke i en digital vekt festet til magneten, og observere den største oppnåelige trekraften. Avstander på opptil 8 mm ble testet i forsøket.



Figur 21: Måling av magnetisk holdekraft mellom magneter og stålplater

Resultat

Figur 22 viser et plott av den magnetiske tiltrekningskraften som funksjon av avstanden. Avlest verdi på vekten er her benyttet som måleenhet for tiltrekningskraft. Den største magneten har en oppgitt maksimal holdekraft på ca 50 kg [9], mens den minste oppnår en maksimal kraft på ca 30 kg [10].

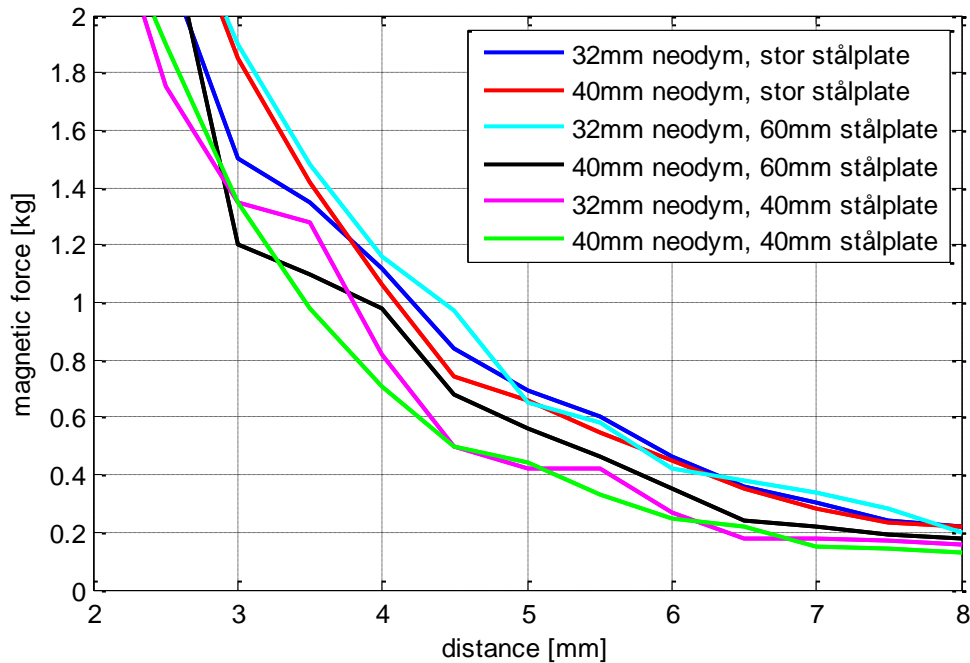


Figur 22: Magnetisk kraft mellom ringmagnet og stålplate

Konklusjon

Av figuren ser vi at den magnetiske kraften avtar veldig mye allerede ved avstander nede i 1-2 mm. Rød kurve viser at kraften er nede i under 10 % av maksimal verdi ved en avstand på kun 2 mm for den største ringmagneten (40mm). Aktuell veggykkelse for vår tank er ca 3,5 mm.

Figuren viser at stålplatens størrelse er av størst betydning ved små avstander. Ved en nærmere titt på området 2-8 mm, kan man også observere at magneten med minst diameter gir størst magnetisk kraft.



Figur 23: Området 2-8 mm

Konklusjonen fra disse målingene er at magnetfeltet avtar veldig fort ved en økende avstand med flate ringmagneter. Ringmagnetene er derfor ikke egnet til formålet, da tankveggen er for tykk i forhold til magnetfeltets utbredning. Magnetens utforming er viktig for å oppnå stor magnetisk styrke ved store avstander.

5.3.4 Magnet kraftberegningsprogram

For å simulere magnetiske tiltrekningskrefter mellom to magneter av forskjellig størrelse, ble det utviklet et egnet program i Matlab. Dette er et nyttig verktøy ved dimensjonering av magneter. Plott for hvordan den magnetiske kraften avtar med avstanden kan enkelt lages for alle magnetstørrelser. Programmet *magnet_force_calc.m* finnes i rapportens vedlegg D.

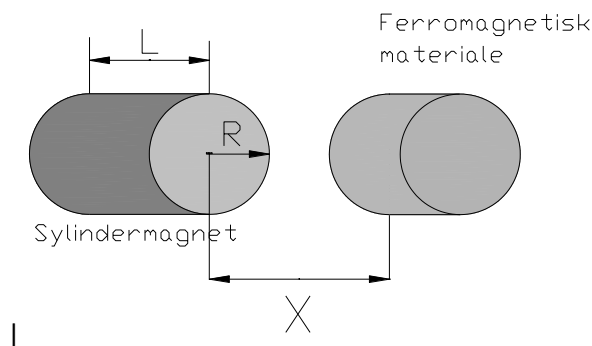
Magnetfeltets utbredning

Ved en stor avstand fra en magnet kan magnetfeltet som drives av magneten tilnærmes et generelt dipol-felt [11]. Denne tilnærmingen gjelder for alle magnetstørrelser og utforminger så lenge magnetfeltet er tilstedet [11]. Den magnetiske feltstyrken fra en dipol avtar inverse kubisk med avstanden fra magnetens senter.

Ved kortere avstander er derimot magnetfeltet mer komplekst, og avhenger av magnetens utforming og magnetisering. Helt inntil magneten avtar magnetfeltet typisk invers kvadratisk med avstanden [11].

For aktuell avstand gitt av tankens tykkelse, er magnetfeltets utbredning sterkt avhengig av magnetenes utforming. Dette betyr i praksis at kalkulasjoner basert på magnetenes dimensjoner må gjøres.

Magnetisk kraft mellom sylindermagnet og ferromagnetisk materiale



Figur 24: Beregning av magnetisk flukstetthet for sylindermagnet

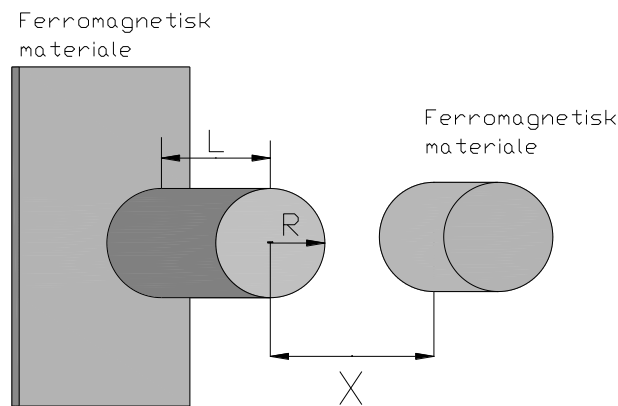
Den magnetiske flukstettheten B_x ved en avstand X fra en sylindermagnet kan tilnærmes følgende sammenheng [6]:

$$B_x = \frac{B_r}{2} \left(\frac{(L+X)}{\sqrt{R^2+(L+X)^2}} - \frac{X}{\sqrt{R^2+X^2}} \right) \quad (5.1)$$

- L : Magnetens lengde
- R : Magnetens radius
- X : Avstand mellom magnet og ferromagnetisk materiale
- B_r : Magnetmaterialets residual induction
- B_x : Magnetisk flukstetthet

Dersom sylindermagneten har en stålplate bak seg, kan flukstettheten ved varierende avstand X uttrykkes ved følgende formel [12]:

$$B_x = \frac{B_r}{2} \left(\frac{(2*L+X)}{\sqrt{R^2+(2*L+X)^2}} - \frac{X}{\sqrt{R^2+X^2}} \right) \quad (5.2)$$



Figur 25: Beregning av magnetisk flukstetthet for sylindermagnet med metallplate bak

I praksis betyr dette at en sylindermagnet med en stålplate i enden vil gi en større magnetisk flukstetthet i punktet gitt av X. Tiltrekningskraft mellom sylindermagneten og det ferromagnetiske materialet ved avstanden X kan tilnærmes følgende sammenheng [12]:

$$F_{\text{cylindrical}} = 0.577 * B_x^2 * A \quad (5.3)$$

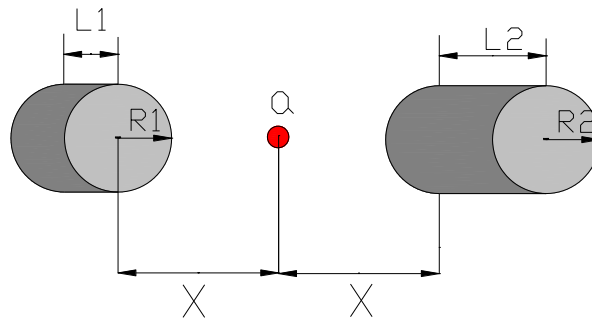
- F: Magnetisk kraft i pounds
- B_x : Magnetisk flukstetthet i punktet x i kilogauss
- A: Tversnittsareal til magnetisk pol i kvadrattommer
- X: Avstand mellom magnet og materialet i tommer

Denne formelen er basert på en forenklet modell, så avvik fra virkelige verdier forventes. Dersom man ønsker mer eksakte beregninger, vil de være mer komplekse. Faktorer som for eksempel magnetens magnetisering, temperatur og materialet i tankveggen vil da være av betydning. Maksimal holdekraft ved avstanden X=0 estimeres best med formelen [12]:

$$F_{\text{cylindrical}} = 0.58 * B_r^2 * L * \sqrt{A} \quad (5.4)$$

Magnetisk kraft mellom to sylindermagneter, flate sider mot hverandre

Dersom den magnetiske tiltrekningskraften mellom to sylindermagneter skal beregnes, kan man benytte superposisjonsprinsippet i forhold til et tenkt punkt a mellom magnetene:



Figur 26: Beregning av magnetisk tiltrekningskraft, flate sider mot hverandre

Bidraget til den magnetiske flukstettheten i punkt a fra magnet 1 [12]:

$$B_{a1} = \frac{B_{r1}}{2} \left(\frac{(L1+X)}{\sqrt{R1^2+(L1+X)^2}} - \frac{X}{\sqrt{R1^2+X^2}} \right) \quad (5.5)$$

Bidraget til den magnetiske flukstettheten i punkt a fra magnet 2 [12]:

$$B_{a2} = \frac{B_{r2}}{2} \left(\frac{(L2+X)}{\sqrt{R2^2+(L2+X)^2}} - \frac{X}{\sqrt{R2^2+X^2}} \right) \quad (5.6)$$

Dersom magnetene har en ferromagnetisk plate i endene gjelder tilsvarende endring som i formel 5.2. Den totale flukstettheten i punktet a beregnes som [12]:

$$B_a = B_{a1} + B_{a2} \quad (5.7)$$

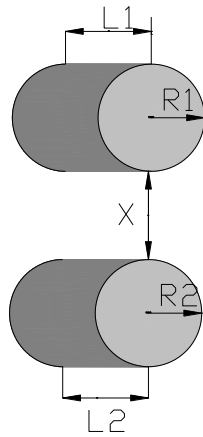
Tiltrekningskraft mellom sylindermagnetene beregnes tilsvarende som for en magnet [12]:

$$F_{\text{cylindrical}} = 0.577 * B_a^2 * A \quad (5.8)$$

B_a :	Magnetisk flukstetthet i punktet a gitt i kilogauss
B_{a1} :	Magnetisk flukstetthet i punktet a, bidrag fra magnet 1
B_{a2} :	Magnetisk flukstetthet i punktet a, bidrag fra magnet 2
B_{r1} :	Magnetmaterialets residual induction for magnet 1
B_{r2} :	Magnetmaterialets residual induction for magnet 2
$L1$:	Lengde magnet 1
$L2$:	Lengde magnet 2
$R1$:	Radius magnet 1
$R2$:	Radius magnet 2

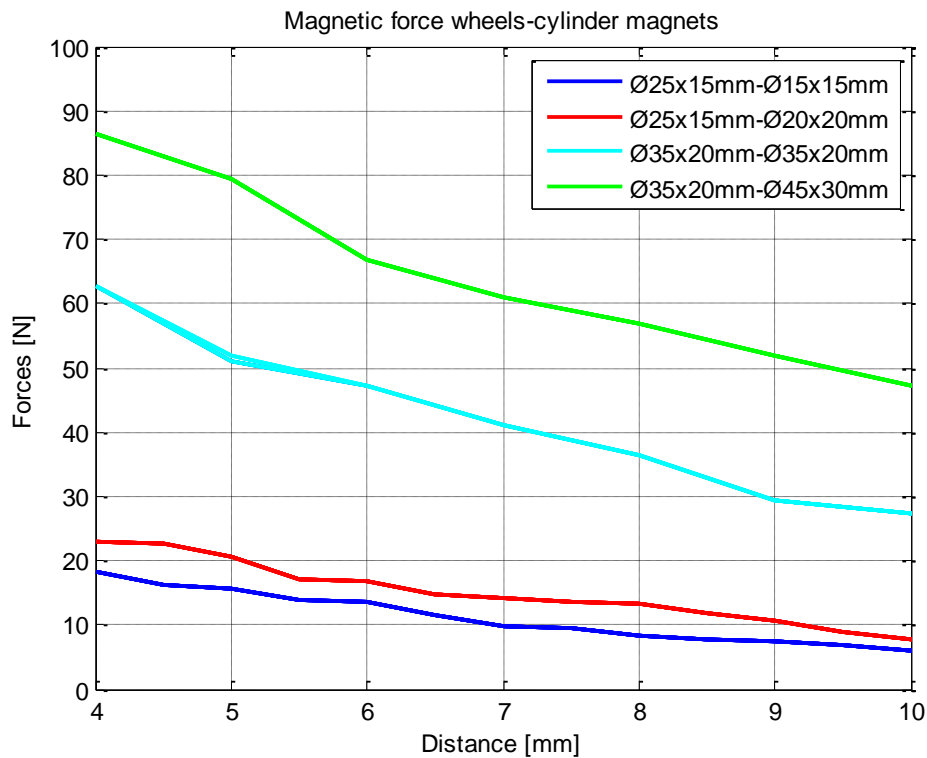
Magnetisk kraft mellom to sylindermagneter, sylindervegger mot hverandre

Det benyttes sylindermagneter med krumme sider mot hverandre i forbindelse med robotens hjul. Dette er større magneter, der magnetenes radius er av betydning for dimensjonering av motorene.



Figur 27: Magnetisk tiltrekningskraft, sylindervegger mot hverandre

Tiltrekningskraft for aktuelle magnetstørrelser ble praktisk testet. Figur 28 viser resultatet av målinger med magneter av fem forskjellige størrelser ved en økende avstand X . Samme metode som vist i kapittel 5.3.3 ble benyttet. Figuren viser at tiltrekningskraften er tilnærmet lineær for det aktuelle området.



Figur 28: Test med sylindermagneter mot hverandre

På roboten har de innkapslede magnetene en avstand på ca 5 mm mellom seg. Det kan forventes feil i de gjennomførte målingene på inntil 20 % på grunn av avvik i måleutstyr og feil i avlesningen.

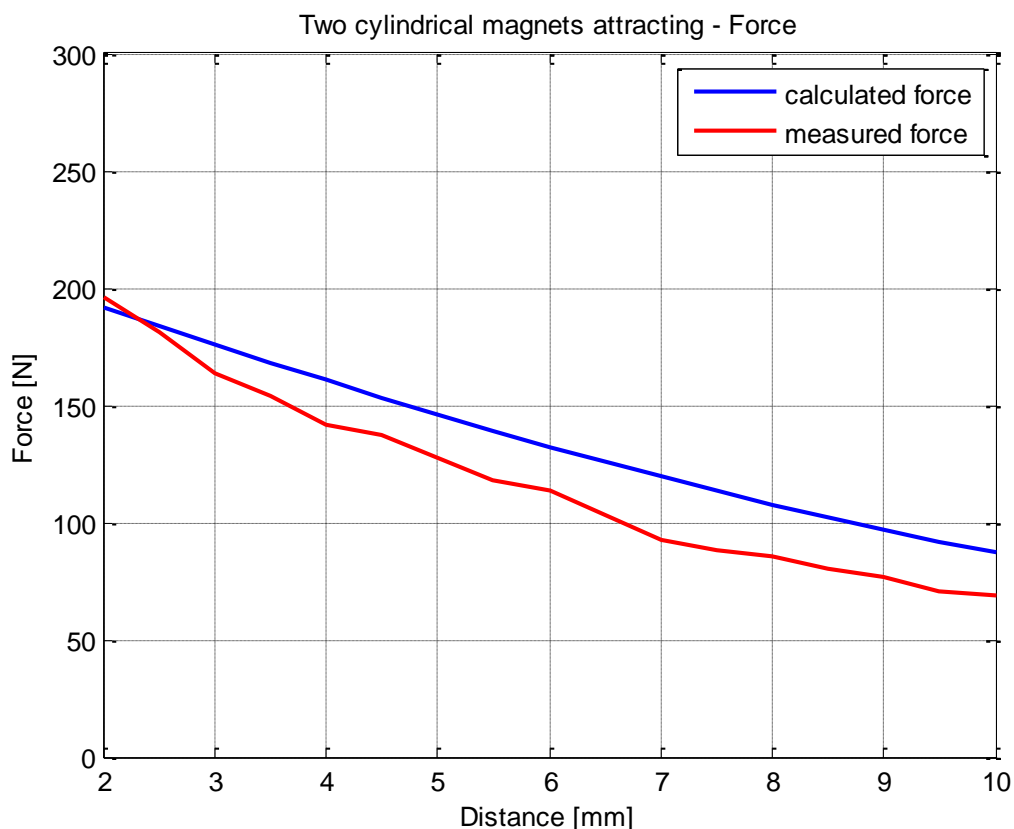
5.3.5 Test av kraftberegningsprogram

Alle formler for magnetisk kraftberegning er basert på matematiske tilnærminger. Dette fordi nøyaktige beregninger av magnetisk fluks nært polene er svært komplekst, og unødvendig i vårt

tilfelle. For å se hvilke avvik man kan forvente fra modellen, ble målinger gjennomført og sammenlignet med de teoretiske resultatene.

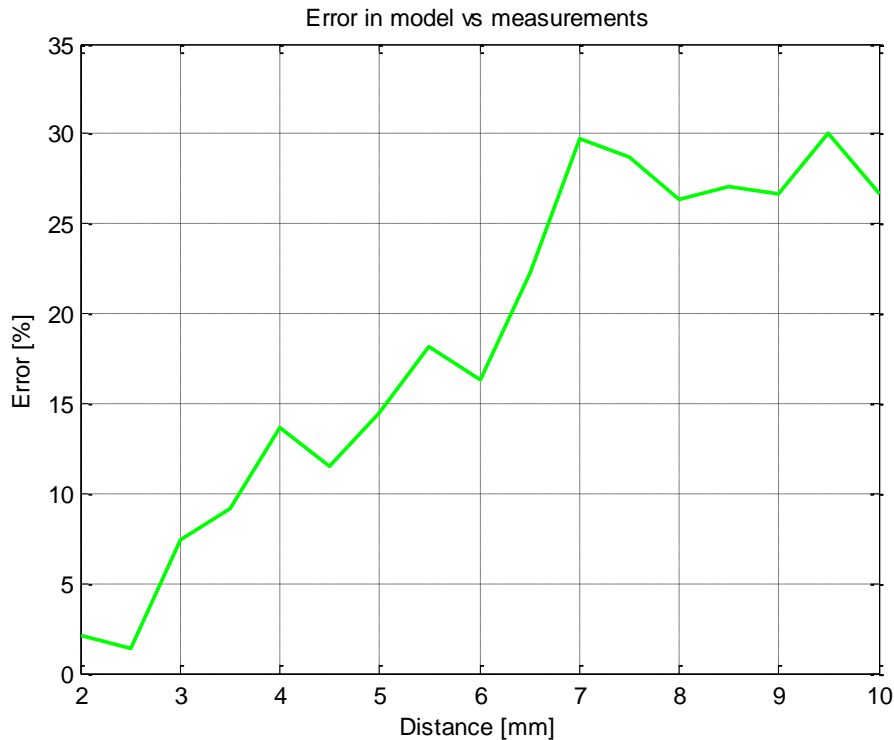
Test - Magnetisk kraft mellom to sylindermagnete, flate sider mot hverandre

To sylindermagneter med diameter 25 mm og lengde 15 mm ble benyttet i en måleserie for beregning av magnetisk tiltrekningskraft. Magnetenes flate sider ble plassert mot hverandre, med en varierende avstand mellom. Den digitale vekten ble benyttet for avlesning av maksimal magnetisk holdekraft. Figur 29 viser et plott av både beregnet kraft og målt kraft ved en avstand fra 2 mm til 10 mm for de to sylindermagnetene. Vi ser at kurvenes stigning er ganske like. Den beregnede magnetiske kraften er noe høyere enn den målte kraften for nesten hele området.



Figur 29: Magnetisk kraft avhengig av avstanden

Figur 30 viser avviket mellom målte og beregnede verdier i prosent. Det maksimale avviket er på ca 35 N. Dette tilsvarer ca 30 % ved avstanden 7 mm.



Figur 30: Feil mellom modell og målinger ved økende avstand

Diskusjon

Tester viser at det er betydelige avvik mellom beregnede og virkelige verdier for magnetiske krefter. Dette kommer trolig av både unøyaktighet i vekt, målefeil og avvik i modellen. Målingene viser at avvik opptil 30 % kan forventes. Det utviklede kraftberegningsprogrammet er likevel til stor nytte i prototypingsfasen. Typisk har man nytte av å se forskjellen ved endring av sylindermagnetenes lengde eller diameter under test.

Kraftberegninger med rektangulære magneter og ringmagneter ble også implementert i kraftberegningsprogrammet. Dette er ikke beskrevet i rapporten, da det ikke ble nyttiggjort i prosjektet. Magnetiske krefter på grunn av flere magneter innen kort avstand på roboten (typisk på samme side av tankveggen) er neglisjert i de benyttede modellene.

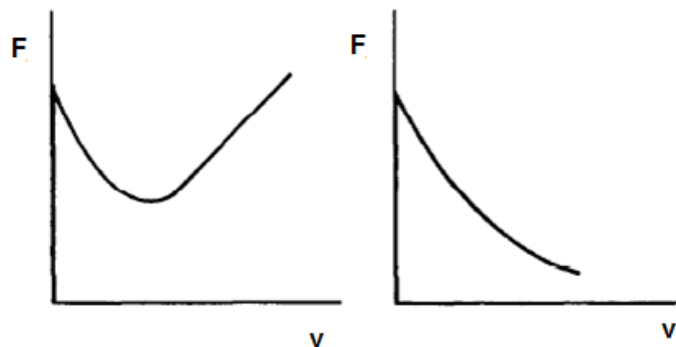
5.4 Friksjon

Valgt konsept for roboten baserer seg på at den både skal henge fast på en vertikal eller horisontal tankvegg og kunne bevege seg fritt. For at dette skal være mulig kreves riktig friksjon mellom tankveggen og utstyret.

Det finnes mange modeller for å beskrive friksjonskraften mellom to overflater. Enkelte modeller baserer seg på enkle teoretiske tilnærminger, andre er mer avanserte modeller basert på praktiske tester og kurvetilpasninger. I praksis er friksjon svært komplekst, og avhenger av en rekke faktorer [13]. Dette er typisk:

- Materialenes geometri
- Materialenes egenskaper
- Forflytning
- Relativ hastighet
- Smøremidler og fuktighet
- Temperatur

Hvordan friksjonskraften anghenger av den relative hastigheten, kan beskrives i en statisk friksjonsmodell[13]. Figur 31 viser mulige sammenhenger mellom friksjonskraften F og den relative hastigheten v for to ulike materialer [14].



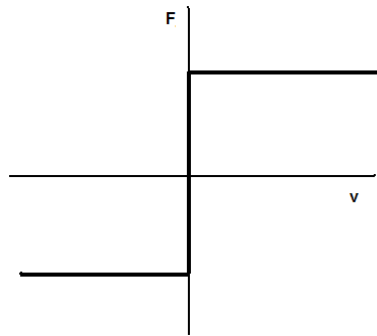
Figur 31: To forskjellige mulige sammenhenger mellom friksjonskraften og den relative hastigheten

5.4.1 Valg av modell

Etttersom vår robot skal operere med en svært lav hastighet, er en hastighetsavhengig modell i praksis overflødig i våre beregninger. En begrunnelse er at friksjonsberegningene er unøyaktige, og dimensjoneringen bør skje med god sikkerhetsmargin. Det er worst-case tilfeller av friksjonen det bør dimensjoneres på grunnlag av. Av området omkring $v=0$ i figuren over, ser vi at dette er den statiske friksjonen dersom friksjonen er uønsket. Valgt friksjonsmodell i beregningene er derfor den enkle Coulomb's friksjonsmodell [13].

Coulomb's friksjonsmodell:

I denne modellen er friksjonskraften uavhengig av den relative hastighetens størrelse, og antas å være proporsjonal med normalkraften på overflatene og en friksjonskoeffisient μ .



Figur 32: Coulomb's friksjonsmodell

Friksjonskraften beregnes som:

$$F_{friction} = \mu * N * \text{sgn}(v) \quad (5.9)$$

N : *Normalkraften på materialene*

Temperaturavhengighet

Friksjonen mellom to overflater er avhengig av temperaturen. Avhengigheten er spesielt stor for gummi. Dette er neglisjert i benyttet modell, og i alle beregninger. Målinger er gjort ved realistiske temperaturer, og temperaturavhengigheten er vurdert som et lite avik i forhold til alle andre usikkerhetsmomentene.

Fuktighet

Friksjonskoeffisienten mellom gummi og fuktige overflater ved lave hastigheter er typisk 20 % - 30 % lavere enn for tilsvarende tørre overflater [15]. Dette kommer av at vannet fyller ujevnhetene i materialene, og danner en glatt hinne. Forskjeller mellom vått og tørt gjelder også for andre materialer enn gummi. Dette bør det tas hensyn til, ettersom man kan risikere at roboten skal kjøre på en tank som er tørr på innsiden eller fuktig på utsiden. På tankens innside fører vannet til at renseren blir lettere, mens fuktighet på tankens utside fører til dårligere grep for roboten. En annen viktig faktor som påvirker friksjonen er smuss og skitt. Det er ikke til å unngå at urenheter fester seg på robotens dekk og reduserer grepet.

5.4.2 Praktiske tester

Det er ønskelig å finne realistiske friksjonskoeffisienter mellom utvendig tankvegg og robot, og mellom innvendig tankvegg og rensepute. Ettersom dette blant annet avhenger av tankens ruhet og overflatebehandling, finnes det ikke noen gode estimat for dette. Løsningen ble derfor å gjøre praktiske målinger på tanken.

Målingene ble gjort ved å feste et metallstykke med en kjent masse til materialet som skulle friksjonstestes. Avlesning av den maksimale trekkraften før slipp ble gjennomført. Det ble benyttet et metallstykke med en masse på 1,50 kg. Fuktighet mellom materialene ble simulert ved å spraye vann på overflatene før måling.

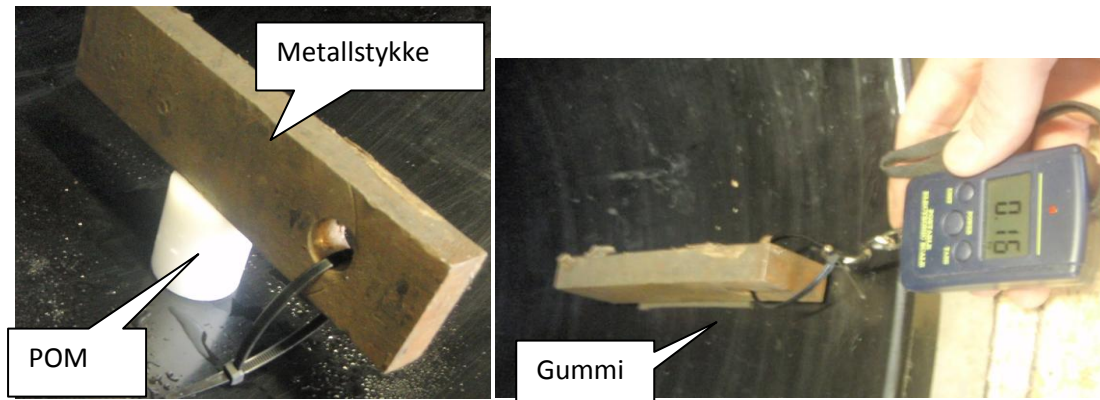
Friksjonskoeffisienten ble for hver måling beregnet med følgende formel [13]:

$$\mu = \frac{F_{friction}}{N} \quad (5.10)$$

$F_{friction}$: Friksjonskraften
 μ : Friksjonskoeffisient
 v : Relativ hastighetsvektor

5.4.3 Friksjon mot tankens innside

Friksjonskoeffisienter mot tankens innside ble funnet for forskjellige materialer av gummi og for POM. Både for vått og tørt underlag viste det seg at POM har lavest friksjonskoeffisient. Tabell 2 viser resultatet av målingene.



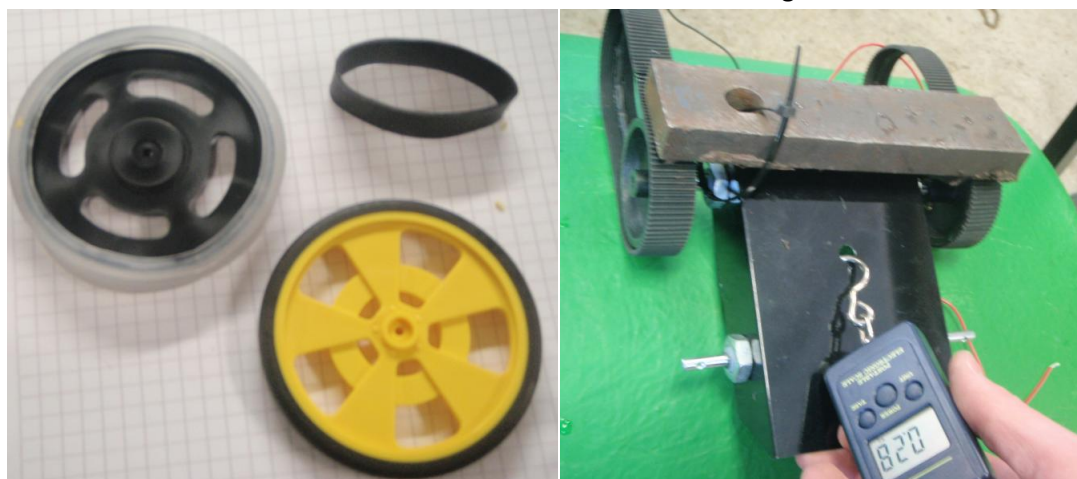
Figur 33: Praktiske friksjonstester mot tankens innside

Tabell 2: Friksjonskoeffisienter mot tankens innside

Materiale	Fuktighet	Friksjonskoeffisient, μ
Myk gummi(EPDM), ca 30x110mm	tørt	1,03
Myk gummi(EPDM), ca 30x110mm	vått	0,73
Hard gummi, ca 30x110mm	tørt	0,80
Hard gummi, ca 30x110mm	vått	0,73
Pom, \varnothing 30mm	tørt	0,11
Pom, \varnothing 30mm	vått	0,08

5.4.4 Friksjon mot tankens utside

Friksjonen mot tankens utside ble målt på tilsvarende vis, men for forskjellige gummihjul og belter. I Tabell 3 er resultatene vist. Gummi fra en bordtennisracket ble også testet.



Figur 34: Praktiske friksjonstester mot tankens utside

Tabell 3: Friksjonskoeffisienter mot tankens utside

Materiale	Fuktighet	Friksjonskoeffisient, μ
Belte, myk gummi	tørt	0,70
Belte, myk gummi	vått	0,40
Gummihjul, hard gummi	tørt	0,70
Gummihjul, hard gummi	vått	0,45
Gummihjul, myk gummi	tørt	0,83
Gummihjul, myk gummi	vått	0,45
Gummihjul, ekstra myk gummi	tørt	1,03
Gummihjul, ekstra myk gummi	vått	0,50
Gummi, bordtennisracket	tørt	1,00

5.4.5 Diskusjon

Nøyaktighet

De gjennomførte friksjonstestene har en rekke usikkerhetsmomenter og feilkilder. De viktigste feilkildene er:

- Rengjøring av flater utgjør en stor forskjell mellom målingene. I praksis vil ikke flatene være rengjorte til enhver tid.
- Benyttet vekt har ingen oppgitt nøyaktighet. Den har ikke blitt kalibrert, og kan forventes å ha en feilmåling på ca 5-10 %.
- Avlesning av vekten ble gjort manuelt. Det er et bidrag til feil. Vurdering av når materialene mister grepet er upresist.
- Dersom vekten ikke trekkes parallelt med overflaten, vil man få feil i friksjonsmålingene.
- Metallstykkets masse ble målt med en digital vekt. Denne kan også forventes å ha et avvik på opp mot 5 %.
- Hvor mye vann som ble tilført for simulering av fuktige overflater er forskjellig mellom alle tester. Det er et bidrag til feil.
- Materialenes størrelser og geometri er forskjellige fra det virkelige systemet.

Realistiske verdier

Friksjonstestene gir en god pekepinn på realistiske verdier som man kan forvente. Høyere friksjonskoeffisienter mot tankens utside kan trolig oppnås dersom det benyttes enda mykere gummi eller klister. Dette er i praksis en dårlig løsning, da friksjonen vil reduseres etter hvert som hjulene slites. Realistiske friksjonskoeffisienter mellom robotens hjul og tankens utside kan derfor forventes å være:

- Tørt, ca 0,80
- Vått, ca 0,45

Mot tankens innside er det ønskelig å holde friksjonen så lav som mulig. Dersom friksjonen mellom roboten og tankens utside ikke er større enn friksjonen på tankens innside, vil det være umulig for roboten å bevege seg.

Testene viser at harde materialer som POM vil fungere best. Fordelen med dette materialet er at det ikke avgir farlige stoffer til vannet, slik enkelte gummityper gjør. Dersom man benytter materialet

teflon, kan man oppnå friksjonskoeffisienter ned mot 0,04 [16]. Dersom POM benyttes for kontaktpunkter, er realistiske friksjonskoeffisienter mellom rensere og tankens innside:

- Tørt, ca 0,11
- Vått, ca 0,08

Friksjonen mot innsiden vil i praksis være noe større dersom avfalsstoffer har grodd fast mot tankens innside. Dette er det ikke gjort målinger på. Med alle de gitte usikkerhetsmomentene og feilkildene omkring friksjonsmålingene, bør dimensjoneringen av magnetiske krefter skje med en god sikkerhetsmargin.

5.5 Krefter på robot

Som et hjelpemiddel for dimensjonering av magneter for robotsystemet, ble det laget et simuleringsprogram i MATLAB. Simuleringsprogrammet *robot_forces.m* er vedlagt i rapportens vedlegg D.

Programmet benytter en forenklet modell av systemet, og plotter krefter som funksjon tankbunnen/tankveggs vinkel i forhold til det vertikale plan. Verdier som man kan spesifisere og endre er:

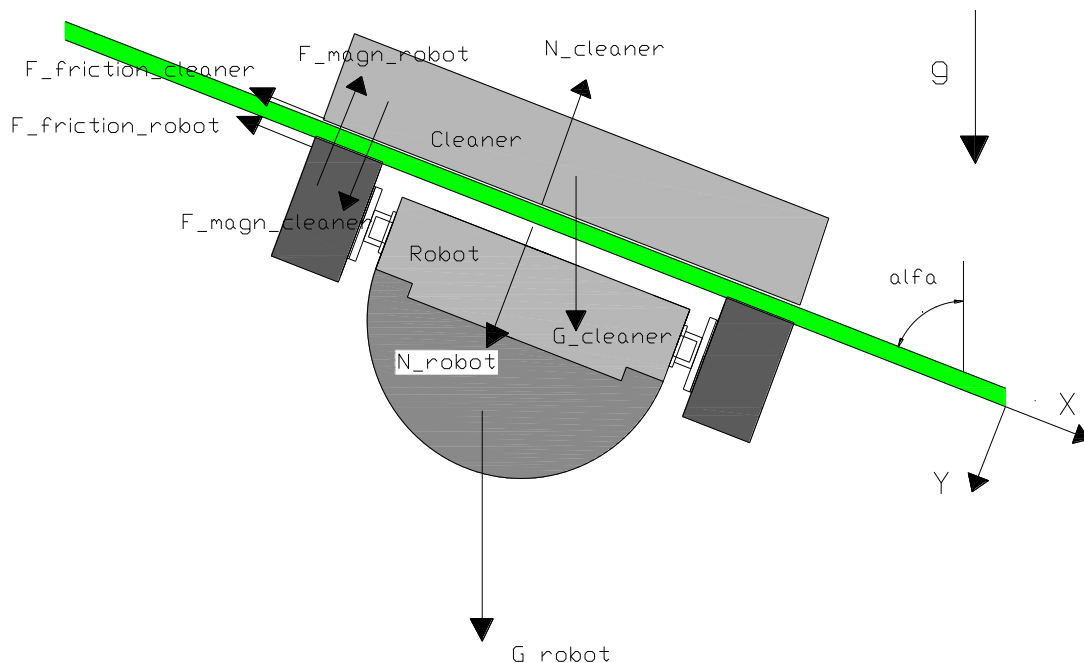
- Robotens masse
- Renserens masse
- Friksjonskoeffisient mellom robotens hjul og tankens utside
- Friksjonskoeffisient mellom renser og tankens innside
- Magnetisk kraft mellom robot og renser

5.5.1 Forenklet modell med to hjul

I den forenklete modellen, antar man at roboten kun har to hjul i kontakt med tankens utside. Renseren på tankens innside antas å være et stivt legeme med en valgt friksjonskoeffisient. Figur 35 viser aktuelle krefter på den forenklete modellen.

Robotens retning horisontalt på tanken:

Figur 35 viser aktuelle krefter når roboten er plassert med fronten pekende i horisontal retning på tanken og ingen bevegelse skjer. Dette er typisk plassering for roboten under rens av tankvegg eller tankbunn.



Figur 35: Krefter på robot pekende horisontalt

g :	Gravitasjonsfeltet
α :	Vinkel til tankvegg i forhold til vertikalen
G_{robot} :	Gravitasjonskraften på roboten
$G_{cleaner}$:	Gravitasjonskraften på renseren
N_{robot} :	Normalkraften fra tankveggen på roboten
$N_{cleaner}$:	Normalkraften fra tankveggen på renseren
$F_{friction_{robot}}$:	Friksjonskraften mellom robotens hjul og tanken
$F_{friction_{cleaner}}$:	Friksjonskraften mellom renseren og tanken
$F_{magn_{robot}}$:	Magnetisk kraft fra renser på robot
$F_{magn_{cleaner}}$:	Magnetisk kraft fra robot på renser

Forenklinger

Modellen har en rekke forenklinger i forhold til den virkelige roboten. Disse forenklingene er gjort ettersom det er mange usikkerheter i modellen, og det er ønskelig at modellen er enkel og oversiktlig. Viktige bidrag som er utelatt fra modellen er:

- Krefter på grunn av at robotens hastighetsvektor forover er utelatt for horisontal modell. I praksis vil bidraget føre til at vektoren for friksjonskraften fra renseren og roboten er rettet på skrå bakover.
- Ekstra friksjon og endring i magnetstyrke ved bevegelse mellom tankvegg og tankbunn er betydelig, men utelatt fra modellen.
- Varierende tykkelse på tankveggen fører til endring i magnetisk styrke.
- Friksjon mellom robot og tankvegg utvendig er neglisjert. Den avhenger av robotdesignet, og er av betydning på dagens prototype.
- Ekstra friksjon på grunn av begrodd tank antas å være ubetydelig.
- Momentbidrag fra en roterende renser på robot er neglisjert (kapittel 5.7.1).
- Oppdriftskrefter på renseenheten i vannet neglisjeres.
- Den magnetiske koblingen mellom robot og renser antas å være konstant. Dette gjelder både i x- og y-retning.

Viktige hensyn

Følgende forhold bør det tas hensyn til under dimensjonering av magnetiske krefter:

- Friksjonskoeffisient mellom hjul og tank ved fuktig tank er lavere enn ved tørr tank.
- Friksjonskoeffisient innvendig i tørr eller begrodd tank er større enn ved våt og ren tank.

Vinkel alfa mellom vertikalt plan og tankvegg

Vinkelen alfa vil i praksis ha en bestemt verdi for tankveggen og en for tankbunnen. Disse er gitt av tankens utforming. For de aktuelle forsøktankene er alfa lik 3° for tankveggen og 69° for tankbunnen.

Krefter ved retning horisontalt på tanken

Kreftene på Figur 35 har følgende størrelsesorden:

$$|F_{magn_{robot}}| = |F_{magn_{cleaner}}| = F_{magn} \quad (5.11)$$

$$G_{robot} = m_{robot} * g \quad (5.12)$$

$$G_{cleaner} = m_{cleaner} * g \quad (5.13)$$

Krefter i y-retning:

$$G_{y_{robot}} = G_{robot} * \sin(\text{alfa}) \quad (5.14)$$

$$G_{y_{cleaner}} = G_{cleaner} * \sin(\text{alfa}) \quad (5.15)$$

$$N_{robot} = F_{magn} - G_{y_{robot}} \quad (5.16)$$

$$N_{cleaner} = F_{magn} + G_{y_{robot}} \quad (5.17)$$

Kraftbalanse i y-retning:

$$\sum F_y = N_{robot} + G_{y_{robot}} + G_{y_{cleaner}} - N_{cleaner} = 0 \quad (5.18)$$

Krefter i x-retning:

$$G_{x_{robot}} = G_{robot} * \cos(\text{alfa}) \quad (5.19)$$

$$G_{x_{cleaner}} = G_{cleaner} * \cos(\text{alfa}) \quad (5.20)$$

$$F_{\text{friction robot max}} = N_{robot} * \mu_{robot} \quad (5.21)$$

$$F_{\text{friction cleaner}} = N_{cleaner} * \mu_{cleaner} \quad (5.22)$$

Kraftbalanse i x-retning:

$$\sum F_x = G_{x_{robot}} + G_{x_{cleaner}} - F_{\text{friction robot}} - F_{\text{friction cleaner}} = 0 \quad (5.23)$$

Finner dermed følgende uttrykk for den aktuelle friksjonskraften mellom hjul og tankvegg:

$$F_{\text{friction robot}} = G_{x_{robot}} + G_{x_{cleaner}} - F_{\text{friction cleaner}} \quad (5.24)$$

$\mu_{cleaner}$:	<i>Friksjonskoeffisient mellom rensepute og tank</i>
μ_{robot} :	<i>Friksjonskoeffisient mellom robot og tank</i>
$G_{x_{robot}}$:	<i>Gravitasjonskraften på roboten dekomponert i x – retning</i>
$G_{y_{robot}}$:	<i>Gravitasjonskraften på roboten dekomponert i y – retning</i>
$G_{x_{cleaner}}$:	<i>Gravitasjonskraften på renseputen dekomponert i x – retning</i>
$G_{y_{cleaner}}$:	<i>Gravitasjonskraften på renseputen dekomponert i y – retning</i>
$m_{cleaner}$:	<i>Renseputens masse</i>
m_{robot} :	<i>Robotens masse</i>
$F_{\text{friction robot}}$:	<i>Aktuell friksjonskraft mellom robotens hjul og tankens utside</i>
$F_{\text{friction robot max}}$:	<i>Maksimal friksjonskraft mellom robotens hjul og tankens utside</i>

Figur 36 viser et eksempel på et plott av kraften $F_{\text{friction robot}}$ og den maksimale $F_{\text{friction robot max}}$. Sikkerhetsmarginen F_{safety} blir her avstanden mellom de to grafene:

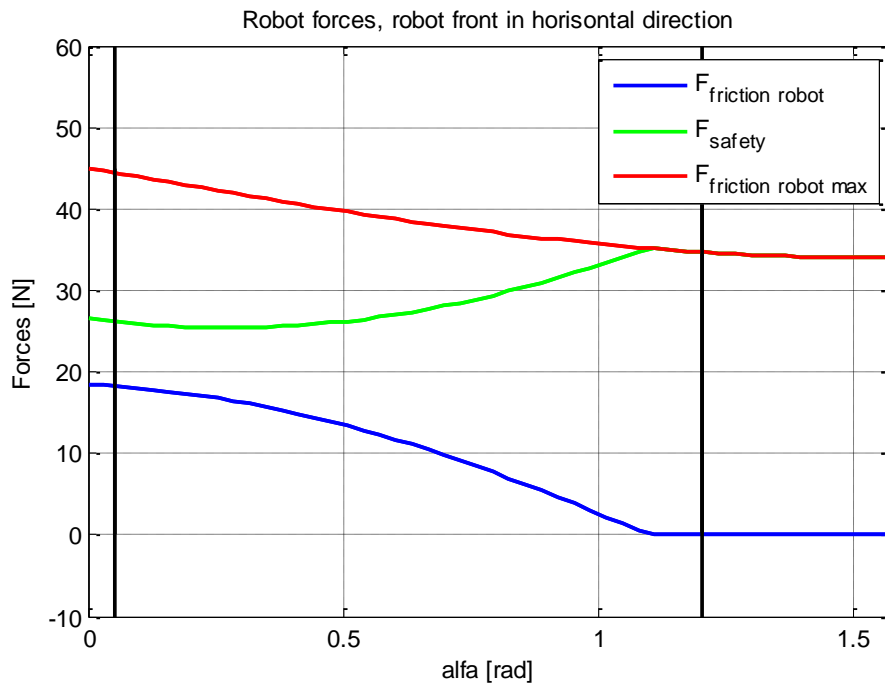
$$F_{\text{safety}} = F_{\text{friction robot max}} - F_{\text{friction robot}} \quad (5.25)$$

Dersom F_{safety} er mindre eller lik null, betyr dette i praksis at roboten ikke holdes fast, men glir ned tankveggen. De to sorte strekene viser vinklene alfa for tankveggen (3°) og tankbunnen (69°).
 Aktuell område for roboten er derfor området mellom disse to vinklene.

Innsatte verdier for systemet er her følgende:

$$m_{\text{robot}} = 2,0\text{kg} \quad m_{\text{cleaner}} = 0,5\text{ kg} \quad \mu_{\text{cleaner}} = 0,11 \quad \mu_{\text{robot}} = 0,45 \quad F_{\text{magn}} = 100\text{N}$$

I forhold til robotens masse er magnetene her dimensjonert slik at roboten ikke kan løsne fra rensere på innsiden.

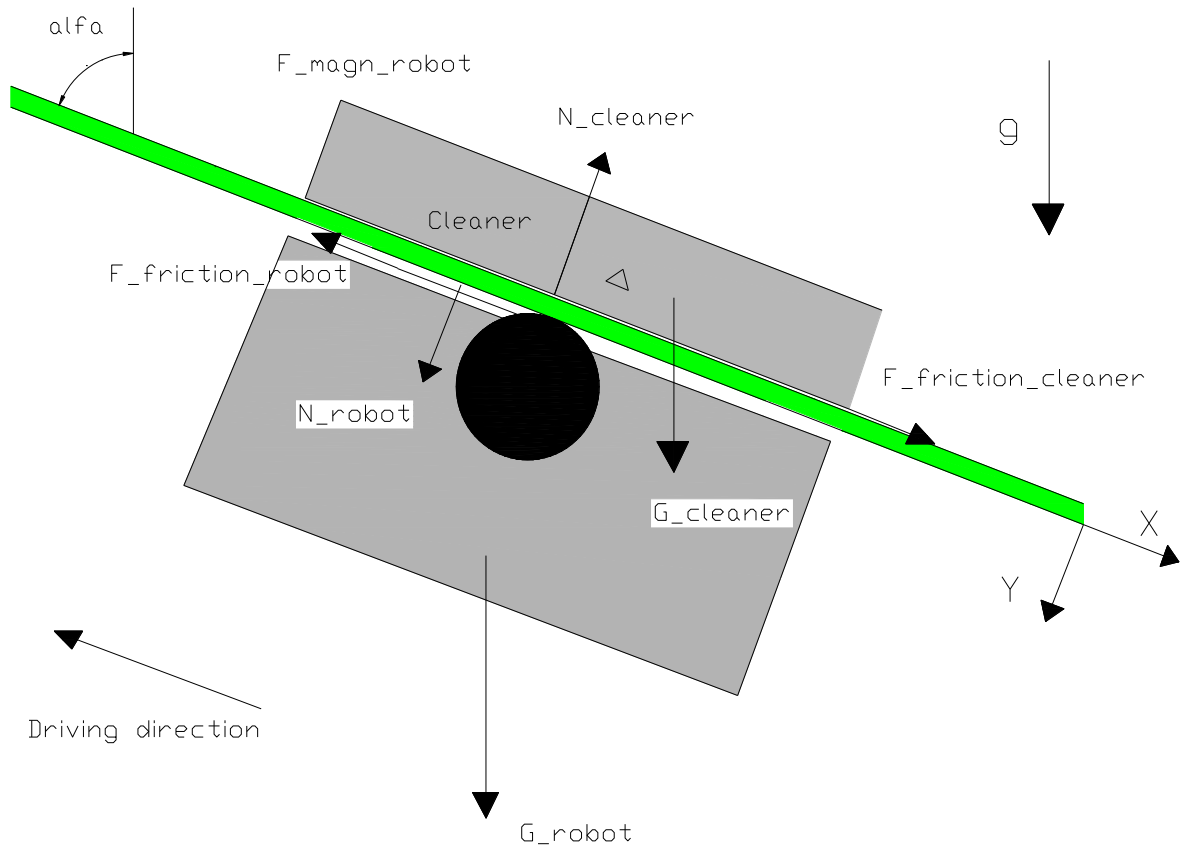


Figur 36: Plott av krefter ved stillestående robot horisontalt rettet

Av funksjonen F_{safety} ser vi at største utfordring med å holde roboten fast på tankveggen der alfa er liten (ca $0,3$ rad).

Krefter ved kjøring vertikalt oppover på tanken

Figur 37 viser kreftene når roboten kjører vertikalt oppover på tanken. Dette er typisk tilfelle etter endt renseprosess, og roboten skal bevege seg fra bunnen mot toppen av tankveggen.



Figur 37: Krefter på robot ved kjøring vertikalt

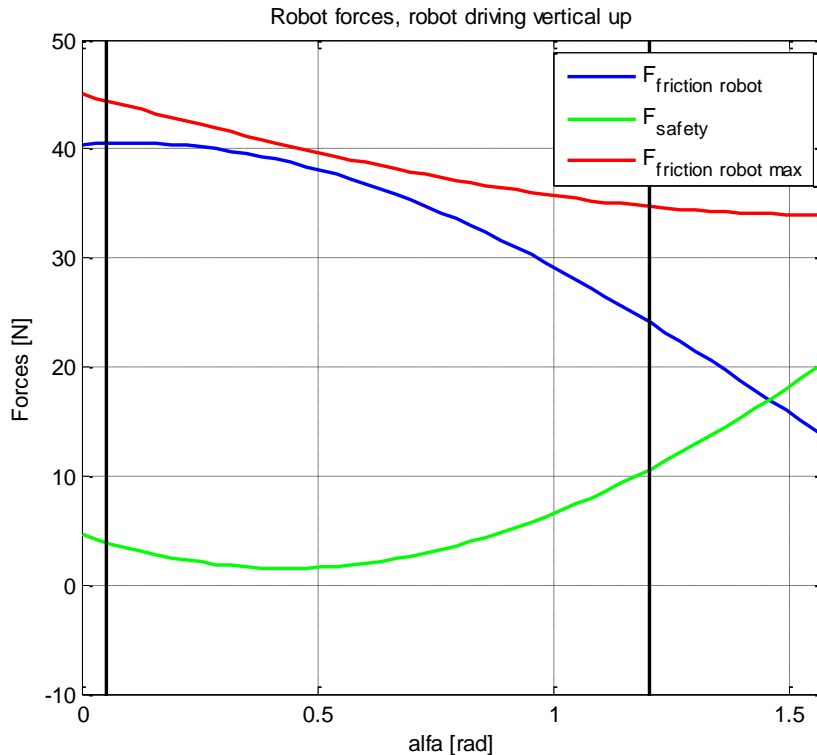
Uttrykket for friksjonskraften mellom hjul og tankvegg blir nå følgende:

$$F_{\text{friction robot}} = G_{x\text{robot}} + G_{x\text{cleaner}} + F_{\text{friction cleaner}} \quad (5.26)$$

Vi ser at leddet $F_{\text{friction cleaner}}$ nå har endret fortegn. Dette kommer av at friksjonskraften fra renseren nå virker mot kjøretretningen, da den slepes etter farkosten.

Dette betyr at i praksis at roboten trenger bedre grep på hjulene ved kjøring oppover tankveggen enn når den står i ro. Det er dette som er worst-case for roboten dersom man ser bort fra overgangen mellom tankvegg og tankbunn.

Figur 37 viser tilsvarende krefter som Figur 36, men ved kjøring vertikalt oppover tanken.



Figur 38: Plott av krefter ved robot kjørende vertikalt oppover

Vi ser at sikkerhetsmarginen er betydelig mindre i vertikal retning. I praksis vil ikke dette fungere for overgangen mellom tankbunn og tankvegg. Ved en vinkel alfa på ca 0,4 rad er her sikkerhetsmarginen på sitt minimale. Denne vinkelen passerer når roboten skal kjøre vertikalt fra tankbunnen til tankveggen.

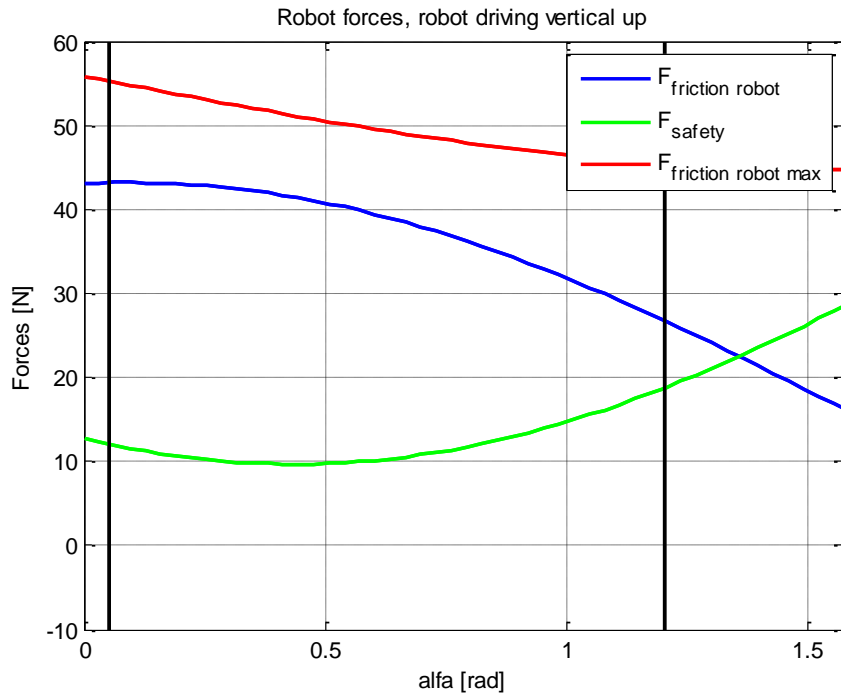
Vi kan konkludere med at de aktuelle verdiene ikke gjør bevegelse mellom tankbunnen og tankveggen mulig. Den magnetiske kraften bør derfor økes.

Verdier for dagens prototype

På dagens prototype benyttes sylindermagneter med en diameter på 35 mm og med lengde 20 mm for hvert hjul. Av Figur 28 leser det av en magnetisk kraft på ca 62 N ved aktuell avstand 4 mm for magneter uten innkapsling. Insatte verdier blir dermed:

$$m_{robot} = 2,0\text{kg} \quad m_{cleaner} = 0,5\text{kg} \quad \mu_{cleaner} = 0,11 \quad \mu_{robot} = 0,45 \quad F_{magn} = 124\text{N}$$

Figur 39 viser aktuelle verdier for dagens prototype. Sikkerhetsmarginen er her høyere, og dette er nødvendig for praktisk bruk.



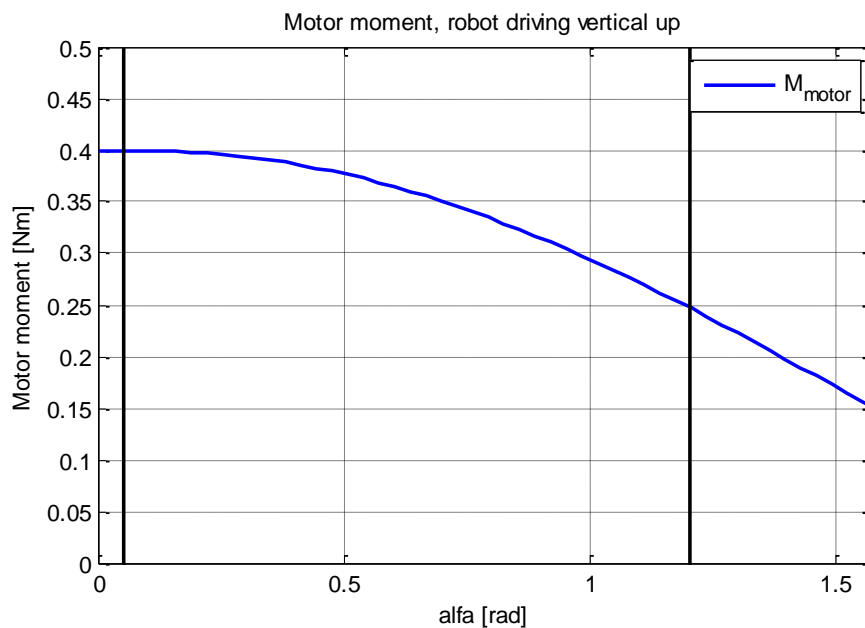
Figur 39: Plott av krefter ved robot kjørende vertikalt oppover for dagens prototype

Motorenes moment

Basert på den forenklede modellen kan også nødvendig moment på hver av de to drivende motorene beregnes:

$$M_{motor} = \frac{\frac{D_{wheel} * F_{friction robot}}{2}}{2} \quad (5.27)$$

D_{wheel} : Robothjulenes diameter
 M_{motor} : Moment på hver motor



Figur 40: Nødvendig motormoment på hver motor

Figur 40 viser at nødvendig motormoment ved valgt oppsett er minimum ca 0,4 Nm. I praksis må dette overdimensjoneres mye, for blant annet å muliggjøre bevegelse mellom tankbunn og tankvegg. Beregningene over er basert på at momentbidragene fra begge motorene er like. I virkeligheten vil disse være forskjellige ved for eksempel sving. Størst motormoment trengs nødvendigvis ved kjøring vertikalt oppover tankveggen. Dette kan ses av figuren over.

Diskusjon

Den viste forenklete modellen har store avvik i forhold til dagens prototype. Det kommer av at renseren som benyttes ikke er en flate mot tankens innside. Et annet viktig bidrag er at det er en betydelig friksjonskraft mellom roboten og utsiden av tanken. Dette blir bedre forklart i påfølgende delkapittel.

Også en del krefter i forbindelse med brosystemet er av praktisk betydning for valg av magneter. Dette påvirker dimensjoneringen, men er utelatt i denne enkle modellen. Modellen benyttes kun som et verktøy.

5.6 Valgte tekniske løsninger for robot

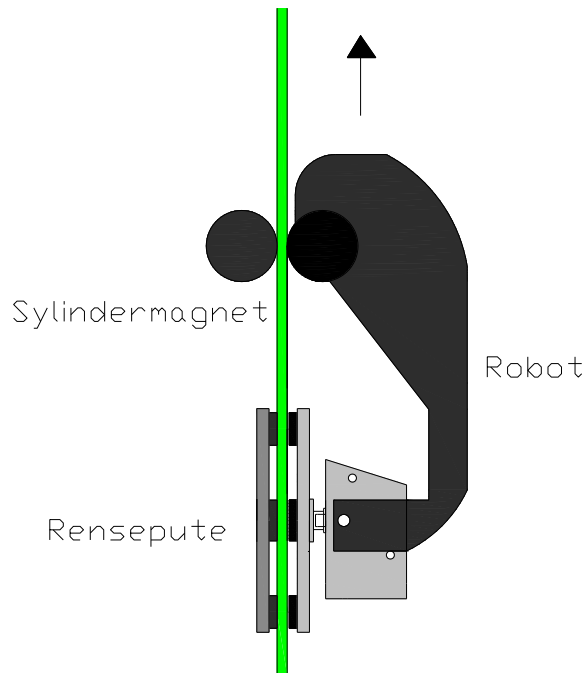
I denne delen forklares de mekaniske løsningene på roboten mer i detalj. De valgte løsningene er nødvendige for at konseptet skal fungere.

5.6.1 Magnet i felg

Ved å benytte permanentmagnet i robotens felger, sikrer man at magneten kommer helt inntil tankveggen. Dette gir en stabil magnetisk kraft som gjør kjøring mellom tankbunn og tankvegg mulig. Ettersom hjulet og magneten er den samme komponenten, blir også mekanikken svært enkel.

5.6.2 Sylindermagneter på tankens innside

Sylindermagneter på tankens innside sikrer stor magnetisk kraft mellom robotens hjul og tanken, som vist på Figur 41. Et hjul gir minimalt med friksjon på tankens innside. Sylindermagnetene kan også enkelt passere det innvendige hjørnet mellom tankbunnen og tankveggen da det ikke har noen skarpe kanter.

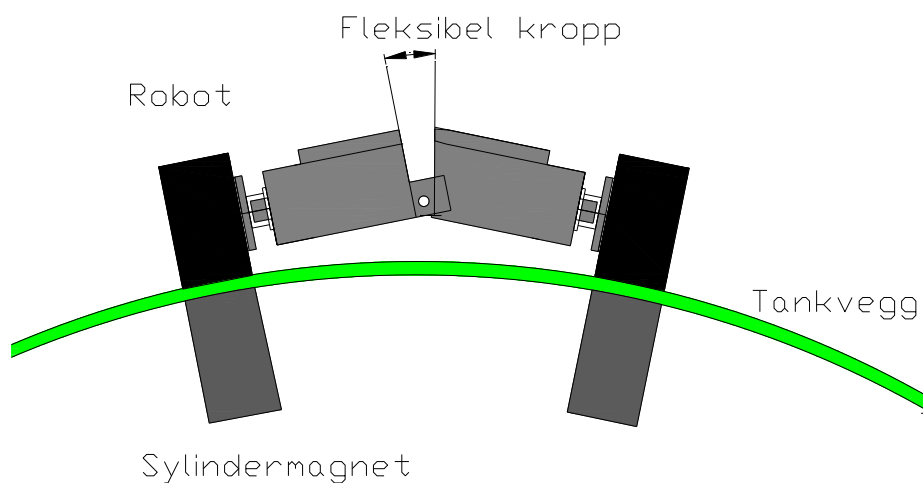


Figur 41: Robot med sylindermagneter på tankens innside

5.6.3 Fleksibel kropp

Ettersom tankens diameter er liten i forhold til robotens sporvidde, vil tankens utside ikke være en plan flate for roboten. Det er derfor nødvendig med en vinkling av hjulene når roboten kjører vertikalt på tanken. Dette er løst ved å lage robotens kropp fleksibel. Et fjærbelastet ledd midt på roboten sikrer at riktig vinkling av hjulene skjer automatisk. Når begge hjulene står normalt på tankens tangent, er man sikret maksimal kraft mellom sylindermagnet og hjul. Belastningen på motorens utgående akse blir da også minimal.

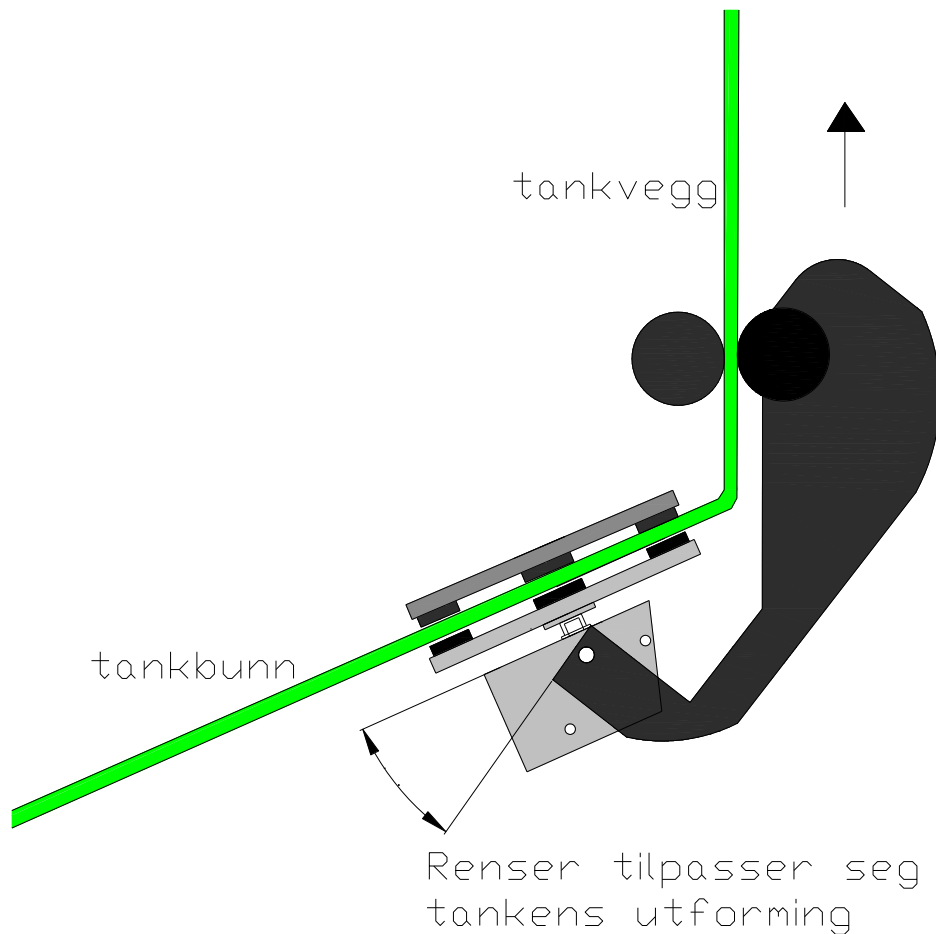
Et annet resultat av den fleksible kroppen er at roboten ikke trenger så stor bakkeklaring mot tanken. Dette kommer av at roboten former seg etter tanken ved hjelp av det fleksible leddet. Mindre bakkeklaring betyr at hjulenes diameter kan reduseres. Da blir momentet på girboksene mindre og omdreiningshastigheten på hjulene kan økes. Dette er gunstig.



Figur 42: Fleksibel kropp

5.6.4 Fleksibel rensen

Ved kjøring mellom tankvegg og tankbunn er det nødvendig at rensen former seg etter tanken. Dette er løst ved at rensen er leddet i forhold til resten av roboten. Dette leddet har mekaniske stoppere som sikrer at rensen ikke vinkles i uønsket retning.

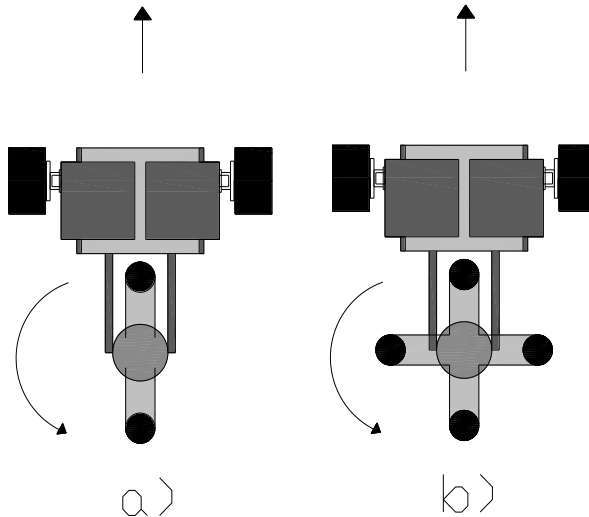


Figur 43: Renseutstyret tilpasser seg tankens utforming

Renseputen er laget av et fleksibelt materiale med magneter i kontaktpunktene. Det sikrer god kontakt mot tanken, og gjør bevegelse mellom tankvegg og tankbunn mulig. Som fleksibelt materiale har gummi (EPDM) blitt benyttet. Dette gjelder både for enheten på innsiden og tilsvarende enhet på utsiden av tanken.

5.7 Valgt løsning for rensesystem

Den roterende rensen består av et antall roterende kontaktpunkter. Figur 44 viser to mulige utforminger av rensen, med to eller fire kontaktpunkter. En stor fordel med bare to punkter, er at rensen ikke kommer i konflikt med sylindermagnetene på innsiden ved robotens bevegelse mellom flere tanker. Dette dersom rensen vinkles som vist på figur a). Kapittel 5.8 forklarer problemet bedre.



Figur 44: Renseren med to eller fire kontaktpunkter

a) To kontaktpunkter

En ulempe med kun to punkter er at renseren må rotere med dobbel vinkelhastigheten i forhold til renseren med fire punkter for å få samme renseseffekt. Dette vil skape mer forstyrrelser i tanken. En annen ulempe er at rensesputens påvirkning på roboten er større. Dette kommer av at roboten får et momentbidrag i yaw som er på formen:

$$M_{yaw} = F * \sin(C) * D_{cleaner} \quad (5.28)$$

M_{yaw} :	Renserens momentbidrag i yaw
$D_{cleaner}$:	Renserens diameter i senter av kontaktpunktene
C :	Renserens vinkel i forhold til aksen y_b
F :	Friksjonskrefter fra hvert av rensersens to kontaktpunkter

Et sinusformet moment på roboten er meget ugunstig, da det gir direkte utslag i robotens retning.

b) Fire kontaktpunkter

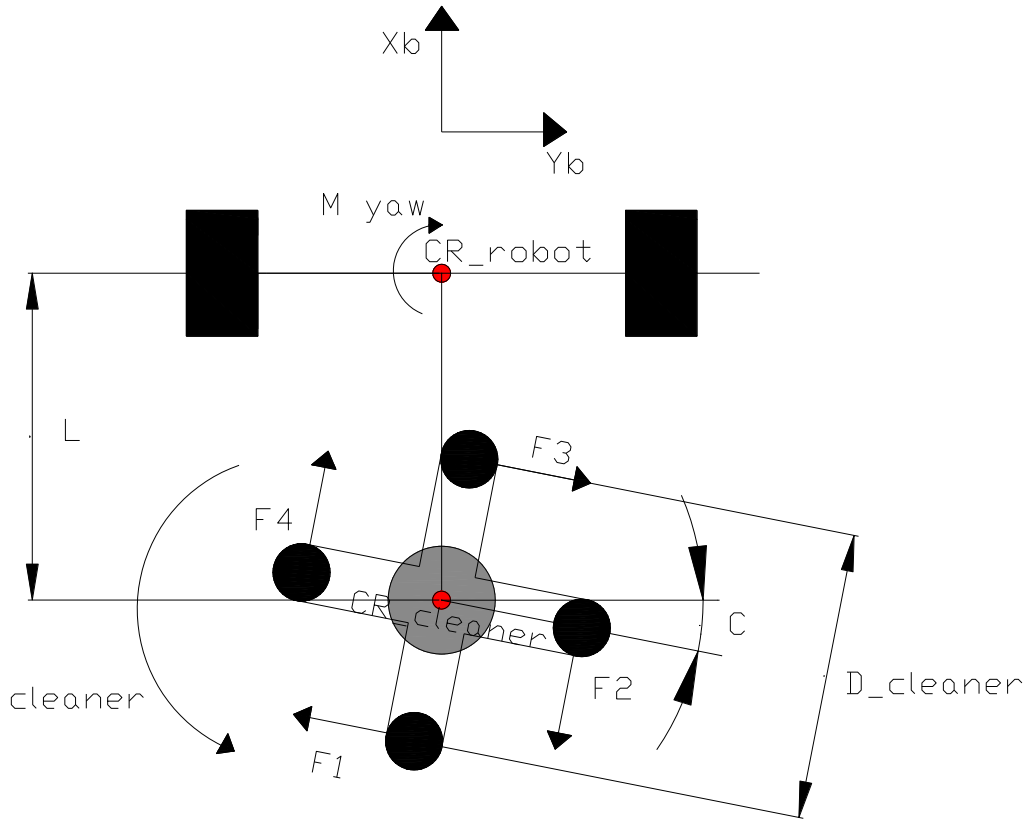
Med fire punkter kan rensesputen rotere med den halve rotasjonshastigheten og fortsatt oppnå samme renseseffekt. Man kan tenke seg at flere enn fire punkter hadde vært bedre. Problemet er at magnetene påvirker hverandre. De må ha en viss avstand mellom seg for ikke å tiltrekkes. Det er også vanskeligere å oppnå samme mekaniske fleksibilitet i rensesputen dersom flere punkter benyttes.

En viktig egenskap med fire punkter, er at rensersens påvirkning på roboten blir et konstant moment i yaw. En konstant forstyrrelse er mye enklere for robotens reguleringsystem enn en sinusformet forstyrrelse. Løsning b) ble derfor valgt.

En magnet i senter av rensesputen er plassert for å oppnå nok kraft mellom robotens bakpart og tanken. Denne er nødvendig for å unngå at robotens bakpart mister festet til tanken ved kjøring ned fra tankveggen til tankbunnen. Det er ønskelig at sentermagneten gir minst mulig friksjon mot tanken, både på innsiden og utsiden.

5.7.1 Renserens påvirkning på robot

Den roterende renseren b) gir et momentbidrag på robotens rotasjonspunkt. Figur 45 viser krefter fra robotens fire resepunkter, og hvordan disse påvirker roboten. Friksjonskrefter på grunn av robotens bevegelse i retning x_b er ikke tatt med i denne modellen.



Figur 45: Renserens påvirkning på robot

CR_{robot} :	Robotens rotasjonssenter
$CR_{cleaner}$:	Renserens rotasjonssenter
X_b :	Førover i robotens body – koordinatsystem
Y_b :	Høyre i robotens body – koordinatsystem
$\vec{F1} - \vec{F4}$:	Krefter fra renserens kontaktpunkter på robot
$\omega_{cleaner}$:	Rotasjonshastighet for renseren
L :	Avstand mellom CR_{robot} og renserens senter

Alle fire resepunktene er like. Dette gir:

$$|\vec{F1}| = |\vec{F2}| = |\vec{F3}| = |\vec{F4}| = F_{cleaner} \quad (5.29)$$

$$\vec{F1} = -\vec{F3} \quad (5.30)$$

$$\vec{F2} = -\vec{F4} \quad (5.31)$$

Krefter i X_b -retning:

$$FX_b = |\vec{F1}| * \sin(C) - |\vec{F3}| * \sin(C) + |\vec{F4}| * \cos(C) - |\vec{F2}| * \cos(C) = 0 \quad (5.32)$$

Krefter i y_b -retning:

$$F_{y_b} = |\vec{F1}| * \cos(C) - |\vec{F3}| * \cos(C) + |\vec{F4}| \sin(C) - |\vec{F2}| \sin(C) = 0 \quad (5.33)$$

Moment på robotens rotasjonscenter:

$$\begin{aligned} M_{yaw} &= |\vec{F1}| * \cos(C) * \cos(C) * \left(L + \frac{D_{cleaner}}{2}\right) - |\vec{F3}| * \cos(C) * \cos(C) * \left(L - \frac{D_{cleaner}}{2}\right) + |\vec{F3}| \\ &\quad * \sin(C) * \sin(C) * \left(L - \frac{D_{cleaner}}{2}\right) - |\vec{F4}| * \sin(C) * \sin(C) * \left(L + \frac{D_{cleaner}}{2}\right) \\ &= F_{cleaner} * \cos^2(C) * D_{cleaner} + F_{cleaner} * \sin^2(C) * D_{cleaner} \\ &= F_{cleaner} * D_{cleaner} \end{aligned} \quad (5.34)$$

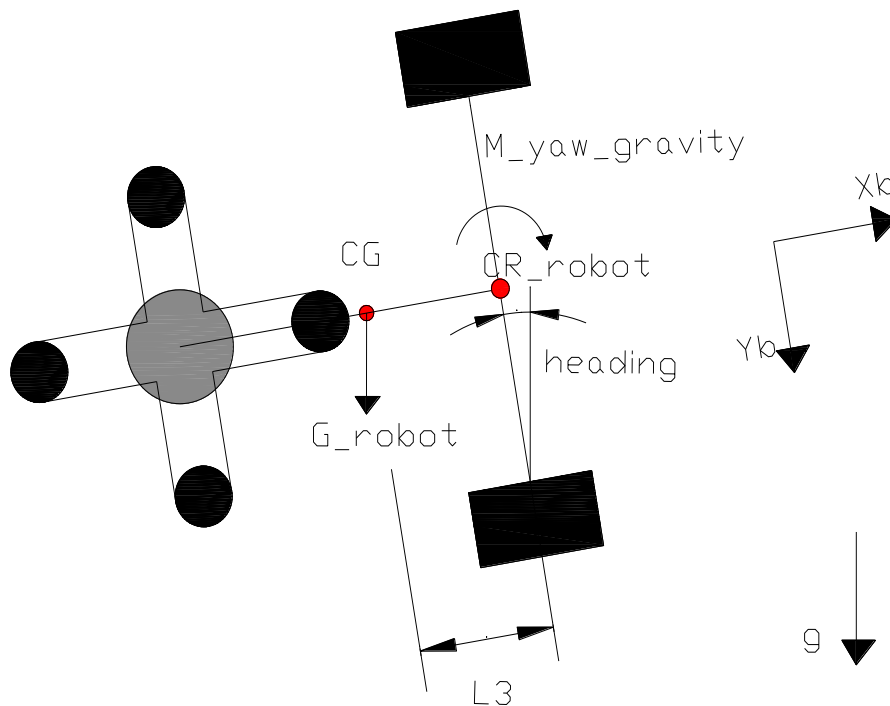
Momentbidraget er konstant og av betydelig størrelse. Ved rensing av tank vil dette tvinge robotens bakpart ned mot bunnen av tanken. Regulatorene bør kompensere bort dette med en foroverkobling eller integralvirkning. Løsningen på dette blir forklart i kapittel 12.5.2.2.

Dersom rensputen ikke roterer vil M_{yaw} være null, mens F_{X_b} vil være i størrelsesorden $4 * F_{cleaner}$. Da blir det tyngre for roboten å bevege seg, ettersom friksjonskraften virker mot kjøreretningen. Fordelen med en roterende renser er at dersom rensputens friksjon endres, påvirkes ikke robotens fremdrift mye på grunn av dette. Friksjonen fra renserens sentermagnet er neglisjert i disse beregningene. Den vil gi et lite bidrag mot rotasjonen og robotens kjøreretning X_b .

5.7.2 Gravitasjonsfeltets påvirkning på robot

På grunn av dens utforming, er robotens massesenter bak robotens rotasjonscenter.

Gravitasjonsfeltet vil derfor tvinge robotens heading mot verdien $\pi/2$ som en pendel. Figur 46 viser en prinsippskisse.



Figur 46: Gravitasjonsfeltets påvirkning på robot

CG: Robotens massesenter

CR_{robot} : Robotens rotasjonssenter
L3: Avstand mellom CR_{robot} og CG

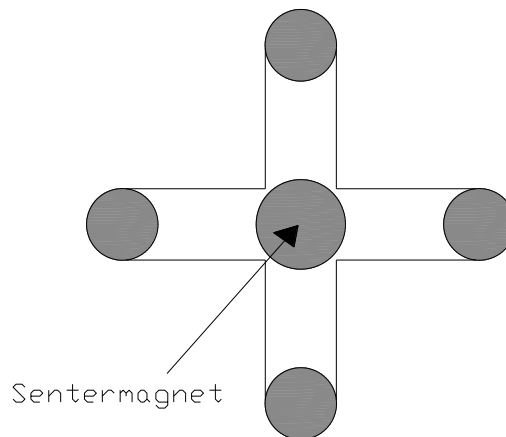
Momentbidraget på robotens rotasjonssenter på grunn av gravitasjonen beregnes slik:

$$M_{yaw\ gravity} = -G_{robot} * \cos(\text{heading}) * L3 \quad (5.35)$$

Alternativt kan man kompensere for bidraget fra gravitasjonsfeltet ved å øke massen foran på roboten. Ulempen med dette er at robotens totale masse vil øke, noe som igjen krever sterkere magnetisk kobling, sterkere motorer, høyere strømforbruk og større batteri. Beregningene viser at både renserens rotasjon og gravitasjonen gir et momentbidrag i samme retning, da avfallet skyves ned på tankveggen.

5.7.3 Magnet i renseputens senter

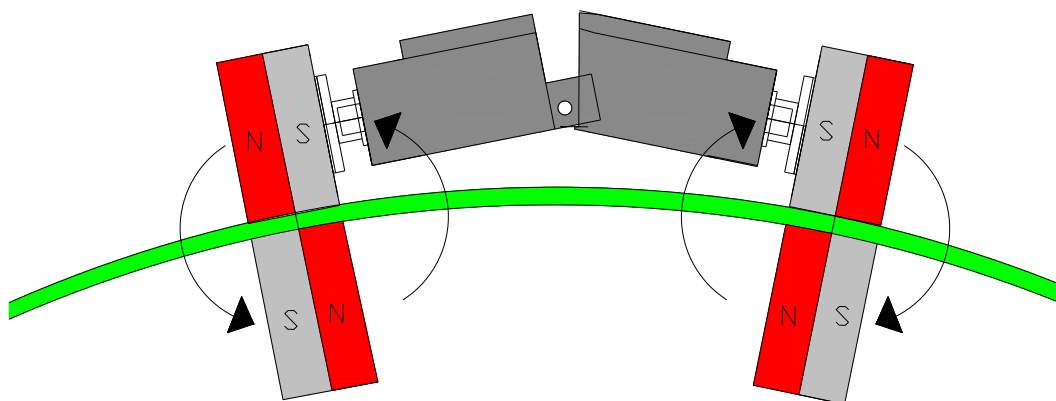
Som nevnt er en magnet plassert i senter av renseputen for å sikre nok kraft mellom robotens bakpart og tankveggen. En annen oppgave den gjør, er å holde renseputen fast mot brosystemet når roboten kjører til neste tank.



Figur 47: Magnet i renseputens senter

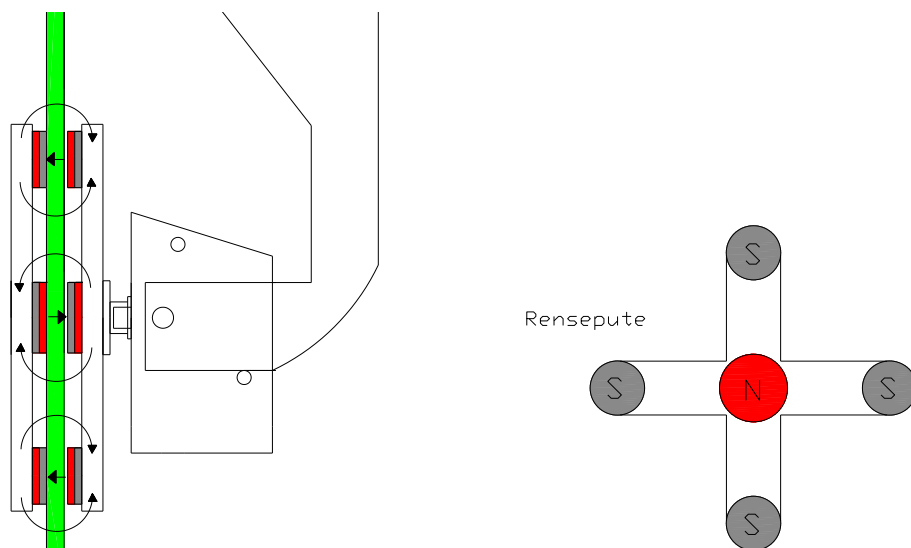
5.7.4 Polplassering

Alle robotens magneter er plassert for å gi størst mulig tiltrekningskraft. For robotens hjul er det viktig at polene er symmetriske om robotens senter. Dette gjør bevegelse mellom tanker mulig, ettersom sylindermagneter på tankens innside får riktig polplassering for begge kjøreretninger.



Figur 48: Polplassering for robotens hjul

For rensesystemet plasseres polene slik at sentermagneten er motsatt polarisert i forhold til rensespunktene. Dette sikrer at rensen fester seg riktig, og systemet fungerer selv om rensereputen flytter seg noen steg i forhold til rensesmotoren under rensesprosessen.



Figur 49: Polplassering for robotens rensesystem

5.8 Bevegelse mellom tanker

For å gjøre robotsystemet enklest mulig er det ønskelig at en og samme robot renser flere tanker. Dette lar seg realisere ved at roboten benytter et brosystem for å kjøre mellom tankene. Et fungerende brosystem gjør robotsystemet helautomatisk, slik at alt manuelt arbeid er overflødig.

Utfordringer

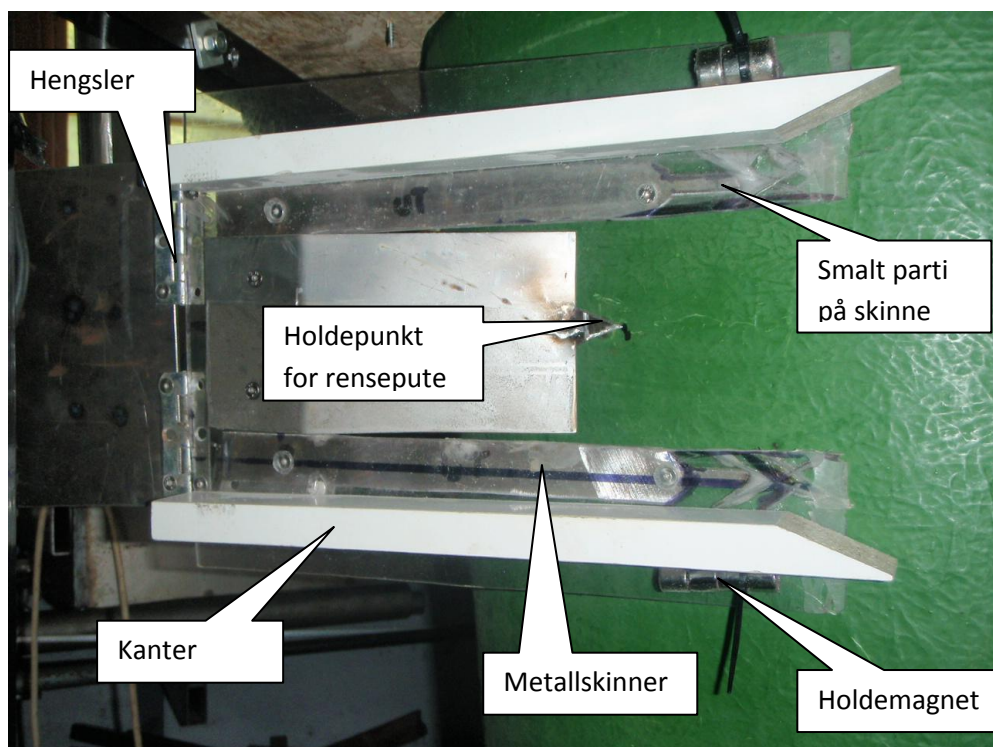
En rekke mekaniske detaljer ligger til grunn for det utviklede brosystemet. Følgende utfordringer gjør bevegelse mellom tanker vanskelig å realisere:

- Både sylindermagneter og renserepute må henge fast i tanken når roboten kjører videre til neste tank.

- Roboten må finne tilbake til sylindermagnetene og renseputen neste gang den kommer tilbake. Dette er spesielt vanskelig, da sylindermagnetene tiltrekker seg renseputen og roboten kommer kjørende motsatt vei.
- Roboten skal ikke falle ned fra brosystemet.
- Brosystemet kan ikke være til hinder for rensing av hele tanken.

5.8.1 Løsninger

Figur 50 viser prototypen av brosystemet som er utviklet. Brosystemet inneholder minst mulig bevegelige deler, og ingen elektronikk eller sensorer. En forklaring av brosystemets utvikling gjennom flere prototyper er vist i vedlegg B.



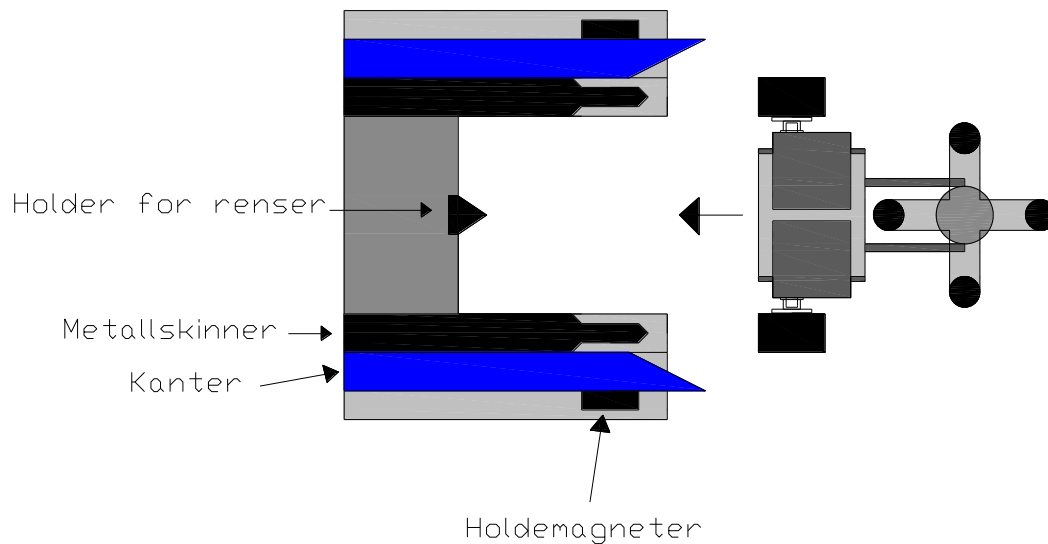
Figur 50: Prototype for brosystem

Fjærbelastede hengsler

Broen er hengslet og fjærbelastet inn mot tanken. Når tanken skal renses, skyves broen ut og roboten kan passere mellom broen og tanken. Etter endt rensesprosess, kjører roboten inn på broen i motsatt retning.

Metallskinner

Broen inneholder metallskinner av ferromagnetisk materiale under robotens hjul. Dette sikrer at roboten henger fast til broen.



Figur 51: Prinsipp for brosystem

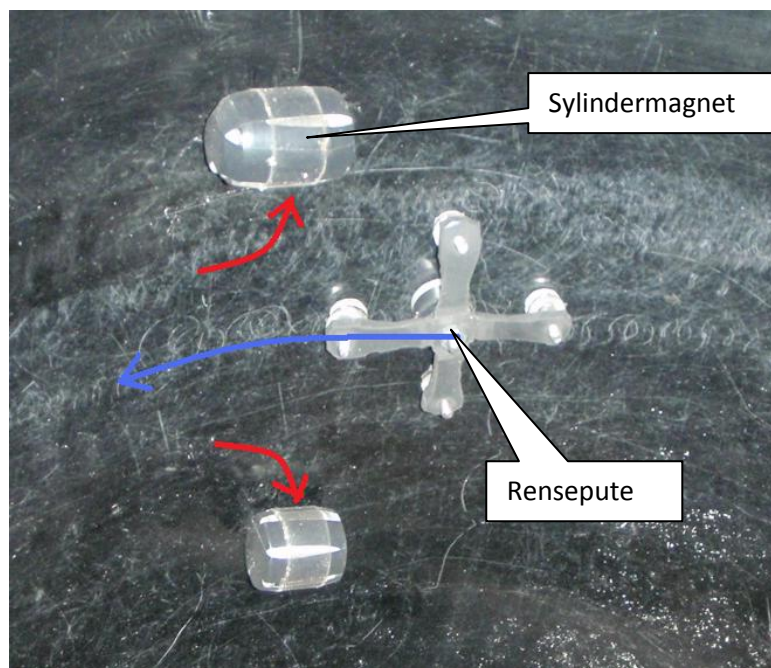
Enden av skinnene er utformet for å gi en rotasjonsbevegelse av sylindermagnetene på tankens innside. Metallskinnens smale område sørger for at sylindermagnetene snur seg 90 ° på grunn av magnetfeltet. Dette sammen med holdemagneter på hver side sørger for at magnethjulene får en rullebevegelse ut til sidene. Når roboten kommer kjørende tilbake, skjer den motsatte bevegelsen.

Rotasjonbevegelsen av sylindermagnetene på skinnens smale område skjer fordi den magnetiske fluksen fra sylindermagnetene går gjennom den smale metallskinnen. Dette skaper et rotasjonsmoment på magneten. Bevegelsen kan sammenlignes med en kompassnåls rotasjon på grunn av jordas magnetfelt.

En spiss form på enden av metallskinnene mot tanken sikrer en enkel overgang fra bro til tank for roboten. Dette fordi den magnetiske tiltrekningskraften mellom hjul og metallskinner da avtar gradvis.

Holdemagneter

Magneter ytterst på hver side av broen har som oppgave å dra sylindermagnetene til sidene slik at renseputen kan passere mellom. Magnetene må dimensjoneres slik at sylindermagnetene trekkes til siden og løsner når roboten kommer kjørende tilbake. På grunn av gravitetskraften må øvre og nedre holdemagnet dimensjoneres forskjellig. Figur 52 viser hvordan sylindermagnetene bevegtes til siden for å gi plass til renseputens passering. For video av den aktuelle bevegelsen, se vedlegg D.



Figur 52: Sylindermagnetenes bevegelse

Kanter

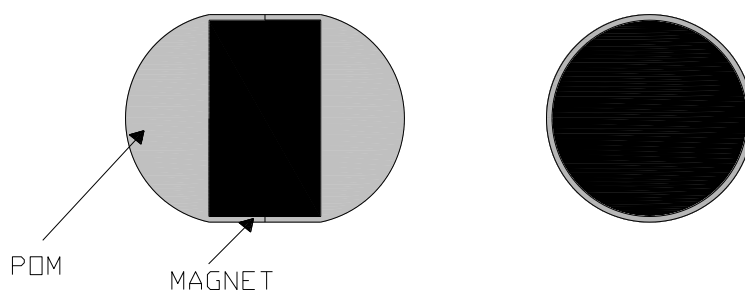
Kanter sikrer at roboten ikke kjører utenfor broen. Dette gjør bevegelse mellom tankene sikker og enkel. Sammen med en enkel retningsregulator basert på vinkelmåling eller måling av avstanden ut til sidene, vil roboten følge broen til neste tank.

Holdepunkt for renseputen

Renseputens sentermagnet henges fast mot et trekantformet metallstykke på broen. Den spisse utformingen gjør det mulig for roboten å løsne renseputen når den kommer tilbake igjen.

Sylindermagnetenes utforming

Sylindermagnetene på tankens innside bør kapsles inn for å unngå korrosjon. Innkapslingen formes med avrundede ender, for å sikre at magnetene ikke velter. En innkapsling med fasong som et kinderegge løser problemet. Figur 53 viser magnetenes innkapsling.



Figur 53: Sylindermagnetenes innkapsling

5.9 Diskusjon

Underveis i den mekaniske utviklingen var målet å konstruere en robot som kan kjøre mellom tankvegg og tankbunn på skrå som en naturlig del av rensingen av en komplett tank. Desverre har ikke dette latt seg løse. Dette betyr at dagens robot må rens tankvegg og tankbunn hver for seg. Kjøring mellom bør skje mest mulig vertikalt. Med et ekstra fleksibelt ledd mellom resemotor og robotkropp, og noe større hjuldiameter, bør en skrå bevegelse i overgangen være mulig. En stor fordel med bevegelse på skrå er at nøyaktig posisjonering ved tankveggenes bunn ikke trengs, da hele tanken renses i en og samme operasjon.

For å minske friksjonen mellom resemotoren og tankens utside, bør roterende sylindermagneter benyttes i stedet for dagens løsning med sylindermagnetenes flate side. Dette vil begrense slitasjen på tanken og gi lavere energiforbruk. Utfordringen er at magnetene blir tykkere, og noe mer mekanikk behøves.

Magnetenes avhengighet

Utfordringer omkring dimensjonering av magneter og motorer oppstår fordi mange komponenter påvirker hverandre. Følgende endringer på robotsystemet har store konsekvenser:

Større hjuldiameter på roboten for bedre grep mellom robotens hjul og tanken

- Roboten behøver høyere moment på motorer og lavere hastighet.
- Sterkere magnetfelt gjør at reNSEputen må plasseres lengre bak på roboten for å hindre tiltrekning av reNSEpute og magnethjul. For bevegelse mellom tankvegg og tankbunn må da hele roboten konstrueres høyere. Dette kan ses av Figur 43 dersom reNSEputen plasseres lengre bak robotens hjul. Da vil tanken komme i konflikt med robotens kropp dersom høyden ikke økes.
- Magnetisk kobling mot bro blir sterkere. Holdemagneter og metallskinner må da endres.
- Sterkere magnetisk kobling krever sterkere motorer for overgang tankbunn til tankvegg.

Større sylindermagneter på innsiden for bedre grep mellom robotens hjul og tanken

- Sterkere magnetfelt gjør at reNSEputen må plasseres lengre bak på roboten. For bevegelse mellom tankvegg og tankbunn må da hele roboten konstrueres høyere. Alternativt kan reNSEputens sentermagnet dimensjoneres sterkere.
- Sterkere magnetisk kobling krever sterkere motorer for overgang tankbunn til tankvegg.

Større resemagneter på reNSEputen for bedre rensing

- Roboten må ha større resemotor for rotasjon. Dette krever mer energi, og batteri må dimensjoneres større. Dette gir større total masse. Magneter i hjul eller sylindermagneter må da dimensjoneres opp. Dette påvirker motorer osv.
- Overgang fra tankbunn til tankvegg blir vanskeligere.
- Diameter på reNSEputen må økes, da magnetene vil påvirkes av magnetfelt fra reNSEputens sentermagnet. Roboten må da konstrueres lengre for å holde avstanden frem til sylindermagnetene. Dette fører til at brosystemet må endres.

Større sentermagnet på reNSEputen for å holde robotens bakpart bedre fast i tanken

- Gir større friksjon for både resemotor og robotens fremdrift. Magneter i hjul eller sylindermagneter må dimensjoneres sterkere. Dette krever sterkere motorer.
- Ved festing mot bro vil sterkere magnet gjøre det vanskeligere for robot å løsne reNSEputen.

Dekk

Dekkenes slitestyrke er ikke prioritert i den mekaniske konstruksjonen. Det antas at gode dekk med beregnede friksjonskoeffisienter kan skaffes. På dagens prototype benyttes enkle gummidekk med en begrenset levetid. Det er viktig at dekkene er tynne, slik at avstand mellom magneter og tankvegg blir så liten som mulig.

5.10 Konklusjon

En stor del av den nedlagte tiden i dette prosjektet har gått med til konstruksjon av mekanikk. Selv om en del videre uttesting og forbedringer kreves, viser dagens prototype at konseptet fungerer i praksis. Simulert rensing av en komplett tank har blitt gjennomført med gode resultater. For video fra rensing av testtank, se vedlegg D.

6 Motorer og drivverk

6.1 Bakgrunn

Som beskrevet i kapittel 5 er det ønskelig å bygge fremdriften opp rundt to drivende hjul foran på roboten. Løsningen gjør farkosten enkel å manøvrere, ved å individuelt styre de to motorene foran.

Dimensjonering av motorer, hjul og drivverk med tanke på hastighet og effekt har blitt gjort på grunnlag av både teoretiske beregninger og praktisk testing. I prototypingsfasen har billige motorer blitt benyttet for å teste konseptets muligheter. Spesialbestilte motorer av høyere kvalitet koster en del og har en lang leveringstid. I en videreutviklingsfase blir oppgradering av motorer en viktig del.

Hjuldiameter

Robotens hjul er dimensjonert på grunnlag av den nødvendige magnetiske kraften gjennom tankveggen. Fordelen med store hjul på utsiden, er at sylindermagnetene på innsiden kan minkes tilsvarende. Ulempen er at motorene må ha en større nedgiring og høyere moment. På dagens prototype har magneter med dekk en diameter på ca 37 mm.

Hastighet

Under rens av tank bør roboten være saktegående. Typisk 2-4 mm/s er vurdert som realistisk arbeidshastighet. Dette gir minimale forstyrrelser i tanken. Ved kjøring på bro forventes en maksimal hastighet på 15 mm/s.

6.2 Motorteknologi

Ettersom roboten skal være selvgående og batteridrevet, er det naturlig å utstyre den med likestrømsmotorer for fremdrift. Likestrømsmotorer og steppermotorer er vurdert som aktuelle løsninger.

DC-motorer kan man enkelt styre gjennom tilført spenning. I en DC-motor med konstant felt er momentet proporsjonalt med motorens ankerstrøm [13]. En likestrømsmotor har et sterkt moment ved lavt turtall, noe som er svært gunstig i vårt tilfelle.

Steppermotorer har også blitt vurdert som mulige for fremdrift. På grunn av dens rykkvise bevegelse, kan det være fare for resonans mot tankveggen ved enkelte hastigheter. Da kan en risikere uønskede forstyrrelser i tanken. Fordelen med en steppermotor er at den enkelt kan hastighetsstyres uten tilbakekobling fra enkodere. For sikker odometri bør allikevel steppermotorer utstyres med enkodere.

For å gjøre robotens mekanikk enklest mulig, er likestrømsmotorer med girbokser koblet direkte til hjulene. En girutveksling er nødvendig for å holde en lav hastighet, samt et høyt moment på akslingen. Tilsvarende likestrømsmotor benyttes på den roterende renseren.

6.3 Beregning av motorturtall på drivende hjul

Motorenes turtall ved maksimal hastighet er:

$$W = \frac{v}{O} * 60 = \frac{v}{\pi * D_{wheel}} * 60 = \frac{0,015 \frac{m}{sek}}{\pi * 0,037m} * 60 \approx 7,7RPM \quad (6.1)$$

O: Hjulets omkrets
W: Maksimalt turtall på hjul i o/min

v : Robotens hastighet

6.4 Beregning av nødvendig motoreffekt for drivende hjul

I et overslag av nødvendig motormoment, ble 0,4 Nm vurdert som nødvendig på hver motor ved kjøring vertikalt opp tanken (kapittel 5.5). På grunn av usikkerhetsmomenter, sving og renserens påvirkning blir 1,5 Nm antatt å være en godt dimensjonert motor. Effekten (tapsfritt) fra hver enkelt motor blir dermed:

$$\omega = \frac{v}{o} * 2\pi = \frac{0,015 \frac{m}{s}}{\pi * 0,037m} * 2\pi \approx 0,81 \frac{rad}{s} \quad (6.2)$$

$$P = \omega * \tau = 0,81 \frac{rad}{s} * 1,5Nm \approx 1,22W \quad (6.3)$$

ω : Omdreiningshastighet på hjul i rad/sek
 P : Mekanisk effekt tapsfritt pr motor
 τ : Dreiemoment pr motor

Ettersom det mekaniske tapet i både girboks og hjul/lager er av betydning, bør dette tas med i beregningen. Et realistisk mekanisk effekttap i drivverk og overføring med denne store utvekslingen antas å være 30 %. Den mekaniske effekten nødvendig ut fra motoren blir dermed:

$$P_{motor} = \frac{P}{0.70} = \frac{1,22W}{0.70} \approx 1,74W \quad (6.4)$$

P_{motor} : Mekanisk effekt på motorens aksel

Beregningene gir en nødvendig motoreffekt på ca 2 W. Det er ønskelig å ha en god sikkerhetsmargin, ettersom endringer på roboten vil komme. Det er også viktig å dimensjonere motorene noe større slik at de slipper å yte maksimalt. Dette vil gi dem lengre levetid, og vi har litt ekstra krefter. En motoreffekt på 3-5 W pr motor er vurdert til å være realistisk.

6.4.1 Valgt motor til prototype

I prototype ble motorer valgt på grunnlag av mekanisk utforming, pris og leveringstid. To standard RC-servoer av typen RCS M4315 med metallgir og høyt moment ble benyttet for fremdrift. Dette er en servomotor for 6 VDC med et moment på maksimalt 1,65 nm [17]. Servoens turtall er oppgitt til ca 60 RPM. Dette er langt høyere enn hva som er nødvendig.



Figur 54: RC-servo RCS M4315

I utgangspunktet er servoen ikke beregnet for kontinuerlig roterende applikasjoner, men for posisjonsstyring på en enkel omdreining. En del modifikasjoner var nødvendig for å kunne benytte servoene på prototypen.

Kontinuerlig roterende

Servoene ble modifisert til å bli kontinuerlig roterende ved å fjerne en innsatt mekanisk stopper i girhuset. I tillegg ble et singleturn-potensiometer fjernet og erstattet med en optisk enkoder.

Enkodere

Enkodere i hver motor er nødvendig for å beregne hastighet og tilbakelagt distanse på grunnlag av odometri. Figur 55 viser hvordan optiske enkodere ble modifisert og montert i girhusene. En tilpassing av enkoderens aksele var nødvendig.



Figur 55: Tilpassing av optisk enkoder i servo

6.5 Motor til roterende rensere

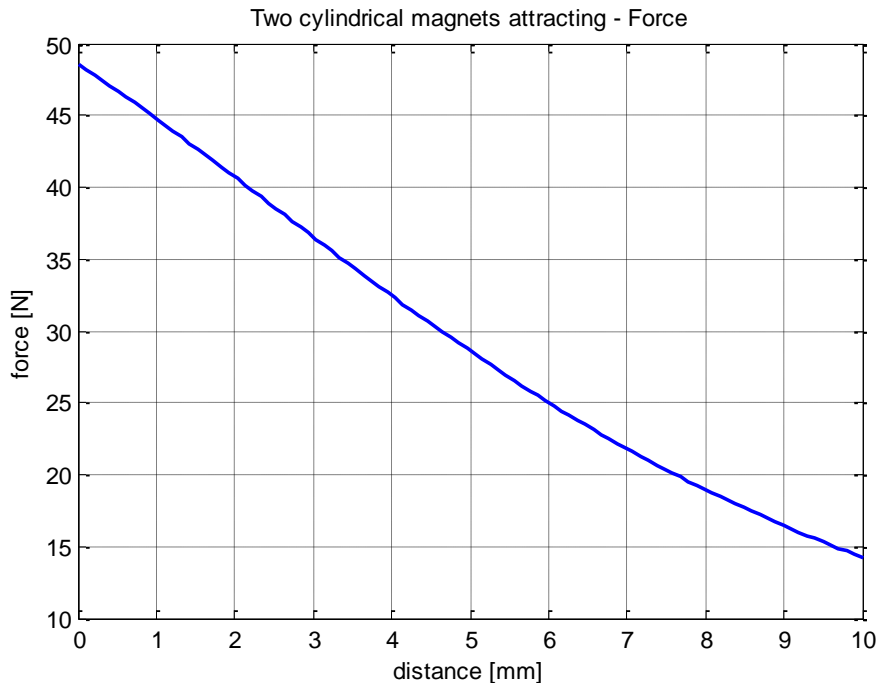
Til å rotere rensere trengs en motor som kan hastighetsreguleres. Rotasjonshastigheten til rensere kan på den måten tilpasses robotens fart, for minst mulig forstyrrelser i tanken. Rensere monteres direkte på motorens utgående aksele for enklest mulig mekanikk.

6.5.1 Motorturtall på rensesmotor

Maksimal omdreiningshastighet for rensere er valgt til å være ca 12 RPM. Dette er vurdert på grunnlag av praktisk testing. Motorens moment avhenger av rensesputens friksjonskrefter og diameter.

6.5.2 Beregning av moment på rensemotorens aksel

Friksjonskraften fra tanken på renserens kontaktpunkter beregnes på grunnlag av den magnetiske kraften gjennom tankvegg. Programmet *magnet_force_calc* (kapittel 5.3.4) benyttes. Sylindermagneter med diameter 15 mm og høyde 4 mm og 3 mm er plassert på henholdsvis utsiden og innsiden av tanken. Programmet gir følgende sammenheng mellom magnetisk kraft og avstanden.



Figur 56: Magnetisk tiltrekningskraft ved renserens kontaktpunkter

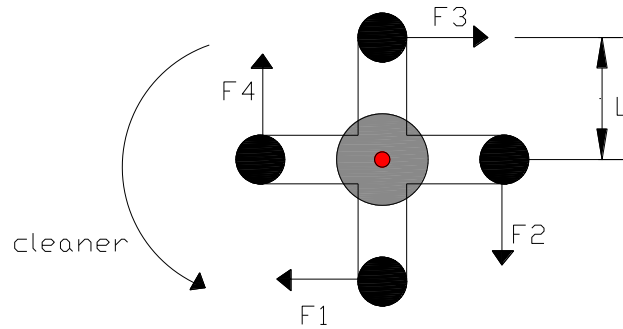
Forventet avstand mellom de innkapslede magnetene er totalt ca 6 mm. Vi leser av den magnetiske kraften til 25 N på grafen. Forventet friksjonskoeffisient på tankens innside ved begrodd tank forventes å være $\mu_1=0,11$. Friksjonskoeffisienten mot tankens utside antas å være $\mu_2=0,2$. $F_{cleaner}$ for hvert kontaktpunkt blir dermed:

$$|\vec{F1}| = |\vec{F2}| = |\vec{F3}| = |\vec{F4}| = F_{cleaner} \quad (6.5)$$

$$F_{cleaner} = \mu_1 * N + \mu_2 * N = 0,11 * 25N + 0,2 * 25N = 7,8N \quad (6.6)$$

- μ_1 : Friksjonskraft mellom tankens innside og renserens kontaktpunkter
- μ_2 : Friksjonskraft mellom tankens utside og renserens kontaktpunkter
- N : Normalkraft fra tankvegg på magneter

Figur 57 viser prinsippet for krefter på rensesystemet. Hver av de fire kontaktpunktene $F1-F4$ gir en friksjonskraft mot renserens roterende bevegelse.



Figur 57: Moment på rensemotorens aksel

Avstanden L er 4,25 cm. Momentet på rensemotorens aksel blir dermed:

$$M_{cleaner} = 4 * F_{cleaner} * L = 4 * 7,8N * 0,0425m = 1,3Nm \quad (6.7)$$

$M_{cleaner}$: Moment på rensemotorens aksel

$F_{cleaner}$: Friksjonskraft mellom renser og tankvegg. Sum av innsiden og utsiden.

$F1 - F4$: Friksjonskrefter fra renserens fire kontaktpunkter. Sum av innsiden og utsiden

Friksjonsbidraget fra renserens sentermagnet er neglisjert i disse beregningene, da bidraget er lite i forhold til bidragene fra kontaktpunktene. Motoren bør overdimensjoneres noe for å ha en god margin.

6.6 Beregning av nødvendig motoreffekt for rensemotor

Effekten (tapsfritt) fra hver enkelt motor blir ved en omdreinings hastighet 12 RPM:

$$\omega = \frac{W}{60} * 2\pi = \frac{12 \frac{0}{min}}{60 \frac{0}{min}} * 2\pi \approx 1,257 \frac{rad}{s} \quad (6.8)$$

$$P = \omega * \tau = 1,257 \frac{rad}{s} * 1,3Nm \approx 1,6W \quad (6.9)$$

ω : Omdreinings hastighet på hjul i rad/sek

P : Mekanisk effekt tapsfritt pr motor

τ : Dreiemoment pr motor

Effekt tap i drivverk antas også her å være 30 %. Den mekaniske effekten nødvendig ut fra motoren blir dermed:

$$P_{motor} = \frac{P}{0,70} = \frac{1,6W}{0,70} \approx 2,3W \quad (6.10)$$

P_{motor} : Mekanisk effekt ut fra motor

Ut i fra disse beregningene er det nødvendig med en motoreffekt på minimum ca 2,3 W. I praksis bør motoren overdimensjoneres betydelig.

6.6.1 Valgt rensemotor til prototype

Til rotasjon av renseren ble det valgt en tilsvarende servomotor som for fremdriften. Denne er oppgitt med et maksimalt moment på kun 1,65 nm [17]. I praksis fungerer motoren bra til formålet.

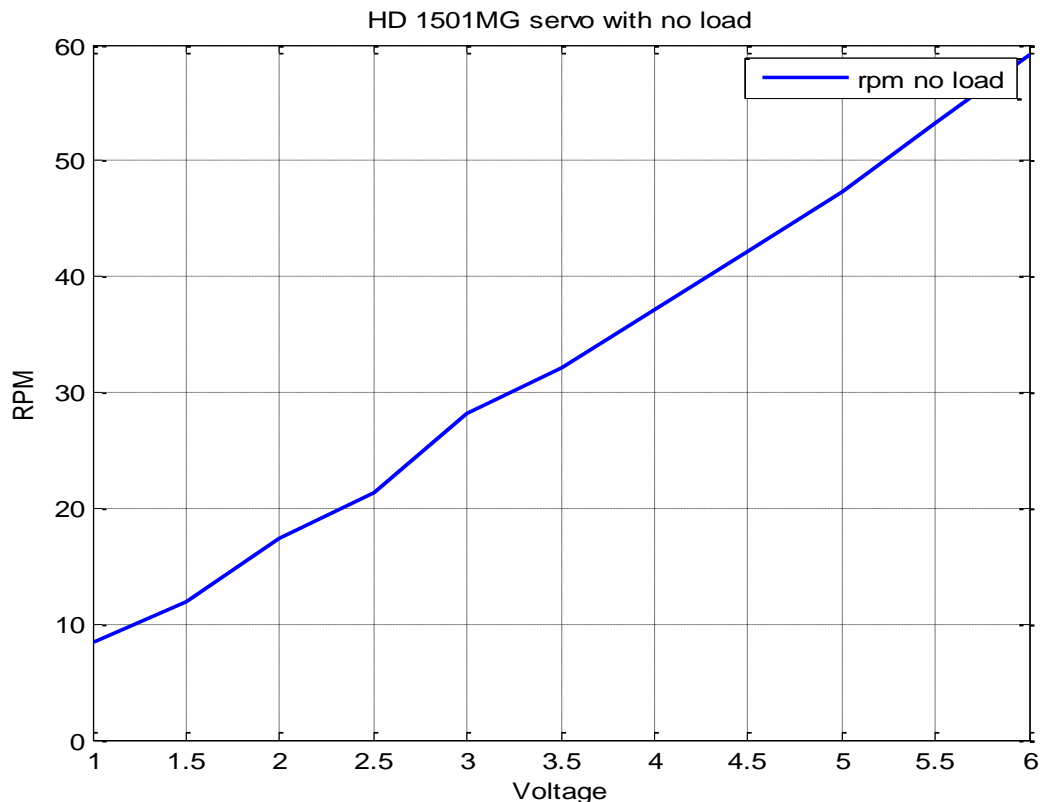
6.7 Diskusjon

I prosjektet har det vært viktig å benytte rimelige deler som er lett å få tak i. Det er derfor valgt mest mulig deler som er lett tilgjengelig på markedet, og som kan tilpasses vårt formål på en enkel måte.

På prototypen ble ikke enkoder i rensemotoren montert. Hastighetsstyring av rensemotoren ble derfor kun gjort med forskjellige pulsbredder på styresignalet. I praksis er dette uegnet, og en reguleringsløyfe er nødvendig.

Tester viser at motorene til fremdrift er lite egnet til formålet. Dette på grunn av for høy rotasjonshastighet og for lavt moment. Dette gir dem dårlig virkningsgrad, og de er vanskelige å hastighetsregulere ved lav fart. I tillegg er friksjonen i girhusene ganske stor. Dette bidrar til at virkningsgraden for motoren blir lav. For en batteridrevet farkost er dette ugunstig.

Figur 58 viser en måleserie utført på de benyttede motorene. Figuren viser turtall på akselen som funksjon av spenningen. En spenning på minimum 1 V er nødvendig for å få motoren til å rotere. Kurven viser at det ubelastede turtallet er tilnærmet proporsjonalt med spenningen. Målingene ble gjort ved å lese av turtall på akselen med en digital hastighetsmåler basert på optisk refleks. Forventet arbeidsturtall ble beregnet til 1,55 RPM. Dette er langt under minimum turtall for denne figuren, og dermed utenfor motorens optimale arbeidsområde.



Figur 58: Turtall som funksjon av spenning på ubelastet servo

Fordelene med å ha en hurtiggående prototype er at testing av posisjonering og bevegelse tar mindre tid. Dersom prinsippene fungerer for den hurtige roboten, vil de også fungere for langsommere robot.

I en videreutviklingsfase bør oppgradering av motorer gjøres. Energieffektive motorer med lav hastighet og høyere kvalitet bør velges. Kjente leverandører av motorer med høy kvalitet er for eksempel Maxon og Faulhaber. Den største utfordringen omkring valg av motorer er den fysiske størrelsen. Overslag over kraftbehov er basert på enkle beregninger og vurderinger. Dersom robotens masse eller renserens friksjon endres, vil dette påvirke motordimensjoneringen.

6.8 Konklusjon

Selv om de valgte motorene for fremdrift er lite egnet til formålet, har de fungert tilfredstillende ved høyere hastighet. Gjennom å benytte en høyere spenning en anbefalt, ble også større moment i kortere perioder oppnådd. Vi kan derfor være fornøyd med valg av motorer med tanke på pris og funksjonalitet på dette stadiet.

7 Posisjoneringsystem

7.1 Bakgrunn

For å gjennomføre rens av tankene, må roboten kjøre en ønsket rute systematisk. Hver gang roboten er ferdig med ruten, skal den finne tilbake til ladestasjonen. For å komme dit, må farkosten posisjonere seg på brosystemet. Ved ladestasjonen skal den vente til den er oppladet, og til neste tidspunkt for kjøring kommer.

Viktige egenskaper

Posisjoneringsystemets viktigste egenskaper oppsummeres som:

- For at roboten skal kunne rens tanken på en god måte, forventes det at den følger en spesifisert rute med et avvik på maksimalt 3 cm.
- Posisjoneringen skal være nøyaktig og robust.
- Det bør kreves minst mulig ekstra deler i form av sensorer og innretninger på tankene.
- Systemet bør enkelt kunne tilpasses forskjellige tankstørrelser.
- Det er ønskelig at renehastighet og kjørerute skal kunne endres på en enkel måte.

Utfordringer

Utfordringene omkring posisjonering på tankene er mange. Våre største utfordringer er:

- Presis posisjonering på både tankvegg og tankbunn bør tilfredsstilles med samme sensorer.
- Stolper og rør er hindringer rundt tankene. Dette kan virke inn på enkelte sensorer.
- Det er mye metall rundt tankene. Dette betyr at målinger fra et kompass får avvik.
- Løsningen bør kreve minst mulig ekstra innretninger på tankene.

7.2 Koordinatsystemer

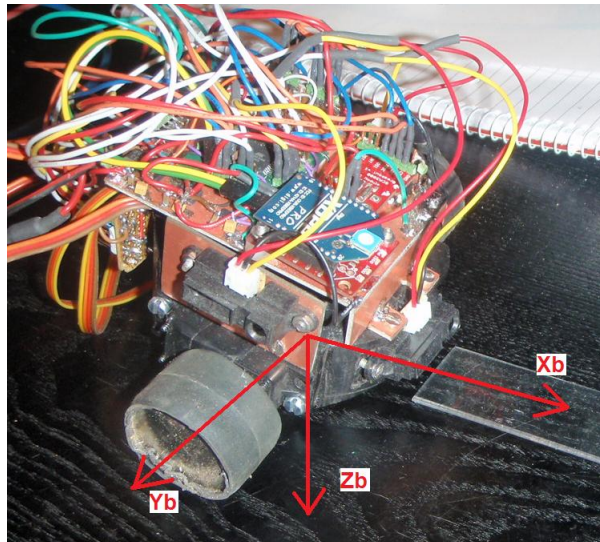
Det er ønskelig å bygge opp et posisjoneringsystem basert på koordinatsystemer, der roboten oppdaterer sin posisjon fra sensordata. Ønsket kjøreretning beregnes på grunnlag av gitte waypoints. Fordelen med denne løsningen er at man enkelt kan endre på ruten, og fortsatt være i samme koordinatsystemet og bruke samme logikk. Det samme gjelder dersom tankens eller robotens størrelse endres.

Valgt løsning

I den totale løsningen benyttes fire forskjellige koordinatsystemer:

1. Body

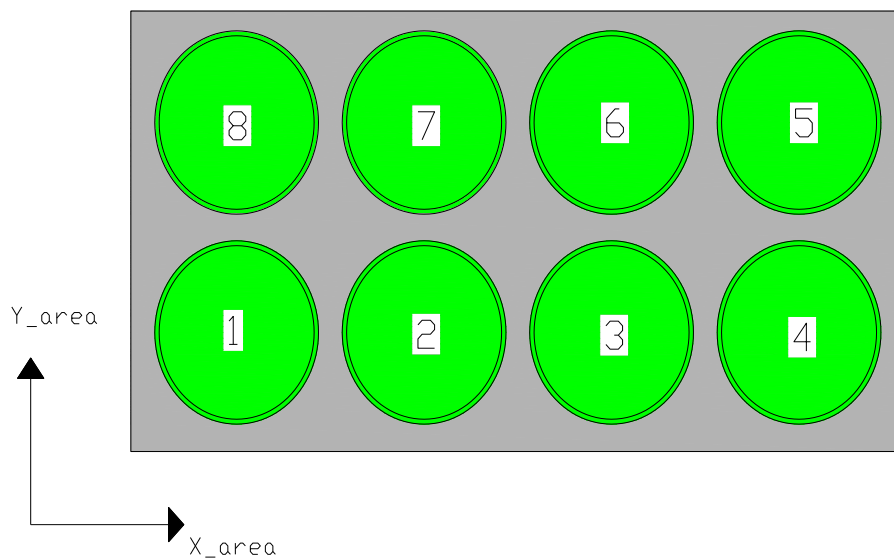
Body refererer til et koordinatsystem fast i robotens kropp. Origo plasseres i robotens rotasjonspunkt, CR_{robot} .



Figur 59: Body-koordinatsystem

2. Area

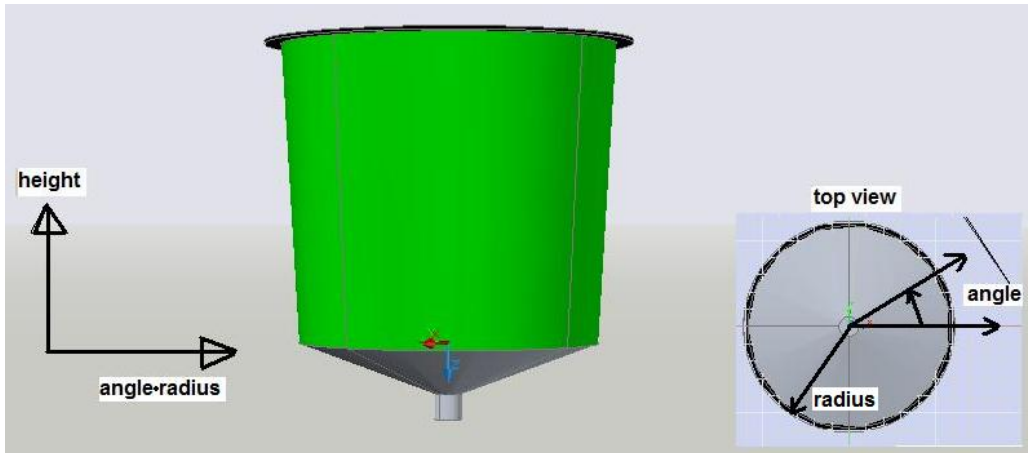
Koordinatsystemet Area baserer seg på et XY-koordinatsystem fast til tankriggeren, sett ovenfra. Dette benyttes i forbindelse med robotens posisjonering på brosystemet og visualisering av robotens plassering i brukergrensesnittet. Hver tank har et eget nummer.



Figur 60: Koordinatsystemet Area

3. Wall

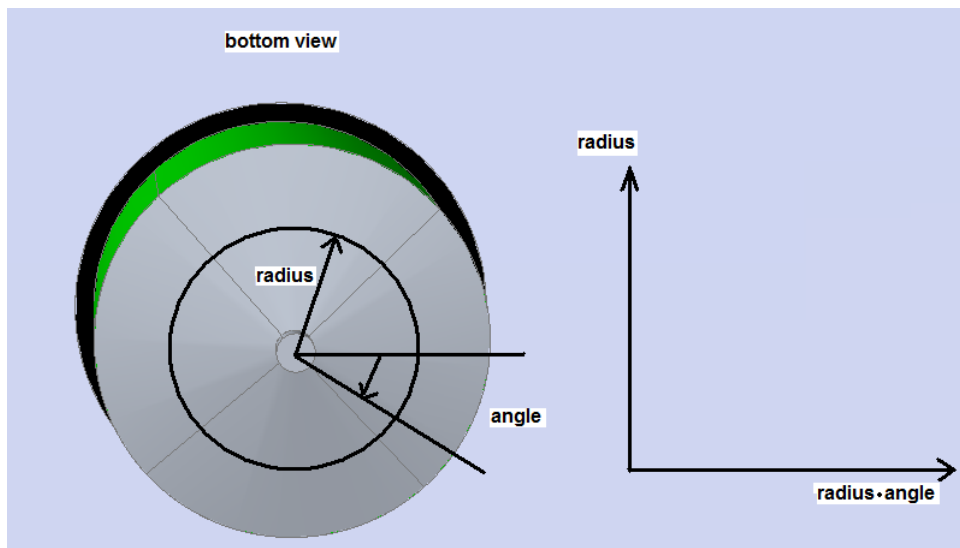
Ved kjøring på tankvegg benyttes koordinatsystemet Wall. X-aksen refererer her til en horisontal akse rundt tankveggenes bunn. Y-aksen er høyden vertikalt rettet oppover.



Figur 61: Koordinatsystemet Wall

4. Bottom

På tankens bunn benyttes et XY-koordinatsystem som en tilnærming av sirkelens polare koordinater. Dette kan gjøres ettersom parametrene estimeres fortløpende. X-aksen refererer til en tenkt sirkel ved aktuell *radius*. Y-aksen er rettet ut fra tankens senter.



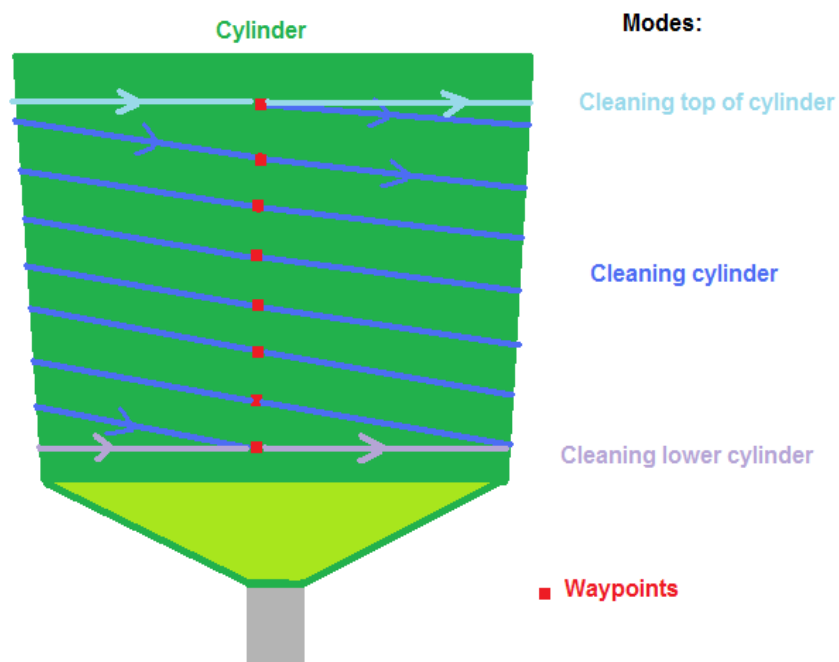
Figur 62: Koordinatsystemet Bottom

7.3 Navigasjon

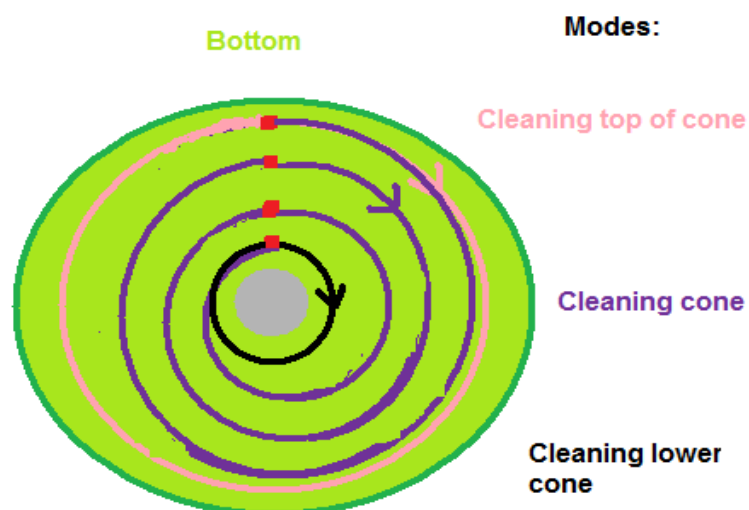
I denne delen forklares robotens bevegelse i de viste koordinatsystemene.

7.3.1 Bevegelse på tanken

Spesifikasjon av ønsket rute på tanken gjøres ved hjelp av en tabell med punkter, kalt waypoints. Løsningen er veldig fleksibel, da punktene enkelt kan flyttes dersom det er ønskelig å endre på kjøreruten. De neste figurene viser prinsippet for hvordan bevegelse på grunnlag av waypoints skjer på tankvegg og tankbunn.



Figur 63: Waypoints på tankvegg



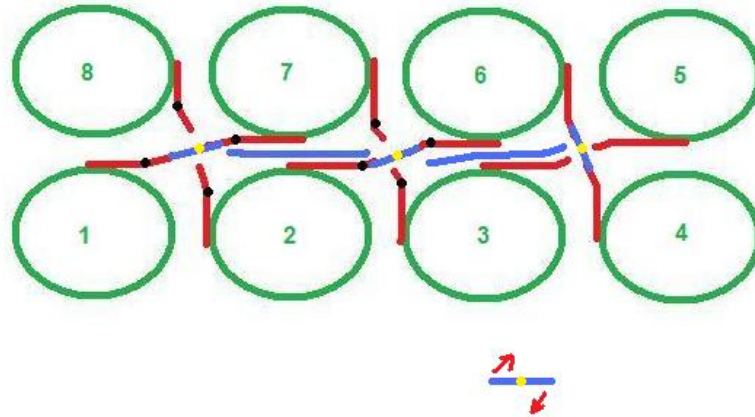
Figur 64: Waypoints på tankbunn

7.3.2 Brosystem

Et krav for et fungerende brosystem er at roboten må ha adgang til alle tankene på tankriggen. Dette kan løses på flere måter. Følgende metoder er aktuelle:

A. Roterbare skinner

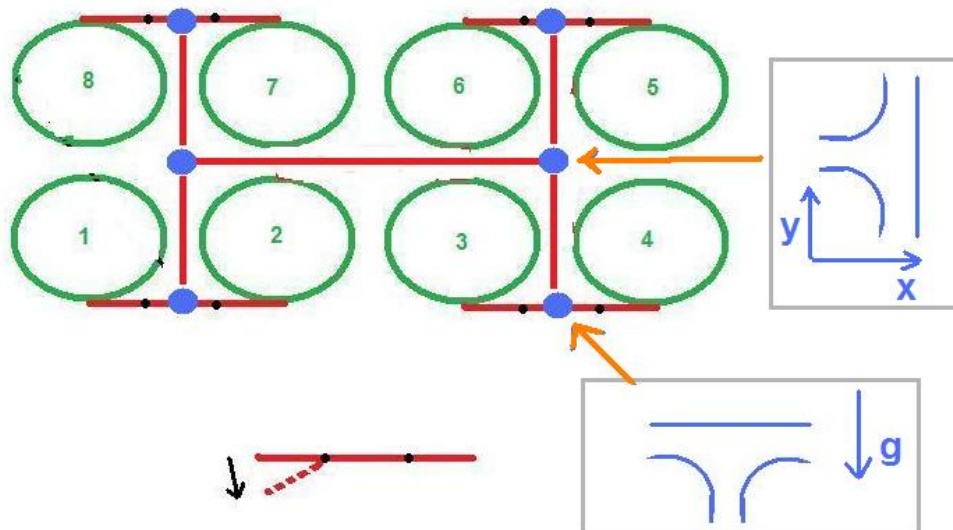
Dersom en roterbar skinne mellom broer fra de fire nærliggende tankene konstrueres, kan roboten velge hvilken tank den skal kjøre til. Dette krever mye mekanikk og et roterbart skinneresystem i hvert kryss. På grunn av behov for ekstra motorer, sensorer og mekanikk, er denne løsningen avansert og plasskrevende.



Figur 65: Alternativ løsning med roterbare skinner

B. Veikryss

En annen løsning er å benytte seks veikryss for å få tilgang til alle åtte tankene. Dette krever at skinneresystemet går vertikalt ned fra hver bro til to horisontale samlekryss midt under tankene. Dette innebærer passering av en vinkel. Roboten henger da på undersiden av de horisontale samleskinnerne. Fordelen med at roboten henger under samleskinnerne er at støv og skitt ikke samler seg på dem.

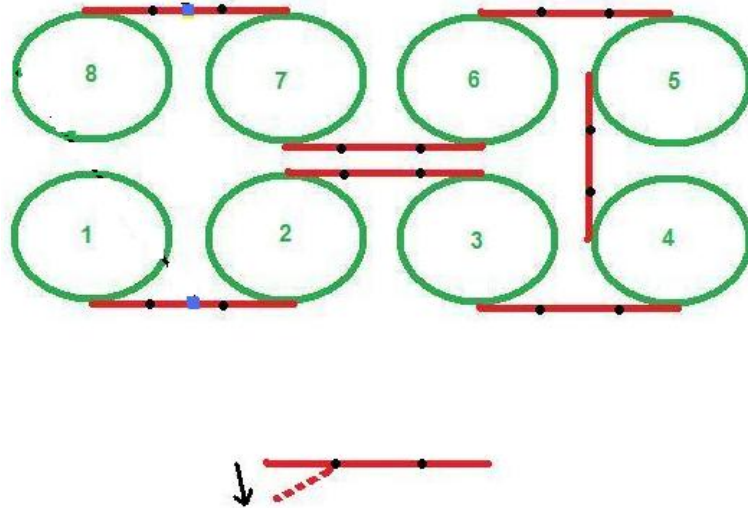


Figur 66: Brosystem med "veikryss"

Med denne løsningen har roboten tilgang til alle tankene uten behov for ekstra motorer, sensorer eller annen avansert mekanikk.

C. Bro mellom hver tank

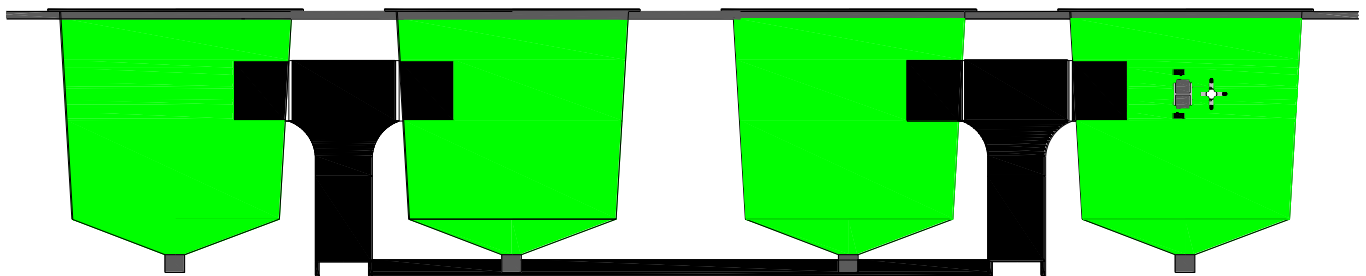
Prinsippet baserer seg på at roboten må kjøre via alle tankene for å komme fra første til siste tank på riggen. Dersom en tank ikke skal renses, passerer roboten den ved å kjøre kun en halv runde. Uempem med dette konseptet er at roboten må via alle tankene dersom for eksempel kun tank 1 og 8 skal renses. Fordelen er at brosystemet blir ganske enkelt mekanisk.



Figur 67: Brosystem med bro mellom hver tank

Valgt løsning

Det finnes trolig flere mulige løsninger for oppbygningen av brosystemet. Basert på de viste prinsippene er B vurdert som den beste metoden. Dette på grunn av enkel tilgang til alle tankene uten behov for ekstra bevegelige deler. Figur 68 viser en skisse av brosystemet på en tankrigg sett fra siden. På en rigg med 10 tanker trengs et vertikalt kryss ekstra. Det ene horisontale krysset må da ha fire broer tilkoblet.



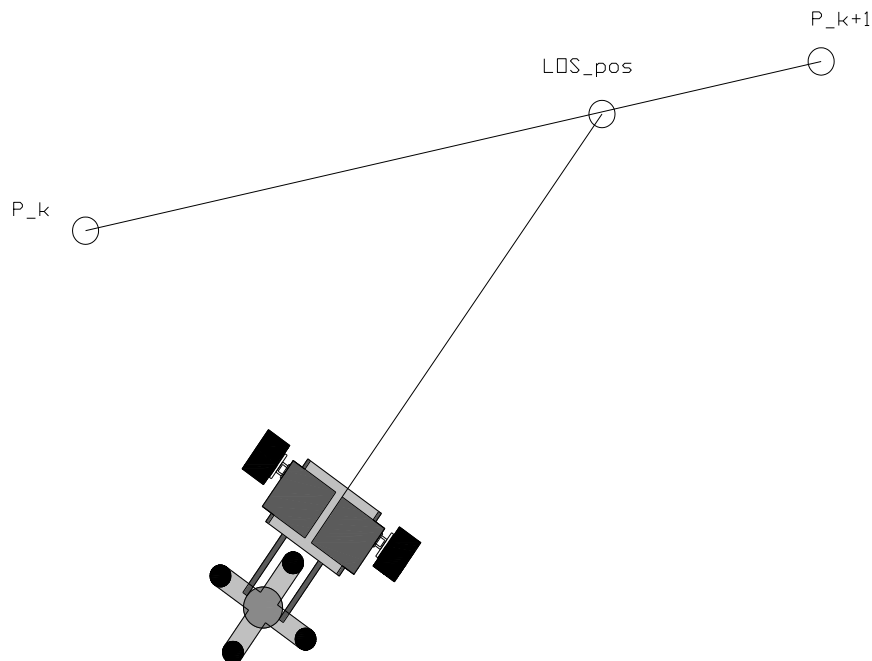
Figur 68: Brosystem sett fra siden

7.3.3 Guidance-system

For å følge ruten beskrevet med waypoints kreves det at roboten vet sin egen posisjon og retning. Når dette er kjent, kan en algoritme benyttes til å gi korreksjoner på grunnlag av avvik fra den angitte ruten. Programstrukturen som kjører denne målfølgingsalgoritmen kalles et Guidance-system. Guidance-systemet bestemmer også ønsket hastighet til roboten. Som målfølgingsalgoritmer finnes flere alternativer. Dette er prinsipper som typisk benyttes i autopiloter på skip. De tre vanligste metodene for målfølgning er [18] :

1. Line-Of-Sight Guidance

Prinsippet går ut på at man alltid sikter seg inn på et tenkt punkt (LOS-position) som er foran seg på den rette linjen mellom de gitte waypoints. Dette punktet holdes alltid en bestemt lengde foran farkosten.

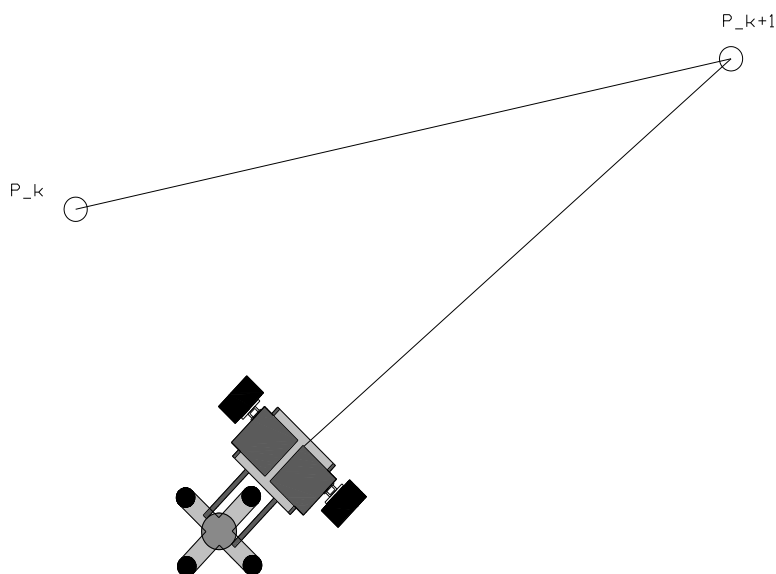


Figur 69: LOS-guidance

p_k : *Forrige waypoint*
 p_{k+1} : *Neste waypoint*
 LOS_{pos} : *Line Of Sight – position*

2. Pure Pursuit Guidance

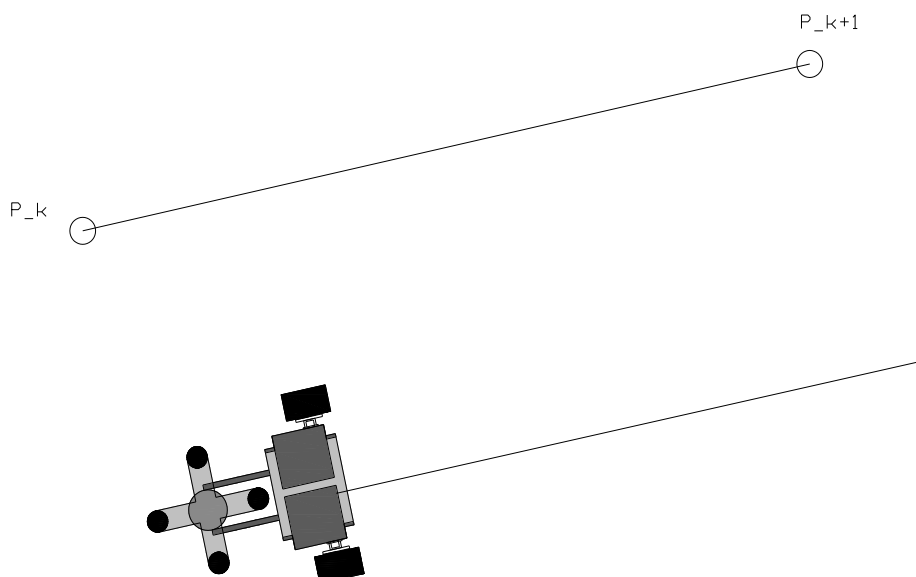
Her sikter roboten alltid mot neste waypoint, uansett hvor den befinner seg. Ved lange avstander til neste waypoint, vil en stor sideveis feil, kun gi et lite bidrag i vinkel.



Figur 70: Pure Pursuit Guidance

3. Constant Bearing Guidance

Med denne metoden ønsker man å holde samme retning som linjen mellom de to angitte waypoints. Man overser den sideveise forskyvningen som oppstår.



Figur 71: Constant Bearing Guidance

Valgt løsning

Metoden Line-Of-Sight Guidance har blitt valgt til vårt formål. Dette begrunnes med at denne metoden gir minst avvik fra den ønskede banen. Man kan tenke seg at lengden mellom de to punktene er lik tankens omkrets og man har et posisjonsavvik sideveis på roboten. Dette tilsvarer avvik i høyde på tankveggen. Pure Pursuit-metoden vil da korrigere retningen veldig lite for dette, og feilen i høyde øker helt til roboten er mot slutten av sirkelen. Constant Bearing-prinsippet vil ikke korrigere mot avvik i høyde, og man risikerer å få et kontinuerlig økende avvik.

Den valgte metoden Line-Of-Sight Guidance sikter seg inn på LOS-posisjonen, som typisk velges 5-30 cm foran roboten. Kortere avstand gir mindre avvik og hurtigere regulering, mens for kort avstand i verste fall gir en ustabil regulering. For detaljer omkring målfølgingsalgoritmen, se kapittel 12.5.1.

7.4 Diskusjon

Ulempen med det benyttede posisjoneringssystemet er at det krever en relativt avansert programvare. Fordelene det gir er derimot stor fleksibilitet i endring av kjøreruter og tankstørrelser. Dette har stor praktisk verdi.

7.5 Konklusjon

Tester gjennomført på tanken viser at valgt løsning fungerer tilfredstillende. Ved hjelp av posisjoneringssystemet har den ønskede posisjonsnøyaktigheten blitt oppnådd. En dokumentasjon av posisjonsnøyaktigheten er gjort i kapittel 15.

8 Sensorer

8.1 Bakgrunn

Alternativene omkring bruk og plassering av sensorer for posisjonering er mange. Skal man ha en veldig presis løsning koster det gjerne mye penger. For å få til en god løsning kreves det at man kombinerer flere sensorer, og utnytter de beste egenskapene til hver enkelt.

Nøyaktigheten til posisjoneringssystemet vil i stor grad påvirkes av sensorenes plassering, type og kvalitet. Bredden på robotens renspute er ca 10 cm. 3 cm ble derfor vurdert til å være et godt utgangspunkt for absolutt krav til posisjonsnøyaktighet. Man vil selvsagt måtte legge opp ruten med en viss overlapp for å sikre at hele tanken blir rensset. Ved tankens øvre kant og ved utløpet er kravet til nøyaktighet større, for å unngå kollisjoner.

Med det valgte posisjoneringssystemet er det ønskelig å estimere følgende parametre:

- Høyde (*height*)
- Radius (*radius*)
- Posisjon på tanken sett ovenfra (*angle*)
- Robotens vinkler (*roll, pitch, yaw*)

8.2 Aktuelle sensorer

Følgende sensorer er vurdert som aktuelle for posisjonering på tanken:

Akselerometer

Et akselerometer kan benyttes for å finne robotens retning i forhold til gravitasjonsfeltet. Et 3-akset akselerometer er rimelig, bruker lite strøm og tar lite plass. Løsningen gir god nøyaktighet, i form av vinklene *roll, pitch og yaw*.

Odometri

Det benyttes en enkoder på hvert hjul. Dermed kan posisjonsendring og hastighet beregnes når man vet hjuldiameteren. Dersom tankens dimensjoner er kjent, vil odometri kunne oppdatere estimatene av både *height, radius og angle*. Ulempen med odometri er at systemet må vite posisjonen og retningen roboten har før oppstart. I tillegg vil man få drift i posisjon og retningsestimat over tid. Hvis roboten mister grepet mot underlaget og spinner, vil odometri ikke kunne måle dette avviket.

Avstandsmåling

En avstandsmåling gir en absolutt posisjon som ikke drifter over tid. For å kunne benytte avstandsmålinger til posisjonsestimat, trenger man å vite posisjonen til det objektet det måles avstanden til, og i hvilken retning det måles. Ulempen med denne typen måling er hvis for eksempel mennesker eller andre uønskede gjenstander kommer i veien. Da vil det oppstå feil i posisjonsestimatet.

Forskjellig teknologi som vanligvis benyttes for avstandsmåling er radar, ultralyd, IR eller laser. Ultralyd og radar vil vanligvis ha en bredere deteksjonslobe enn IR og laser. Alle fire prinsippene vil kunne benyttes for de aktuelle avstandene. Dersom avstanden opp til toppen av tanken eller ned til gulvet måles, vil det være mulig å oppnå et godt høydeestimat.

Linjefølger

En optisk lysføler kan benyttes for å kjenne igjen linjer på tanken med ulik farge. Prinsippet benyttes typisk på selvgående robotsystemer. Da følger roboten en strek basert på informasjon fra lysfølere. Dersom en linje beskriver hele robotens kjørerute, vil roboten kunne rense en hel tank, kun basert på linjefølgeren. Løsningen gir en meget nøyaktig bevegelse, uten behov for andre sensorer. Ulempen er at strekene må fysisk flyttes dersom en ønsker å endre på kjøreruten.

Kompass

Et kompass vil i prinsippet gi absolutt estimat av *angle* under hele ruten. Det finnes i hovedsak to typer kompass, gyrokompass og magnetkompass. Ettersom et gyrokompass har en meget høy pris og er fysisk større, er magnetkompass det eneste reelle alternativet. Det er prisgunstig og gir et retningsestimert som ikke drifter over tid.

Jordas magnetfelt er veldig svakt i forhold til resten av magnetene på roboten. Metallrørene på tankkrikken vil også gi deviasjon i målingene. I praksis vil derfor et magnetkompass gi for store avvik.

Hallsensor

En hallsensor kan benyttes for å kjenne igjen en magnet festet til et kjent punkt på tanken. Dersom punktet er en magnetstripe, kan hallsensorer benyttes for å få roboten til å følge stripen. Dette blir tilsvarende som for den optiske linjefølgeren. Fordelen med et magnetisk system er bedre robusthet mot støv og skitt på de magnetiske sensorene. Ulempen er at robotens magnetiske hjul vil tiltrekkes av magnetstripen.

Kapasitiv nærhetsdetektor

En kapasitiv føler kan benyttes for å detektere at roboten er inntil tankens øvre kant eller utløpsrøret på bunn.

8.3 Mulige sensorløsninger

Flere sensorkombinasjoner er mulige for å oppnå god nok posisjonsnøyaktighet på roboten. Følgende alternative sensoroppsett er mest aktuelle:

a) Linjefølger

Et linjefølgingsystem basert på optiske sensorer gir en presis posisjonering på tanken. Dette krever at en linje lakkeres eller tapes fast på hele ruten. Det er viktig at ikke linjen slites bort etter en tids kjøring. Ulempen er som sagt at endring av ruten krever flytting av linjene.

b) Akselerometer og kapasitiv føler

Det kan benyttes kun akselerometer under posisjonering på tanken. En kapasitiv føler kan detektere når roboten har nådd bunnen av tanken. Ved kjøring på tankveggen holder roboten en konstant retning basert på akselerometerets vinkelberegninger. Målfølgingsalgoritmen er i dette tilfellet overflødig. Løsningen krever et nøyaktig akselerometer for å oppnå god nøyaktighet i høyde. En kan tenke seg at robotens spiralformede rute nedover tankveggen trekkes ut til en rett linje. Dersom tankens radius er 325 mm og roboten kjører 8 runder rundt tanken, blir den totale lengden L :

$$L > 2 * \pi * R * n = 2 * \pi * 0,325m * 8 = 16,3m \quad (8.1)$$

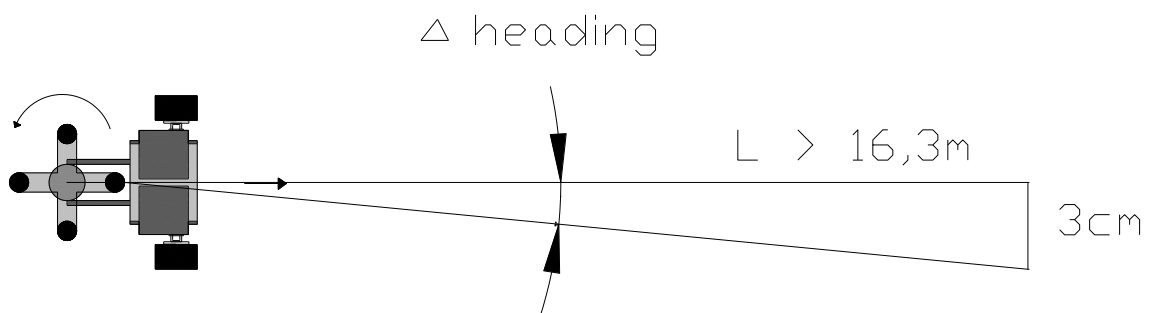
R : Tankens radius
 L : Total kjørelengde på tankvegg
 n : Antall runder rundt tanken

Dersom et maksimalt avvik i høyde på 3 cm ved tankveggenes bunn skal oppnås, må akselerometer og reguleringssystem ha en total nøyaktighet i heading på:

$$\Delta heading < \text{atan} \left(\frac{0,03 \text{ m}}{16,3 \text{ m}} \right) = 0,1^\circ \quad (8.2)$$

$\Delta heading$: *Krav til nøyaktighet i heading*

Figur 72 viser prinsippet for kravet til nøyaktighet i heading. Denne nøyaktigheten er det vanskelig å oppnå, ettersom dette krever et presist akselerometer og en perfekt regulator. Tankens ujevnheter og renserens påvirkning på roboten vil trolig gi betydelige forstyrrelser.



Figur 72: *Krav til nøyaktighet i heading*

En annen utfordring med sensoroppsettet er å dektekere når roboten er ved bunnen av tankveggen. Til dette trengs et punkt som nærhetsdetektoren kan kjenne igjen. En alternativ løsning som senker kravet til nøyaktighet er dersom høydemålingen oppdateres en gang på hver runde. Dette kan gjøres optisk eller magnetisk. Løsningen vil øke $\Delta heading$ med faktoren n .

c) Akselerometer og avstandsmåler

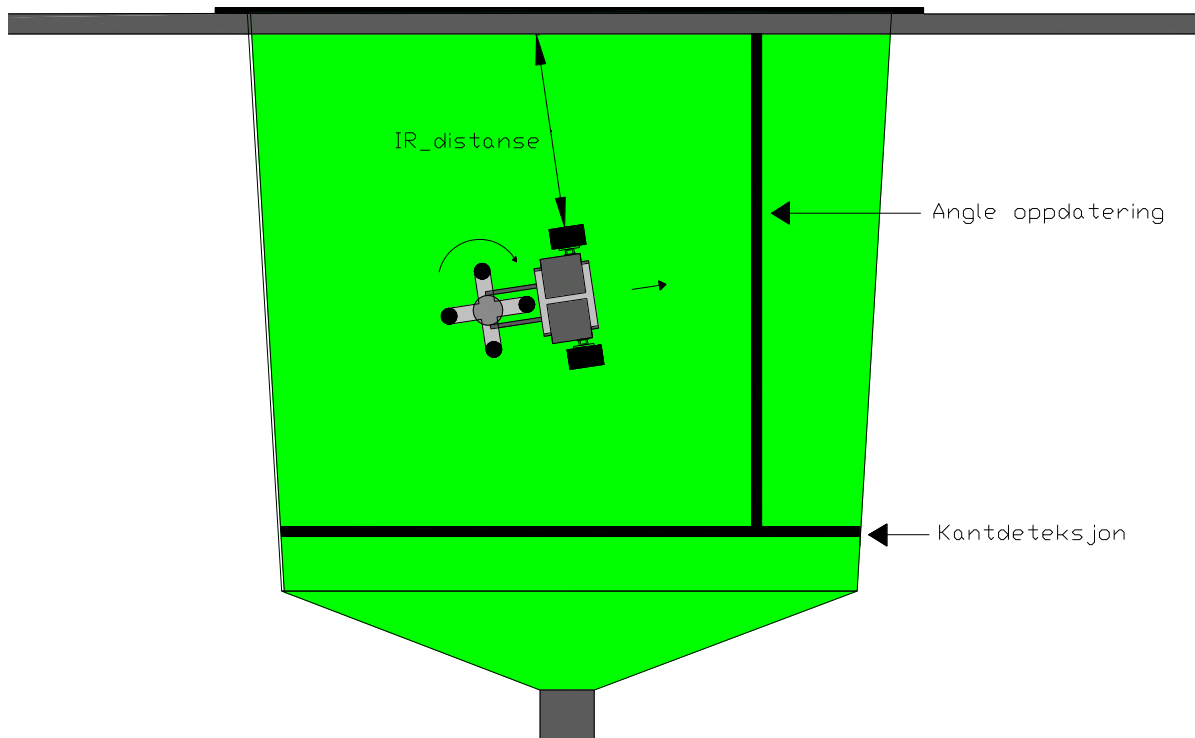
Tilsvarende som b), kan en avstandsmåler benyttes i stedet for den kapasitive nærhetsdetektoren. Dette gir kontinuerlig oppdatering av høydeestimatet under kjøring. Parameteren *angle* er ikke observerbar med dette oppsettet.

8.4 Valgt sensorløsning

Den valgte sensorløsningen benytter flere sensorer for å oppnå gode posisjonsestimater og sikker kjøring på tanken.

8.4.1 Tankvegg

Følgende sensorer benyttes ved kjøring på tankveggen:



Figur 73: Valgt løsning for tankvegg

IR-avstandsmålere

Gjennom å måle avstanden opp til bordplaten på toppen av tanken oppnås et godt høydeestimat. Målinger ned mot gulv kan også gjøres, men dette er mer risikabelt fordi ting som ligger på gulvet eller rørkonstruksjoner kan gi feilmålinger. En avstandsmåler foran detekterer høyden når roboten kjører vertikalt oppover tankveggen.

Akselerometer

Et 3-akset akselerometer angir robotens retning. Dette er nødvendig for å kunne følge den ønskede ruten. For å få gode høydemålinger er det viktig å kompensere avstandsmålingene med robotens vinkel. Prinsippet for dette forklares i kapittel 12.3.4.

Odometri

Enkodere er nødvendig for å hastighetsregulere roboten. Sensorene benyttes også til odometri. Odometri gir en god oppdatering av både *height*, *angle* og *radius*. *Radius* på tankveggen er en funksjon av tankens høyde.

Odometrien vil gi avvik over tid. Spesielt vil dette skje ved estimering av *angle*, ettersom den ikke kan måles ved hjelp av avstandsmålere. Ved kjøring nært tankens utløpsrør der *radius* er liten, vil betydelige avvik oppstå.

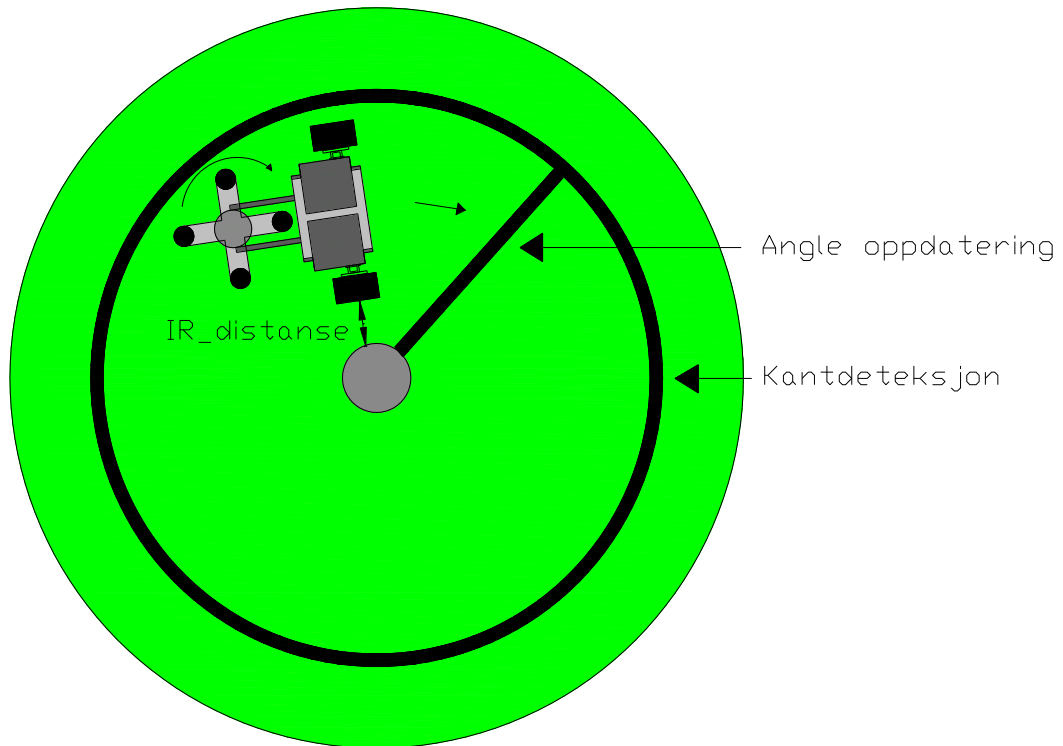
Linjefølger

Et linjefølgingsystem benyttes for å oppdatere estimatet av *angle* på hver runde. Til dette benyttes en vertikal strek på tanken. De samme sensorene benyttes også til å detektere når roboten er inntil tankveggen nedre kant. Dersom avstandssensoren er unøyaktig og roboten kjører for langt ned, kan en risikere at roboten kjører seg fast. Som en sikkerhetsløsning benyttes en linjefølger langs bunnen av tankveggen. Denne kan også benyttes til å kalibrere avstandssensoren, da avstanden opp til

bordplaten er kjent ved denne posisjonen. Linjefølgingsystemet kan også benyttes for presis kjøring på brosystemet.

8.4.2 Tank bunn

Følgende sensorer benyttes ved kjøring på tankbunnen:



Figur 74: Valgt løsning for tankbunn

Avstandsmålere

Avstanden til utløpsrøret måles for å få et godt estimat av *radius*. For oppnå refleksjon, kreves det at roboten kjører tangentielt på sirkelen. Ved kjøring fra tankveggen til tankbunnen benyttes avstandsmåler foran for måling av avstand til utløpsrør.

Akselerometer

Akselerometeret benyttes for å holde robotens retning mest mulig tangentielt på sirkelen. Små korreksjoner gjøres for å følge den spesifiserte ruten. Løsningen på dette gjennomgås i kapittel 12.3.4.

Odometri

Odometri gir en god oppdatering av både *angle* og *radius* dersom avstandsmålinger ikke er tilstedet. Høydeestimatet på tankbunnen benyttes ikke til navigasjon. Det er en funksjon av estimert *radius*.

Linjefølger

Linjefølgingsystemet oppdaterer estimatet av *angle* en gang hver runde. Til dette benyttes den vertikale streken på tanken. Sensoren benyttes også til å detektere når roboten er nært tankbunnens ytre kant.

8.5 Sensorer

I denne delen forklares nødvendige spesifikasjoner til hver enkelt sensor.

8.5.1 Enkodere

Det er begrenset fysisk plass til enkodere i de valgte motorene på prototypen. Dette begrenser utvalget av enkodere med god nok oppløsning. I valgt løsning er enkoderen tilkoblet hjulets aksel direkte.

Krav til oppløsning

Krav til enkoderens oppløsning avhenger av robotens hastighet og hjulets diameter. Forventet rensehastighet er ca 3 mm/s og robotens hjuldiameter er 37 mm.

For en høy nok båndbredde på robotens hastighetsregulator, forventes det at denne har en samplingsfrekvens på minimum 5 Hz. Erfaringsmessig er dette et minimum for å få en tilnærmet rykkfri regulator.

Kvadraturteller

Det kan tenkes at oppløsningen i hastighet bør være på minimum 0,1 mm/s for å holde en stabil hastighet på 3 mm/s. Dette tilsvarer 30 pulser pr sample fra enkoderen. Det totale antall pulser fra enkoderen pr sekund blir dermed:

$$n_{sek} = n_{sample} * f = 30 * 5 = 150 \frac{pulser}{s} \quad (8.3)$$

n_{sek} : Antall pulser fra enkoderen pr. sekund
 n_{sample} : Antall pulser fra enkoderen for hvert sample for hastighetsregulatoren
 f : Hastighetsregulatorens samplingsfrekvens

Enkoderens minimum oppløsning blir:

$$n_{enkoder} = \frac{n_{sek}}{\pi * d} = \frac{150 \frac{pulser}{s}}{\frac{3 \frac{mm}{s}}{\pi * 37 \text{ mm}}} = 5835 \text{ PPR} \quad (8.4)$$

$n_{enkoder}$: Antall pulser fra enkoderen pr omdrening
 v : Robotens hastighet
 d : Robothjulenes diameter

Inkrementelle enkodere har to kvadraturutganger A og B. Dersom begge disse trigger telleren, blir nødvendig enkoderoppløsning halvert til 2918 PPR. Alternativt kan kvadraturtelleren trigge ved både positiv og negativ flanke for begge signalene A og B. Nødvendig enkoderoppløsning blir da ytterligere halvert til 1459 PPR. Dette er den minimale oppløsningen som kan benyttes for å oppnå den angitte nøyaktigheten.

Da det ikke ble funnet noen enkodere med passende fysiske størrelse og så stor oppløsning, ble det nødvendig å benytte en annen metode for å måle hastigheten.

Timer

I stedet for å telle opp antallet pulser i et tidsrom i en kvadraturteller som nevnt, kan man istedet måle tiden mellom hver puls fra enkoderen. Med denne metoden blir kravet til enkoderens oppløsning lavere. Samplingsfrekvensen bestemmes da av robotens hastighet og enkoderens

oppløsning. Nøyaktigheten for hastighetsmålingene blir bestemt av timerens oppløsning. Dersom samplingsfrekvensen til hastighetsregulatoren er 5 Hz, blir nå antall pulser fra enkoderen pr sekund:

$$n_{sek} = f = 5 \frac{\text{pulser}}{s} \quad (8.5)$$

Enkoderens oppløsning blir nå ved hastigheten 3 mm/s:

$$n_{enkoder} = \frac{n_{sek}}{v} = \frac{5 \frac{\text{pulser}}{s}}{\frac{3 \frac{\text{mm}}{s}}{\pi \cdot d}} = 194 \text{ PPR} \quad (8.6)$$

Vi ser at behovet for oppløsning i enkoderen er redusert med faktoren n_{sample} ved bruk av timer i forhold til kvadraturteller. Enkodere med denne oppløsningen finnes i aktuell fysisk størrelse.

Bourns ENS1J

Bourns ENS1J serie [19] er en optisk enkoderserie som finnes med oppløsninger på 64, 128 og 256 PPR. Disse gir en 2-kanals kvadratur-utgang og er kontinuerlig roterende. Figur 55 viser tilpassing av enkoderne i motorene.



Figur 75: Bourns ENS1J

På grunn av pris og leveringstid ble versjonen med 128 PPR valgt til prototypen. Denne gir i utgangspunktet en dårligere samplingsfrekvens på hastighetsmålingen enn det som var ønskelig (minimum 194 PPM).

Da hver enkoder har to kvadraturutganger A og B med en duty-cycle på 50 % hver, kan oppløsningen enkelt økes med faktoren 4, tilsvarende som for kvadraturtelleren. Dette kan realiseres ved at interrupt med hastighetskalkulasjon kjøres på både positiv og negativ flanke for begge utgangene A og B. Figur 161 viser prinsippet. Enkoderens praktiske oppløsning blir dermed 512 PPR.

8.5.2 Akselerometer

Valg av akselerometer baserer seg i hovedsak på måleområde, ytelse og pris. Robotens hastighet er tilnærmet konstant og lav. Det oppstår derfor ingen akselerasjoner av betydning på grunn av bevegelsen. Akselerasjonen som er av interesse er kun basert på måling av jordas gravitasjonsfelt. En sensor med range minimum +1 g er derfor passende. Dersom måleområdet er for stort vil typisk oppløsningen være dårligere.

Krav til nøyaktighet

I den benyttede sensorløsningen benyttes akselerometerdata sammen med enkoderen for å oppdatere posisjonsestimaten. Dette estimatet blir korrigert av avstandsmålingen dersom den er tilgjengelig. Bias i akselerometerets beregnede vinkler vil gi en biasfeil i estimatet av *angle* og *height*,

og i tillegg gi et konstant avvik i den faktiske posisjonen. I *height* vil maksimal biasfeil være gitt av (kapittel 15.2):

$$height\ error = lookahead\ distance * \tan(heading\ error) \quad (8.7)$$

Lookahead distance: En tuningparameter i navigasjonssystemet

heading error: Bias i heading

height error: Bias i height

Som maksimal *height error* på grunn av akselerometeret settes 5 mm. Den maksimale *heading error* kan beregnes som:

$$heading\ error = \operatorname{atan}\left(\frac{height\ error}{lookahead\ distance}\right) \quad (8.8)$$

lookahead distance i benyttet løsning er 150 mm. Innsatt verdier gir dette:

$$heading\ error = \operatorname{atan}\left(\frac{5\ mm}{150\ mm}\right) = 1,91^\circ \quad (8.9)$$

Kravet til bias i akselerometeret blir dermed ca 2 °. Dette gjelder for hele måleområdet, og er summen av bias, ulinearitet og mekanisk skjevstilling. Store feil i akselerometeret vil derimot føre til ustabilitet i posisjoneringen.

Båndbredde

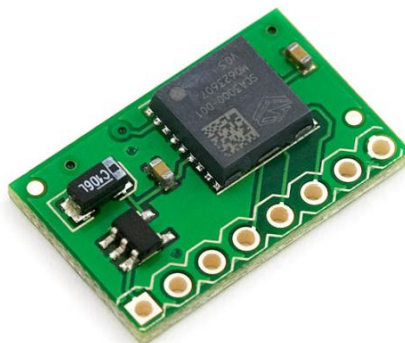
Det er kun lavfrekvente endringer i vinkler som er av interesse. Akselerometerets båndbredde stilles det derfor ingen strenge krav til. En lavpassfiltrering av sensordataene gjøres for å fjerne uønsket støy.

Interface

For enklest mulig elektronikkdesign, er det ønskelig med et digitalt interface mot mikrokontrolleren. Et akselerometer med innebygd temperatursensor bør velges, da temperaturverdien kan benyttes til å kalibrere akselerometeret eller andre sensorer.

VTI SCA3000

Det finnes en rekke produsenter som leverer presise nok akselerometere til formålet. SCA3000 fra produsenten VTI er et rimelig 3-akset MEMS-akselerometer med en range +-2 g. Sensoren fås med enten SPI eller I²C interface. Et strømforbruk på kun 650 µA gjør akselerometeret egnet til batteridrevne applikasjoner.



Figur 76: VTI SCA3000

Nøyaktighet

SCA 3000 har en oppløsning 0,04 ° [20]. Nøyaktigheten fra fabrikk kan beregnes ut fra databladet [21]:

Offset calibration error er oppgitt til 50 mg. Ved en maksimal feil i kun en akse tilsvarer dette [22].

$$\text{offset calibration error} = \text{atan}\left(\frac{0,05g}{1g}\right) = 2,9^\circ \quad (8.10)$$

Offset temperature error er oppgitt til typisk 0,5 mg/°C. Det forventes temperaturvariasjoner på opptil 20 °C i lokalet. Dette tilsvarer en biasdrift på maksimalt 10 mg. Ved en maksimal feil i kun en akse tilsvarer dette [22]:

$$\text{offset temperature error} = \text{atan}\left(\frac{0,01g}{1g}\right) = 0,6^\circ \quad (8.11)$$

Nonlinearity er oppgitt til 1 % FS. Dette tilsvarer ved en maksimal feil i en akse [22]:

$$\text{nonlinearity error} = \text{atan}\left(\frac{2g*0,01}{1g}\right) = 1,15^\circ \quad (8.12)$$

Den totale feilen blir summen av disse bidragene i tillegg til intern og mekanisk skjevstilling. Dette betyr i praksis at akselerometeret må kalibreres for å få en god nok nøyaktighet. For kalibrering av akselerometeret og vinkelberegninger, se kapittel 12.3.3.2.

Temperatursensor

SCA3000 har en innebygd temperatursensor med en oppløsning på 0,55 °C. Den kan benyttes til temperaturkalibrering av robotens sensorer. Dette er spesielt viktig dersom roboten skal arbeide i områder med store temperaturvariasjoner.

Båndbredde

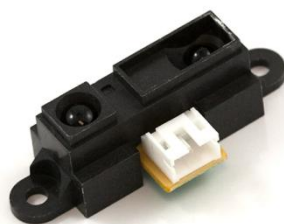
Akselerometeret har en oppgitt båndbredde på 45 Hz. En kan risikere at høyfrekvent vibrasjoner fra for eksempel rensemotoren gir utslag på vinkelmålingene. Det bør derfor implementeres et digitalt lavpassfilter for å minke båndbredden.

Free fall detection

Akselerometeret har en innebygd logikk som detekterer om akselerometeret er i fritt fall. Dette kan utnyttes for å gi alarm på det grafiske brukergrensesnittet dersom roboten faller ned fra tanken.

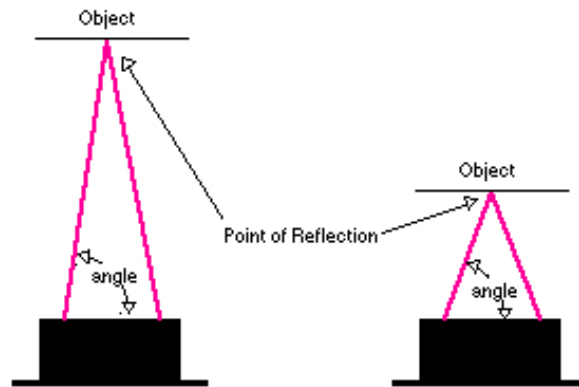
8.5.3 Avstandsmålere

IR-avstandsmålere finnes i rimelige varianter med små fysiske utførelser og rekkevidde egnet for roboten. Sharp leverer en serie IR-avstandsmålere som benyttes mye innen robotikk. Sensorer i Sharp GP-serie finnes med flere ulike måleområder mellom 30 cm og 5,5 m [23].



Figur 77: Sharp IR-avstandsmålere [23]

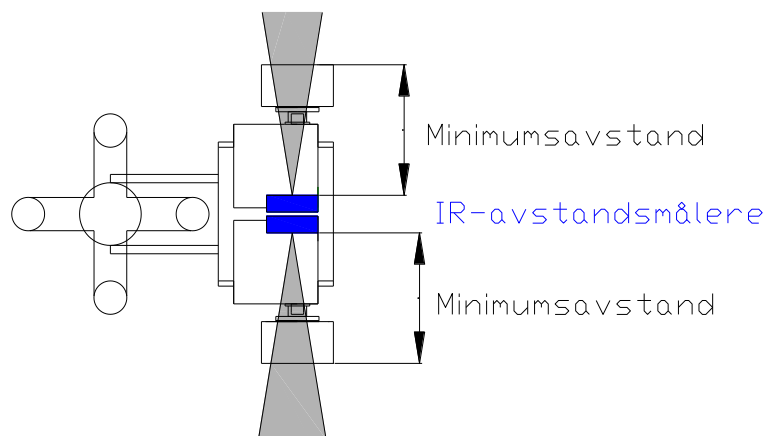
Sensorene benytter seg av en IR-lyskilde og en IR-mottaker. Avstanden beregnes ut fra vinkelen på det reflekterte lyset. Figur 78 viser prinsippet for avstandsmålingen [23].



Figur 78: Prinsipp for IR-avstandsmåler [23]

Minimumavstand

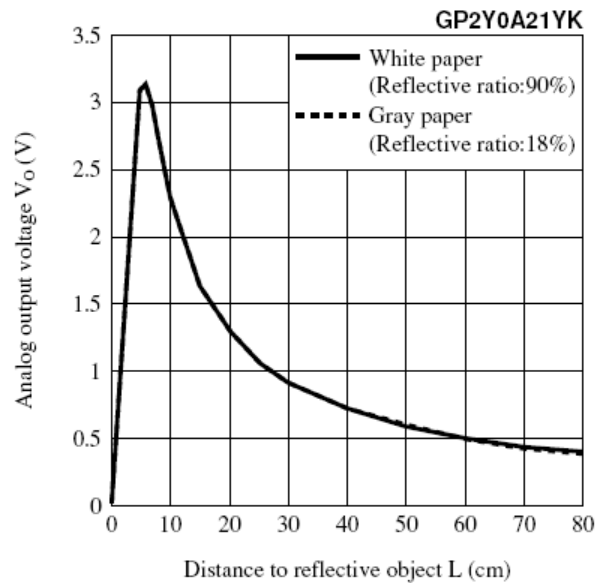
En ulempe med sensorene er at minimum deteksjonsavstand ikke er inntil sensoren. De to testede sensorene GP2D120X og GP2YA021 har minimum deteksjonsavstand på henholdsvis 4 cm og 10 cm. Kortere avstander enn minimumsavstanden er et forbudt område. For å forsikre seg at roboten ikke kommer i det forbudte området, bør avstandssensorene plasseres i en avstand fra robotens ytterkanter. Sensorene til sidene bør derfor plasseres mot senter av roboten som vist på Figur 79. På dagens prototype er den viste plasseringen ikke gjort. En forbedring bør gjøres i neste design.



Figur 79: Avstandsmålerenes plassering på grunn av minimumsavstanden

Ulineær utgang

IR-sensorenes utspenning som funksjon av avstanden har typisk form som på Figur 80 [24]. Minimumsavstanden blir her ved grafens toppunkt. I området mellom minimumsavstanden og maksimum rekkevidde er grafen tilnærmet logaritmisk[23]. For å benytte utgangen til avstandsmåling trengs derfor en linearisering av sensoren.



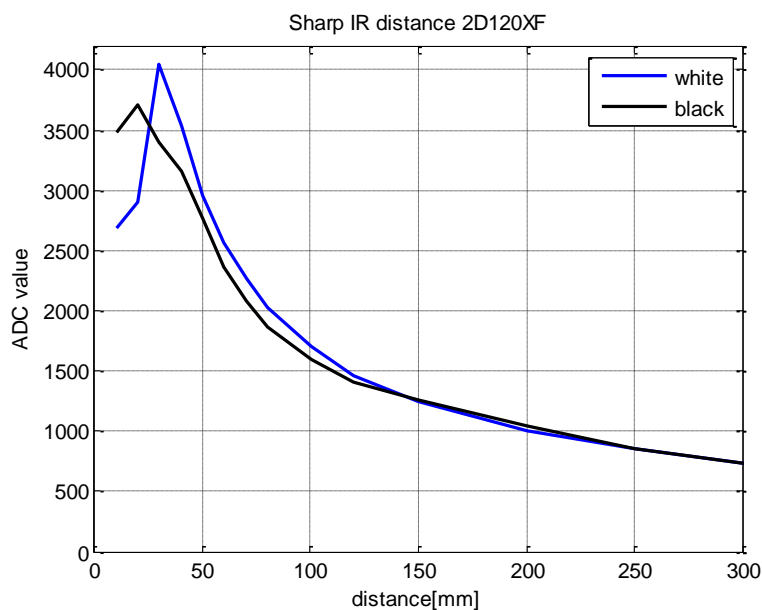
Figur 80: Spenningens avhengighet av avstanden

De individuelle forskjellene mellom hver sensor er store, så en individuell kalibrering av hver enkelt sensor er nødvendig. For linearisering av og kalibrering av sensorer, se kapittel 12.3.3.3.

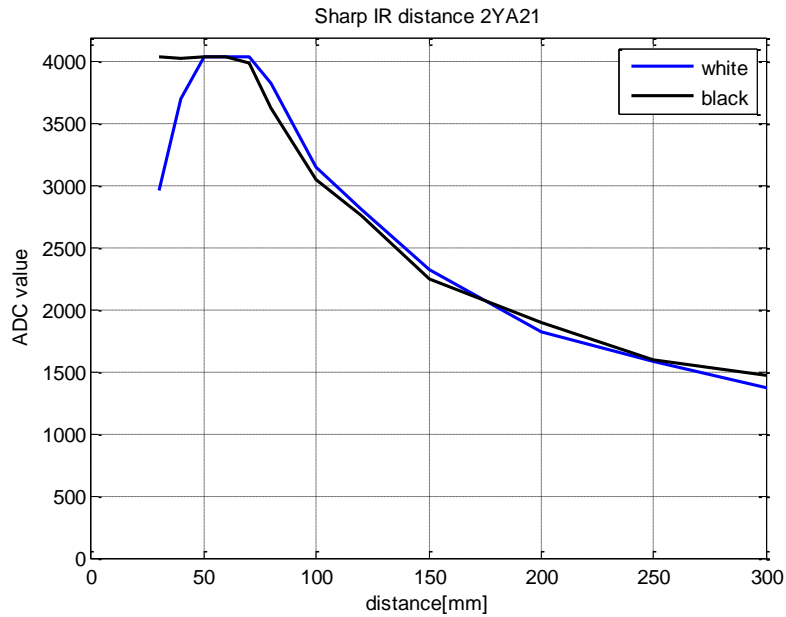
Test av fargefølsomhet

Sensorenes avhengighet av fargen på målet er i følge databladet [24] liten. Figur 80 viser en ubetydelig forskjell mellom refleksjoner mot hvitt og grått papir ved lengre avstander. For å kontrollere denne avhengigheten i praksis ble målinger mot hvitt og sort objekt gjennomført. Avstanden ble målt med en linjal. Det kan forventes fysiske avvik på inntil 2 mm under målingene, da avstandene ble justert manuelt.

Figur 81 og Figur 82 viser to forskjellige sensorer med maks rekkevidde henholdsvis 30 cm og 80 cm. Figurene bekrefter en lav men ikke ubetydelig fargeavhengighet.



Figur 81: Fargeavhengighet for 2D120XF

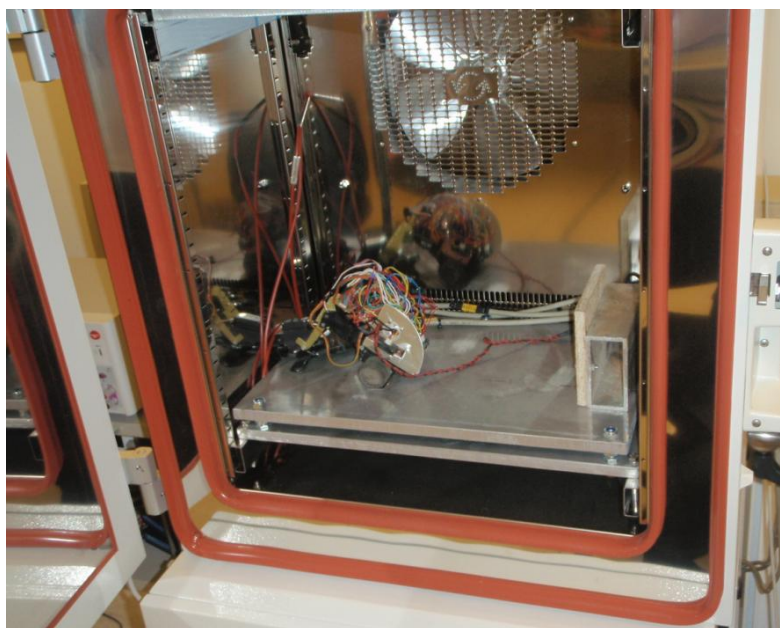


Figur 82: Fargeavhengighet for 2YA21

For kortere avstander er avviket på mindre enn 1 cm på grunn av fargeforskjell. Dersom roboten alltid måler avstanden mot samme farge, bør denne feilen kalibreres bort i den lineariserende funksjonen.

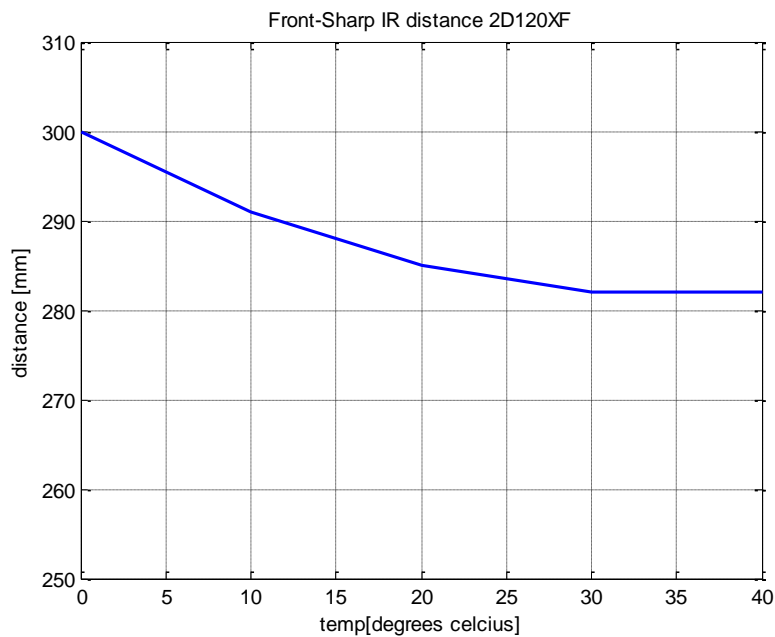
Test av temperaturavhengighet

IR-avstandsmålerens temperaturavhengighet er av stor interesse, da en kan forvente varierende temperaturforhold. Dersom temperaturavhengigheten er betydelig, bør feil kalibreres bort med input fra temperatursensoren. I databladet er temperaturavhengigheten ikke oppgitt. Det maksimale temperaturområdet ved bruk er oppgitt som -10 til 60 °C [24]. Temperaturavhengigheten ble testet i et klimaskap av typen Vötsch VT4011. På grunn av skapets fysiske størrelse, ble avstander på maksimalt 30 cm målt. Figur 83 viser roboten i temperaturskapet.



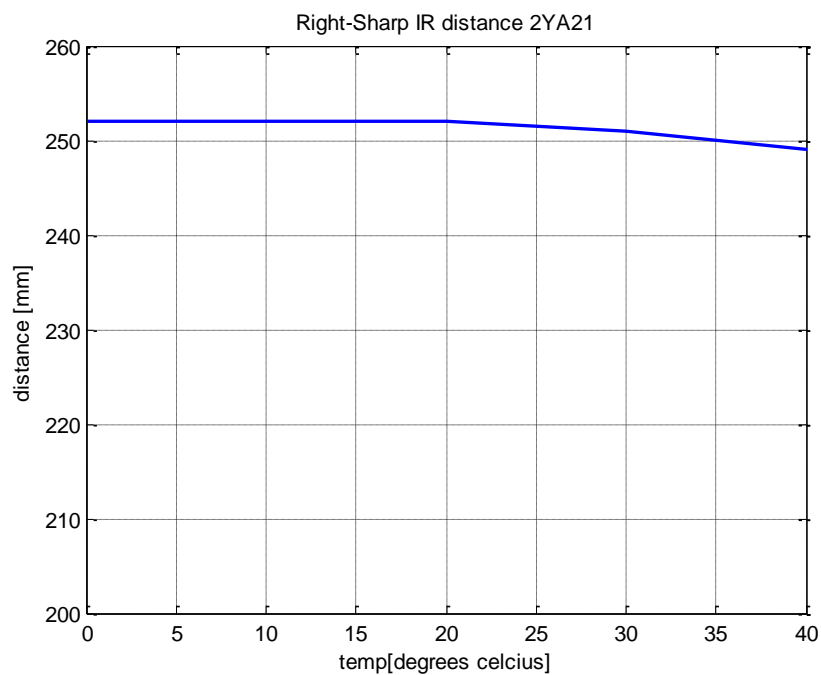
Figur 83: Temperaturtest av IR-avstandsmålere i klimaskap

En måleserie ved temperatuene 0, 10, 20, 30 og 40 °C ble gjennomført. Den lineariserende funksjonen (kapittel 12.3.3.3) var her implementert. Figur 84 viser temperaturavhengighet ved maks rekkevidde (30 cm) for sensoren 2D120XF.



Figur 84: Temperaturavhengighet for sensor med kort rekkevidde

Figuren viser et avvik på ca 17 mm for temperaturområdet 0-30 °C. Da sensorens utspenning er logaritmisk, blir avstandsfeilen mye større ved lange avstander enn ved små. Figur 85 viser temperaturavhengigheten ved en avstand på kun 25 cm for sensoren 2YA21. Denne har maksimal rekkevidde på 80 cm. Temperaturavhengigheten er her 5 mm for hele temperaturområdet.



Figur 85: Temperaturavhengighet for sensor med lang rekkevidde

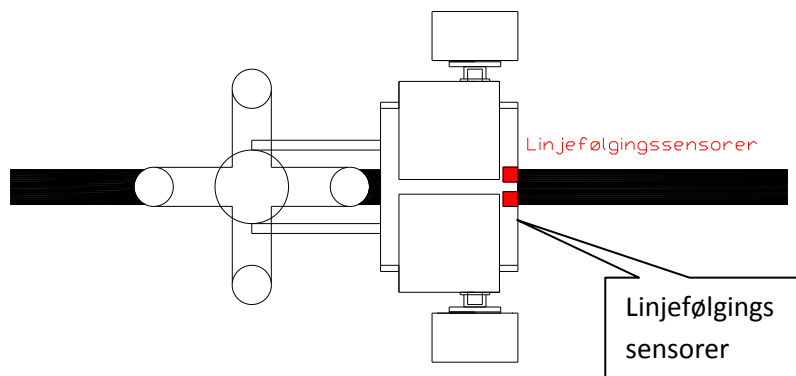
På grunn av lavere temperaturavhengighet i aktuelt måleområde bør sensoren 2YA21 benyttes i vårt tilfelle. På testtanken vil målinger på ca 45 cm være det maksimale. Temperaturavhengigheten blir betydelig større ved denne rekkevidden enn hva figuren viser. Ettersom temperaturvariasjoner kan oppstå, bør temperaturkalibrering av avstandssensorene gjennomføres for å oppnå god nøyaktighet.

8.5.4 Linjefølger

For presis posisjonering ved tankens øvre og nedre kant benyttes en linjefølger. Optiske linjefølgere finnes i mange varianter. For å følge en ensfarget linje må minimum to sensorelementer benyttes.

Plassering av sensorer

To lyssensorer foran detekterer robotens vertikale posisjon på linjen (sort). Dersom en av lyssensorene kommer utenfor linjen, kompenserer roboten ved å svinge til motsatt retning. Figur 86 viser aktuell plassering av linjefølgingsensorer på roboten. Optimal plassering av linjefølgingsensorene er foran robotens rotasjonssenter, CR_{robot} med en avstand lik halve akselavstanden. Dette gjelder for tohjulsroboter der begge hjulene kjører forover[25]. Av praktiske hensyn er ikke dette mulig, så sensorene plasseres så langt frem som mulig.



Figur 86: Plassering av linjefølgingsensorer

Ulempen med løsningen er dersom linjen er smal. Hvis roboten da kjører utenfor linjen med begge sensorene på en av sidene, vet den ikke hvor den er. For å gjøre linjefølgingen mer robust, kan det være aktuelt å ha en bredere linje eller flere sensorer ved siden av hverandre.

Fairchild QRE1113

QRE 1113 er en objektsensor som inneholder en IR-LED og en IR-fototransistor kombinert i en liten pakke. Sensorens optimale måleavstand er oppgitt til 3 mm, mens maksimalt anbefalt måleavstand er 9,5 mm [26]. Sensoren fås med analog eller digital utgang. Denne tar liten plass og er dermed godt egnet som linjefølgingsensor. Justering av lysfølsomheten skjer ved å justere lysstyrken på sensorens IR-LED. Dersom lysdiodens styrke styres av mikrokontrolleren, kan roboten selv foreta en kalibrering ved oppstart.



Figur 87: Fairchild QRE1113

8.6 Diskusjon

De valgte sensorenes stabilitet i det korrosive miljøet over lengre tid er ikke testet. De mest utsatte sensorene er trolig de optiske sensorene: IR-avstandsmålerne og linjefølgingsensorene. Dersom disse er lett påvirkelige av salt fra oppdettsmiljøet, risikerer man at løsningen ikke holder kravene.

En alternativ løsning med å benytte kun et linjefølgersystem for posisjonering bør da vurderes. Dette er enklere å implementere. Utfordringen ligger i å finne riktig materiale i linjene som er slitesterkt, har riktig friksjon og farge. Dersom en skade oppstår på en bit av linjene, risikerer man at roboten kjører seg vill.

En fordel med dagens løsning er at den er mer fleksibel med tanke på endret kjøremønster. Løsningen er også sikrere, da både avstandsmålere og linjefølgingsystem benyttes. Skade på en bit av linjene som skal følges vil her ikke ødelegge for posisjoneringen. En annen fordel med valgt sensoroppsett er muligheten til å benytte avstandsmålerne ved bevegelse på brosystemet. Ved kjøring i veikryss (kapittel 7.3.2), gir løsningen mulighet for nøyaktig posisjonering.

IR-avstandsmålere

I den gjennomførte testen av temperaturavhengighet for avstandsmålerne, var sensorene tilkoblet mikrokontrollerens ADC. I praksis betyr dette at noe av feilen i temperatur også kan komme fra ADC'en. Testen er allikevel god, ettersom det er den totale feilen som er av interesse.

8.7 Konklusjon

Tester av valgte sensorer tyder på at presis posisjonering på hele tanken er mulig kun ved hjelp av rimelige sensorer. Dette krever kalibrering med tanke på temperatur og farge. Kun en langtidstest vil vise om løsningen er stabil og god nok for bruk i et ferdig produkt.

9 Batteri og lading

Ettersom roboten er autonom, må den være trådløs. Dette gjør batteri til en nødvendighet. I prototypingsfasen ble kabel til en justerbar spenningsforsyning benyttet i stedet for batteri. Dette fordi en stabil spenning og langvarig testing var nødvendig. Opplading ville gi unødvendige avbrekk. Dette kapitlet forklarer bakgrunn og prinsipp for valg av batteri. De viktigste egenskapene til batteriet er følgende:

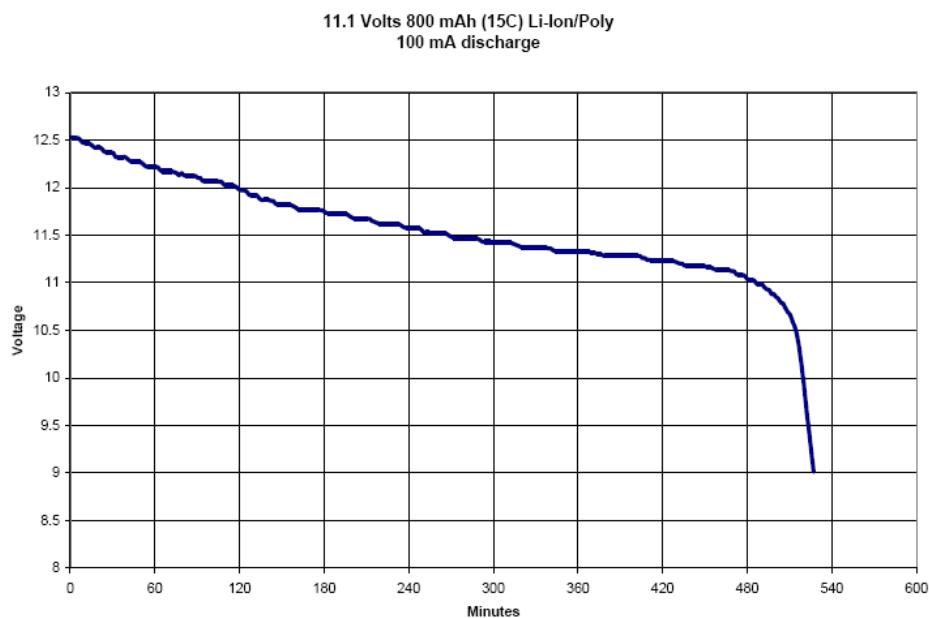
- Høy kapasitet
- Lav vekt
- Liten fysisk utforming
- Lang levetid

Batteriet må også kunne lades opp raskt nok slik at det har full batterikapasitet når neste rensing skal gjøres.

9.1 Batteriteknologi

Med tanke på vekt og ytelse, bør batteri med Lithium-ion polymer (LiPo) teknologi benyttes på roboten. Dette er velprøvd teknologi med en lav pris og lang levetid. Batteriene finnes i alle fysiske størrelser. Aktuelle batteripakker benyttes typisk på radiostyrte biler, båter og fly.

Cellespenningen til en LiPo-celle varierer fra ca 2,7 V utladet til 4,23 V oppladet [27]. Dette betyr i praksis at et LiPo-batteri ikke skal lades helt ut. Dersom dette gjøres, vil batteriet få skader og begrenset kapasitet. Figur 88 viser en typisk utladningskurve for en 3-celle LiPo-batteripakke [28] ved en konstant utladningsstrøm. Utladning under ca 9 V vil her gjøre skade på batteripakken.



Figur 88: Typisk utladningskurve for et 3-celle LiPo-batteri [28]

LiPo-batterier må beskyttes mot overlading, da dette kan føre til brann og eksplosjon. Det bør derfor benyttes en egnet intelligent lader for roboten. Typisk opplading av LiPo-batteri skjer ved en konstant ladestrøm til batterispenningen når 4,2 V. Deretter avtar ladestrømmen gradvis til ca 2-3 %

av opprinnelig ladestrøm. Da er batteriet fullt oppladet [27]. Typisk oppladningstid for et LiPo-batteri er 1,5 til 2 timer [29].

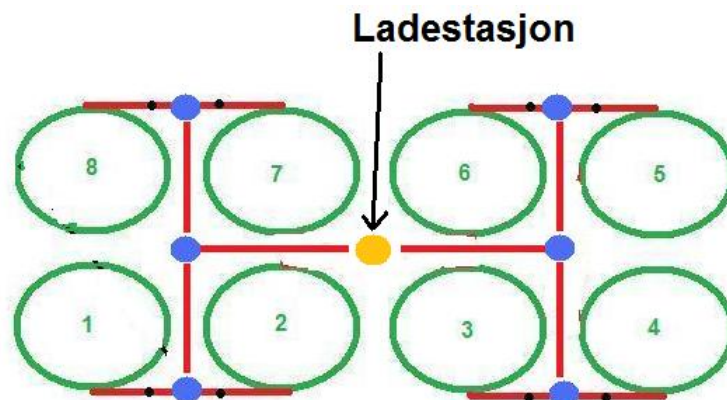
Kapasitet

Fordelen med batterier med stor kapasitet er at de kan lade samme energimengde tilsvarende raskere, og at spenningen forblir høyere under bruk. En stabil spenning på motorene vil gjøre regulatorer mindre påvirket av kjøretiden. Et oppladbart batteri vil også svekkes over tid. På roboten bør det derfor velges batteri med størst mulig kapasitet etter hvilken fysisk størrelse og vekt som tillates.

Nødvendig batterikapasitet beregnes ut i fra robotens energiforbruk og varighet på hver rensesprosess. Denne beregningen er ikke foretatt, da en oppgradering av motorer og en mer energibesparende sensorbruk vil gi betydelig lavere forbruk enn dagens. LiPo-batteriers kapasitet er avhengig av temperaturen. Under valg av batteripakke bør den derfor dimensjoneres med nok kapasitet for den aktuelle temperaturen.

Ladestasjon

Ladestasjonen til roboten monteres på brosystemet. Dette sikrer at roboten enkelt treffer ladepolene. Når poler på robotens underside kommer i kontakt med fjærbelastede poler på broen, har man en god forbindelse til laderen. På en tankrigg må minimum en ladestasjon monteres. Figur 89 viser mulig plassering av ladestasjonen på en tankrigg.



Figur 89: Plassering av ladestasjon på en tankrigg

Alternativt kan ladepoler monteres på flere steder på brosystemet. Da mikrokontrolleren registrerer når ladepolene er tilkoblet, kan ladepoler på hver bro benyttes for oppdatering av posisjonen.

9.2 Diskusjon

Av sikkerhetsmessige hensyn bør LiPo-batteripakken være pakket i en egnet brannsikker ladepose. Dette er en billig forsikring dersom noe skulle gå galt og batteriet ta fyr. Det er viktig at en egnet lader benyttes, for å minimere risikoen for feil under opplading.

Det er viktig at ladestasjonen og robotens ladepoler er av et materiale som leder strøm og ikke korroderer. Alternativt kan energien overføres ved hjelp av magnetisk induksjon.

9.3 Konklusjon

Det finnes ferdige batteriløsninger på markedet som er godt egnet til roboten. LiPo -batteripakker for RC-utstyr finnes i alle størrelser og har en lav pris. Disse er godt egnet til vårt system sammen med en

passende intelligent lader. Å finne en god batteriløsning på roboten er derfor ikke ansett som problematisk.

10 Trådløs kommunikasjon

10.1 Bakgrunn

Roboten er i utgangspunktet en selvstendig enhet uten behov for ekstern styring. Kommunikasjon med et brukergrensesnitt er likevel svært nyttig for å bestemme tidspunkter for rens av tanker, hvilke tanker som skal renses eller overvåkning. Et enkelt trådløst grensesnitt mot en datamaskin er derfor nødvendig. Dette er også spesielt nyttig i utviklingsfasen til feilsøking, logging av data og justering av parametre.

Typiske problemer med kortdistanse radiolinker er lisenskonflikter. Radiolinken mellom robot og PC bør derfor operere på ISM-bånd slik at man ikke trenger å tenke på dette. 2,4 GHz er en av de mest brukte ISM-frekvensene i verden, og inneholder derfor mye støy. I dette frekvensbåndet finnes bl.a. mikrobølgeovner, IEEE 802.11 (WLAN), 802.15.1 (Bluetooth) og 802.15.4 (ZigBee) [30].

10.2 Mulige teknologier

Både WLAN, Bluetooth og ZigBee er aktuelle trådløse teknologier som kan benyttes i systemet med godt resultat. Nødvendig rekkevidde til roboten vil i hovedsak være noen få meter innen samme rom. Behovet for sendereffekt og energiforbruk er derfor lavt. Det er kun enkle parametre som skal overføres mellom roboten og datamaskinen ved faste tidsintervaller. Behovet for overføringshastighet er dermed også begrenset.

WLAN er unødvendig komplekst og spesielt egnet for applikasjoner med behov for større båndbredde. Grensesnittet er ikke utviklet for lav energibruk. Både Bluetooth og Zigbee er teknologier med relativt lav energiforbruk [31]. Bluetooth er noe mer avansert og beregnet for høyere bitrater. Zigbee-protokollen er enklere og billigere enn andre WPAN protokoller, og dermed spesielt egnet for batteridrevne apparater [32].

10.3 Valgt teknologi

Digi Xbee benytter Zigbee-protokollen og velges på grunn av gode erfaringer fra tidligere prosjekter [33]. Xbee finnes i versjoner med sendeeffekt fra 1 til 60 mW som er kompatible med hverandre. Modulene er enkle å sette opp ved hjelp av Digi's diagnose/testverktøy X-CTU. Den kobles direkte til mikrokontrollerens USART-port. Mot PC finnes ferdige USB-grensesnitt som er godt egnede.



Figur 90: Xbee-modul

Praktiske tester gjennomført med modulene viser at laveffektmodulen på 1 mW har en praktisk rekkevidde på ca 20 m [33]. Dette er passende rekkevidde til formålet.

10.4 Diskusjon

I en trådløs dataoverføring kan man risikere tap av data. Dette ble erfart, spesielt ved stor rekkevidde. En kan også risikere påvirkning fra andre systemer som benytter lignende frekvenser. Det er derfor viktig at roboten er selstendig enhet som ikke er avhengig av en feilfri trådløs overføring for å fungere.

Utenom overføring av parametre benytter roboten den trådløse overføringen kun til logging av data. Under logging er det ikke kritisk om tap oppstår, ettersom det ikke har noen innvirkning på dens daglige drift. Når viktige parametre skal overføres fra PC til roboten er det svært viktig at dataoverføringen er helt korrekt. For å sikre dette, er det implementert en egen kontroll i overføringen. Dette forklares nærmere i kapittel 12.3.2.

10.5 Konklusjon

Digi Xbee's løsning med kompatible moduler for ulike sendereffekter er en smart løsning som gjør oppgraderinger av robotens rekkevidde svært enkelt. Kontinuerlig bruk av den trådløse overføringen underveis i prosjektet har vist at systemet har gode egenskaper og er stabilt. Det kan konkluderes med at Zigbee-teknologi er godt egnet til formålet.

11 Elektronikk design

I dette kapitlet blir de viktigste løsningene i elektronikkdesignet forklart.

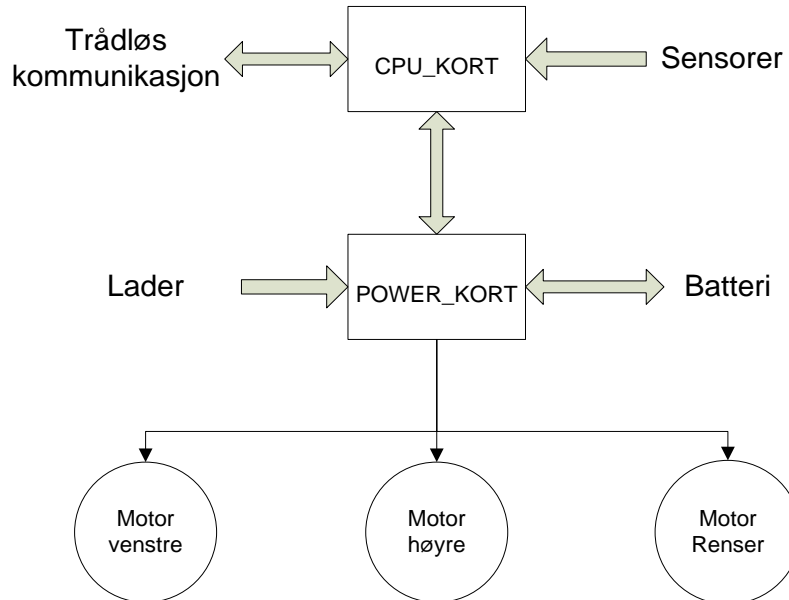
11.1 Bakgrunn

Roboten må nødvendigvis inneholde en del elektronikk for å fungere. Kraftelektronikken tar hånd om styring av motorene og lading av batteriet. Både analoge og digitale kretser sammen med en mikrokontroller sørger for å utføre nødvendige beregninger basert på sensordata. Robotens elektronikk består i hovedsak av følgende:

- Mikrokontroller
- Motordrivere
- Sensorinterface
- Sikkerhetskretser
- Spenningsregulatorer

11.2 Valgte løsninger

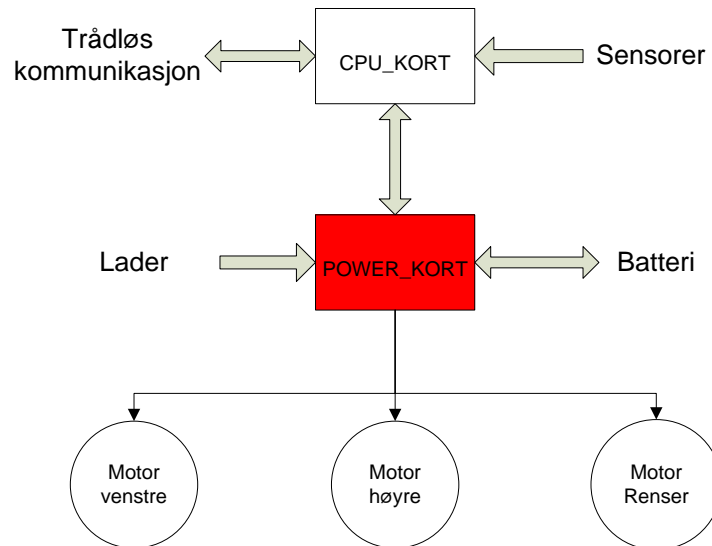
For å gjøre roboten fleksibel er det lurt å dele opp elektronikken i flere kretskort. Det er viktig å holde kraftelektronikk og sensorer adskilt, da for eksempel støy fra motorstyringene vil påvirke mer ømfintlige analoge sensorsignaler. Et eget Power-kort for motordriverne og et CPU-kort for resten av elektronikken bør derfor designes. Dersom motorer og motordriverne må dimensjoneres opp for en større robot, kan da samme CPU-kort benyttes.



Figur 91: Prinsipp for oppdeling i to kretskort

11.3 Power-kort

Til å forsyne alle tre motorene og CPU-kortet med strøm fra batteriet, trengs en fordeling der alt kan tilkobles. I tillegg behøves en motordriver til hver motor for å gjøre hastighetsregulering og retningsvending mulig. Et eget Power-kort gjør det hele kompakt og ryddig.



Figur 92: Power_kort

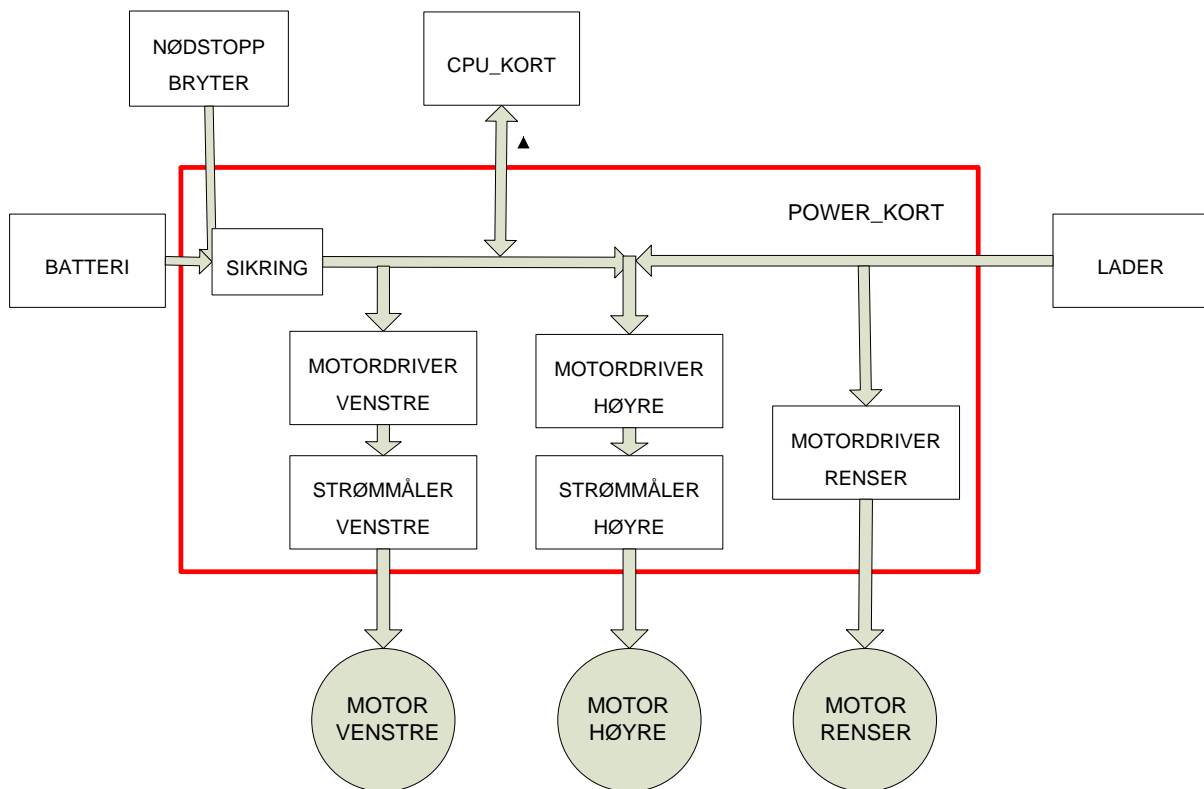
Krav

Kravene til Power-kortet ble spesifisert som følger:

- Egen sikring til batteriet
- Tilkobling til nødstopbryter
- Tåle motorstrømmer for aktuelle motorer
- Strømmålere for hver motor til fremdrift
- Plugger til alle kabler
- Tilkobling til ladestasjon med kortslutningssikkerhet

11.3.1 Løsninger

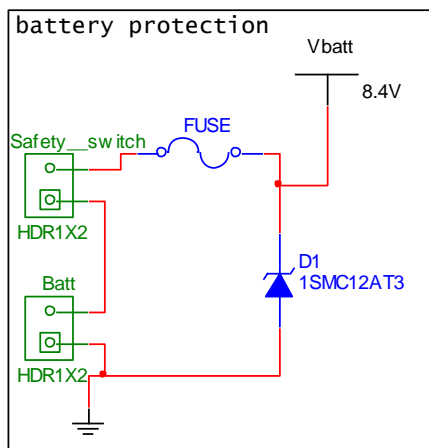
Figur 93 viser en prinsippkisse for Power-kortets oppbygning.



Figur 93: Prinsipp Power-kort

Nødstoppbryter og sikring til batteriet

En nødstoppbryter kobles i serie med batteriet. Denne må være av typen normalt lukket. Sikringen kobles i serie med batteriet og nødstoppbryteren.



Figur 94: Nødstop og sikring til batteriet

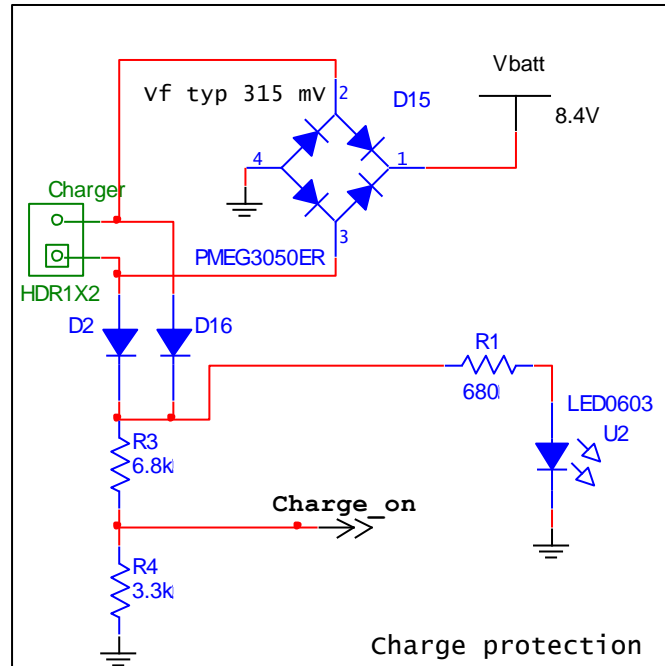
Dioden D1 er høyeffekts zener-transientdioder for beskyttelse mot overspenninger. Transienter kan typisk oppstå ved frakobling eller tilkobling av laderen eller batteriet. D1 fungerer i tillegg som beskyttelse mot feil polaritet ved at hovedsikringen FUSE da ryker.

Tilkobling til ladestasjon med kortslutningssikkerhet og bidireksjonell tilkobling

Det er ønskelig robotens batteri ikke skal kortslutte hvis man kommer i kontakt med dens ladepoler med en metallgjenstand. Dette er viktig for sikkerheten, da store strømmer kan oppstå og batteriet

kan ta fyr. Kortslutningssikkerhet på polene oppnås ved å sette diode i serie med ladekretsen. Da hindres strømmen å gå fra robotens batteri til ladepolene i uønsket retning.

Ettersom ladepolene moteres på brosystemet, vil roboten passere ladepolene kjørende fra begge retninger. I praksis vil da tilkoblingen til laderen skje med forskjellig polaritet dersom polene plasseres symmetrisk om broens midtpunkt. For å løse dette problemet og ha mulighet for lading i begge retninger, benyttes en likeretterbru. Figur 95 viser koblingen. Lading av batteri vil her skje uansett hvilken polaritet laderen har.



Figur 95: Ladekrets

Ulempen med likeretterbro i motsetning til en enkelt diode, er at spenningsfallet over broen blir det dobbelte. I praksis er ikke dette noe problem, da laderens spenning kan justeres opp tilsvarende. Det benyttes dioder med lavt spenningsfall, og som tåler den forventede maksimale ladestrømmen. Lavere spenningsdropp gir mindre varmetap som må avledes. PMEG3050EP ble valgt til formålet. Denne har et spenningsdropp på 315 mV og tåler en strøm på 5 A kontinuerlig [34]. Maks reversspenning er 30 V. Ved 5 A ladestrøm har man da et varmetap P_{tap} i hver diode på:

$$P_{tap} = U_{diode} * I_{ladestrøm} = 0,315V * 5A = 1,58W \quad (11.1)$$

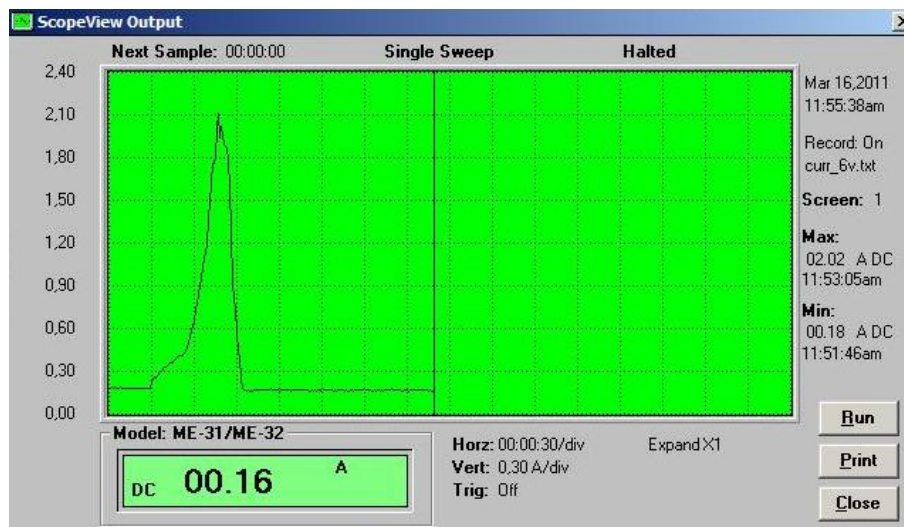
Den totale effektutviklingen i diodebroen blir dermed over 3 W. Dette er mye effekt som det bør tas hensyn i utlegget.

Diodekoblingen D2 og D16 sammen med R3 og R4 fungerer som en logisk ELLER-funksjon. Hvis laderen er tilkoblet en av retningene, vil mikrokontrolleren da registrere et høyt `charge_on` signal. Denne informasjonen har programmet stor nytte av. Dette gjelder spesielt ved posisjonering inntil ladestasjonen. Dioden U2 er en lysdiode for å vise at laderen er tilkoblet. Det kan være ønskelig at denne plasseres lett synlig på roboten.

Motordrivere

Alle de tre motorene benyttet på prototypen er av samme type. Derfor ble det valgt å konstruere tre identiske motorstyringer. Det er ønskelig å kunne styre motorene med et varierende turtall i begge retninger. Siden det er DC-motorer som skal styres, er en motorstyring basert på typisk H-bro topologi løsningen.

Motorenes strømtrekk er ikke oppgitt i databladet. For å sikre kraftig nok dimensjonerte motordrivere, ble det derfor gjennomført en strømmåling av en motor. Testen ble gjort med en konstant spenning på 6 V og varierende belastning. Målingen ble gjort med et multimeter av typen Metex ME-32 med loggeprogram på PC. Største belastning ble oppnådd ved å holde fast motorens aksel. Figur 96 viser et plott av strømmen ved en økende belastning.

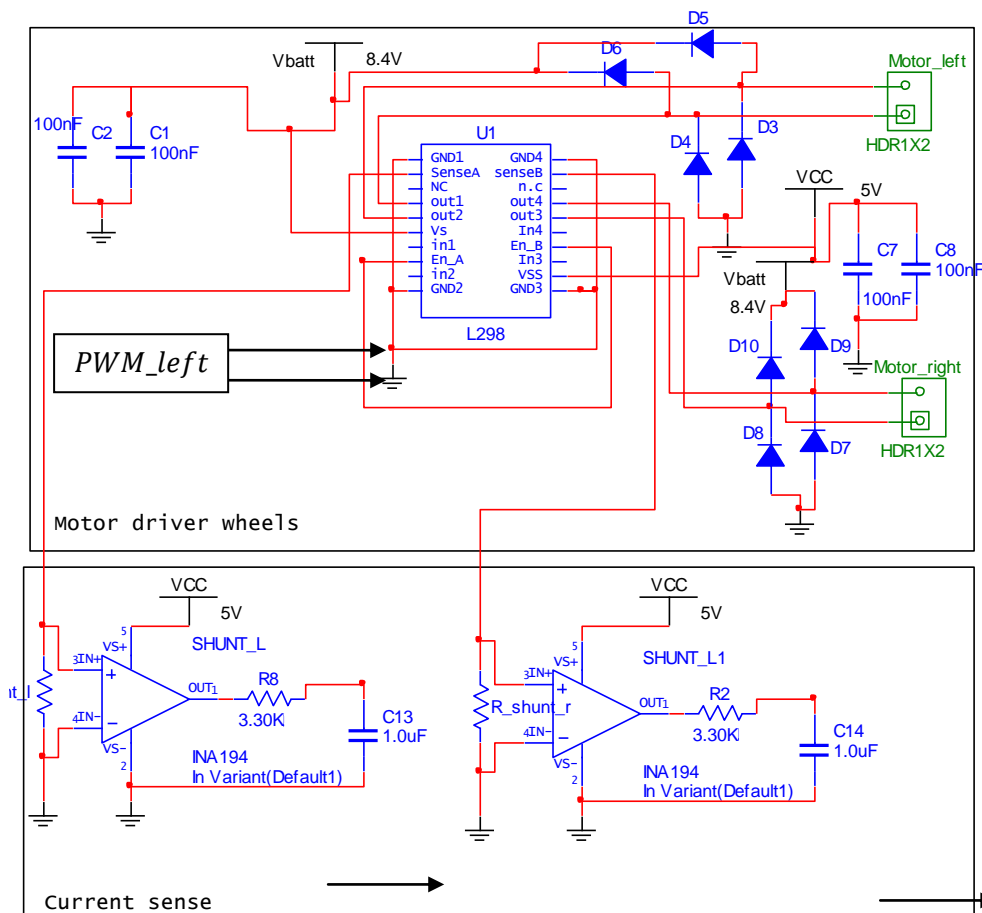


Figur 96: Maksimalt strømtrekk motor

Ubelastet trekker motoren ca 0,2 A. Maksimalt strømtrekk ble målt til 2,02 A. Ved normal kjøring vil strømmen trolig ligge på rundt 1 A. Det finnes mange integrerte motordriverkretser som passer til dette formålet. Fordelen med en integrert motordriverpakke er at en sparer komponenter og plass i designet.

ST L298N

Motordriverkretsen L298N fra STMicroelectronics er en motordriver som passer bra til formålet. Denne inneholder to komplette motordrivere i en og samme pakke. Maksimal motorstrøm er oppgitt til 2 A kontinuerlig på hver motor [35]. Kretsen har en temperaturbeskyttelse innebygd. Alle kretsens signaler er TTL compatible, og den egner seg dermed godt sammen med en mikrokontroller. Figur 97 viser skjema for motordrivere med strømmålere for venstre og høyre hjul.

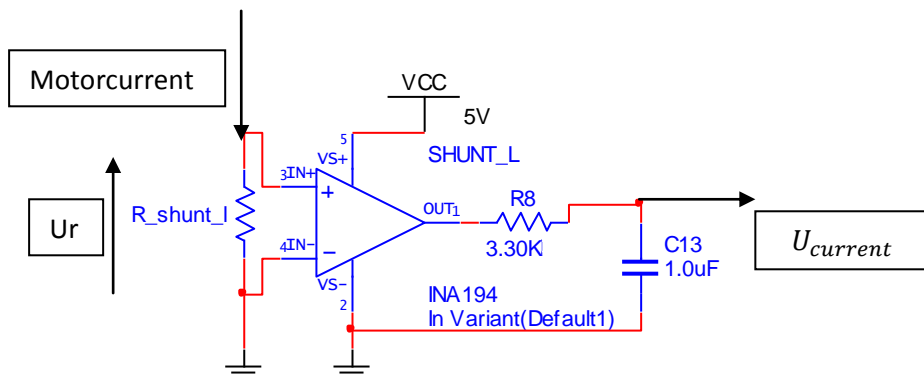


Figur 97: To motordrivere med strømmålere

Diodene D3-D10 i kretsskjemaet er flyback-dioder. Her benyttes hurtige dioder for å beskytte utgangstrinnet mot industert spenning fra den induktive lasten. Dioder med lav *reverse recovery time* velges [35].

Strømmåling motorer

Det er ønskelig å benytte strømmåling i hver motor som tilbakekobling i regulatorer eller for overvåkning. Strømmålerne til motordriverne trenger kun å måle strøm i en retning på grunn av utgangstrinnets design. Kretsen INA194 [36] benyttes her sammen med en shuntmotstand R_{shunt} på 20 mΩ.



Figur 98: Strømmåler motor

INA194 takler common-mode spenninger på opptil 80 V og har en gain på 50. Ved en strøm på 2 A gjennom motoren, er spenningen U_r over shuntmotstanden R_{shunt} på:

$$U_r = R_{shunt} * I_{motor} = 0,02\Omega * 2A = 40mV \quad (11.2)$$

Utgangen fra strømmåleren får dermed spenningen:

$$U_{current} = U_r * Gain = 40mV * 50 = 2,0V \quad (11.3)$$

Denne spenningen leses av på en ADC-konverter med range ca 3,3 V. Effekten P_{shunt} i shuntmotstanden er ved msmall motorstrøm 2 A:

$$P_{shunt} = R_{shunt} * I_{motor}^2 = 0,02\Omega * 2A^2 = 80mW \quad (11.4)$$

Vi ser at ingen effektmotstand behøves. Utgangen til strømmåleren filtreres med et 1. ordens lavpassfilter for å fjerne støy og impulser fra motorene. Koblingen R8 og C13 tar seg av dette. Her er knekkfrekvensen f_c satt til:

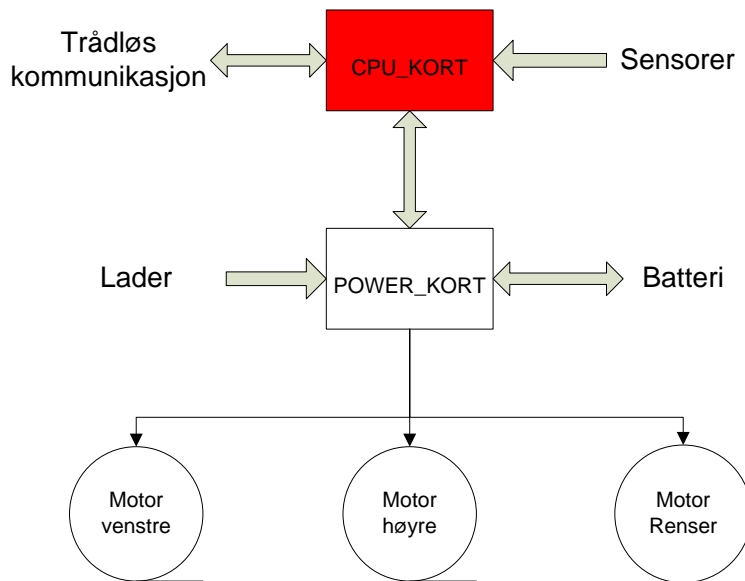
$$f_c = \frac{1}{2 * \pi * R6 * C1} = \frac{1}{2 * \pi * 3300 * 10^{-6}} = 48Hz \quad (11.5)$$

Hvilken knekkfrekvens som settes her er ikke kritisk. Man ønsker å fjerne støyen fra PWM-frekvensen som gjerne er 5-20 kHz, før signalet ledes over til CPU-kortet. Dersom knekkfrekvensen settes for lavt, blir målingene ubrukelige i reguleringssammenheng.

Skjema

For komplett kretsskjema for Power-kortet, se vedlegg C.

11.4 CPU-kort



Figur 99: CPU_kort

Til å styre roboten og utføre alle nødvendige beregninger benyttes en mikrokontroller. Her finnes det mange alternativer avhengig av hvilken ytelse og hvilke finesser man trenger. Ettersom mikrokontrolleren må tilkobles eksterne sensorer og utstyr, må et kretskort med konnektorer tilpasses formålet.

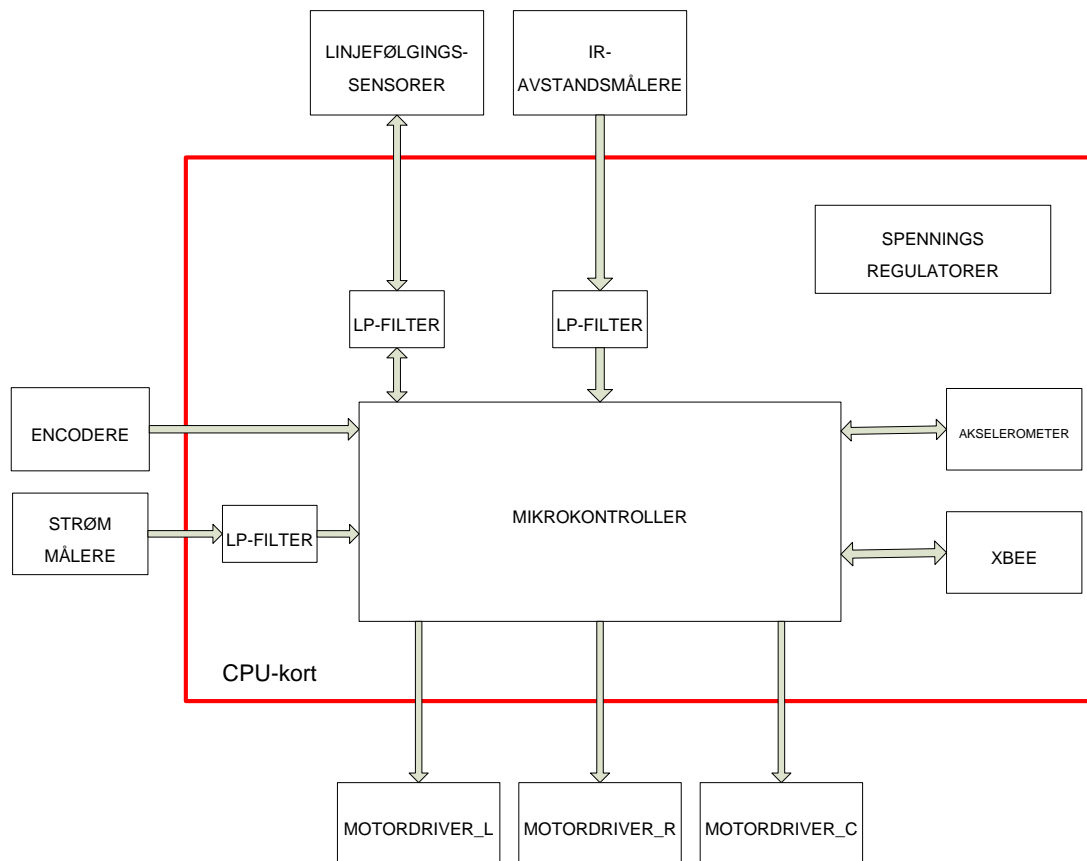
11.4.1 Krav

Kravene til CPU-kortet ble spesifisert som følger:

- Tilstrekkelig prosessorkraft og programminne til å utføre avanserte beregninger
- Tilstrekkelig EEPROM minne for å lagre viktige data og parametre
- Utganger for styring av motordrivere
- Programmerings-/debuggingsinterface
- Trådløs kommunikasjon med PC
- Lese av strømmålere fra Power-kortet
- Analoge og digitale interface for avlesing av sensordata

11.4.2 Løsninger

Figur 100 viser en forenklet modell for CPU-kortet med interne komponenter og ekstern tilkobling.



Figur 100: Blokkdiagram for CPU-kortet

11.4.2.1 Mikrokontroller

Det finnes en mengde mikrokontrollere på markedet som alle oppfyller kravene vi har stilt. Valget av mikrokontroller falt på Atmel XMega256A3 [37]. Det på grunn av god erfaring med XMega fra tidligere robotprosjekt [33], og at kontrolleren oppfyller de kravene som er stilt. En rekke drivere og løsninger kan dermed vidreføres fra eksisterende programvare. Dette bidrar til å forenkle utviklingsprosessen.

ATXMEGA256A3 er en 8-bits prosessor med 64 pinner. Følgende nøkkelspesifikasjoner er gitt [37]:

- Klokkehastighet opptil 32 MHz, intern RC-oscillator
- 256 KB flash
- 16 KB SRAM
- 4 KB EEPROM
- 4-8 KB Boot Code section
- Innebygd kvadraturteller
- 7 stk 16-bits timere/countere
- 7 stk USART-interface
- 2 stk TWI (I²C) interface
- 3 stk SPI-interface
- 2 stk 8-kanals 12-bit ADC
- 1 stk 2-kanals 12-bit DAC
- 4 stk analoge komparatorer
- PDI programmering-/debuggingsinterface

Tilkobling til enkodere

Atmel Xmega har innebygd kvadraturteller. Dette minimerer behovet for eksterne komponenter.

Utganger for styring av motordrivere

Hver av motordriverne styres med to PWM hastighetssignaler. Dette settes opp med timere og digitale utganger.

Programmering-/debuggingsinterface

PDI programmering-/debuggingsinterface bruker kun 2 ledere. Dette velges til fordel for ISP og JTAG.

Tilkobling til trådløs kommunikasjon

Kommunikasjon med Xbee trådløs-transceiveren gjøres via mikrokontrollerens UART-port.

Lese av strømmålere

Strømmålerne til motorene leses av med den innebygde ADC'en.

IR-avstandsmålere og linjefølgingssensorer

Analoge spenninger fra avstandssensorene og linjefølgingssensorene leses av i den innebygde ADC'en. Lysstyrken til hver av linjefølgingssensorene styres fra mikrokontrollerens innebygde DAC.

Akselerometer

Kommunikasjon mellom mikrokontroller og akselerometer skjer over SPI-interface.

Lysdioder

Lysdioder koblet til mikrokontrollerens digitale utganger benyttes for å indikere status.

Reset

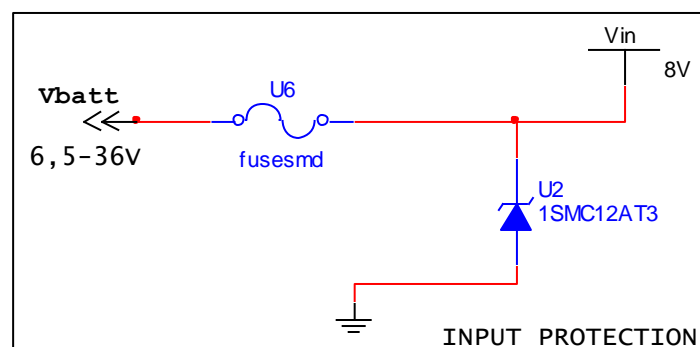
CPU-kortet utstyres med en resetbryter som resetter både mikrokontrolleren og Xbee-transceiveren.

Deteksjon av lader tilkoblet

Deteksjon av tilkoblet lader skjer ved å lese det logiske nivået på signalet *charge_on*.

11.4.2.2 Beskyttelseskretser

Kortslutninger eller overspenninger kan få store konsekvenser for elektronikk og sensorer. Følgende beskyttelseskretser implementeres på CPU-kortet som ekstra sikkerhet:



Figur 101: Beskyttelseskretser

Sikring

Som beskyttelse mot kortslutning på CPU-kortet benyttes en automatsikring $U6$ serie med tilførselsstrømmen. Denne er relativt kvikk og løser ut ved strømmer over 0,5 A.

Høyeffekts zener-transientdiode

Som ekstra sikkerhet mot transienter, overspenninger og feil polaritet kobles en zenerdiode U2 i parallell med innspenningen. Denne fjerner alle transienter over ca 12 V.

11.4.2.3 Spenningsregulatorer

Til mikrokontrolleren, sensorer og andre kretser trengs en regulert spenning som har minimalt med støy. Spenningsstilførselen til CPU-kortet kommer fra batteri og er dermed påvirket av motordrivere og batterinivå. Tilførselen vil derfor ha både varierende støy og nivå.

Nødvendige spenninger på CPU-kortet er:

- 3,3 V til mikrokontroller
- 3,3 V til trådløs transceiver
- 3,3 V til akselerometer
- 3,3 V til linjefølgingsensorer
- 5 V til optiske enkodere
- 5 V til IR-avstandsmålere

Switch-mode eller lineære spenningsregulatorer

Om lineære regulatorer eller switch-mode regulatorer bør brukes handler både om energieffektivitet og batterispenning inn på CPU-kortet. Ingen av de valgte sensorene behøver tilført spenning over 5 V. Ved bruk av en moderne LDO-regulator, vil en batterispenning som alltid ligger over ca 5,1 V være tilstrekkelig. Et 2-cellers LIPO-batteri skal aldri tappes ned under ca 6,0 V [27]. I praksis kan derfor både lineære og switch-mode regulatorer benyttes. For å vurdere varmeutviklingen ved bruk av lineærregulatorer, kan man se på følgende eksempel.

Eksempel:

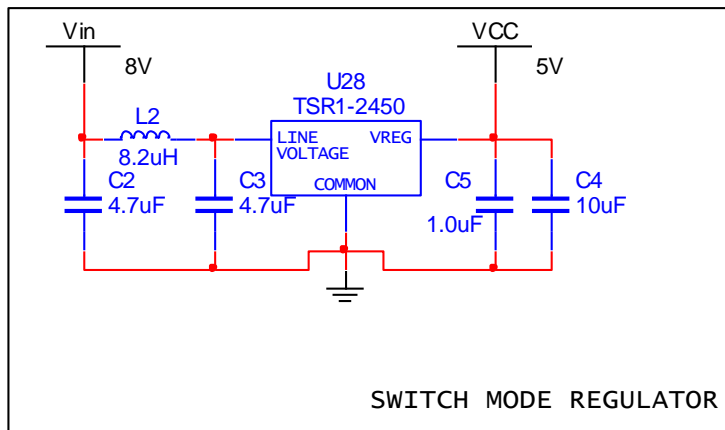
Vi antar at batterispenningen er på 8,4 V. All elektronikk antas å benytte 3,3 V. Dersom man har et totalt strømforbruk på 0,5 A på CPU-kort og sensorer totalt, vil varmetapet i en 3,3 V lineærregulator være på:

$$P_{\text{varmetap}} = U * I = (8,4 \text{ V} - 3,3 \text{ V}) * 0,5 \text{ A} = 2,55 \text{ W}$$

Dette krever unødvendig mye energi fra batteriet og begrenser den maksimale kjøretiden. Dersom det oppgraderes til et batteri med flere celler, øker varmetapet tilsvarende. For å begrense effekttapet noe, benyttes en switch-regulator som en felles hovedforsyning for CPU-kortet og sensorer.

TSR1-2450

Switch-regulatoren TSR1-2450 fra Traco Power har en virkningsgrad på 84-94 % [38]. Denne er konstruert for innspenninger i området 6,5-36 VDC. Regulert utspenning er 5 VDC. Figur 102 viser koblingsskjema for switch-regulatoren med nødvendige filterkretser.

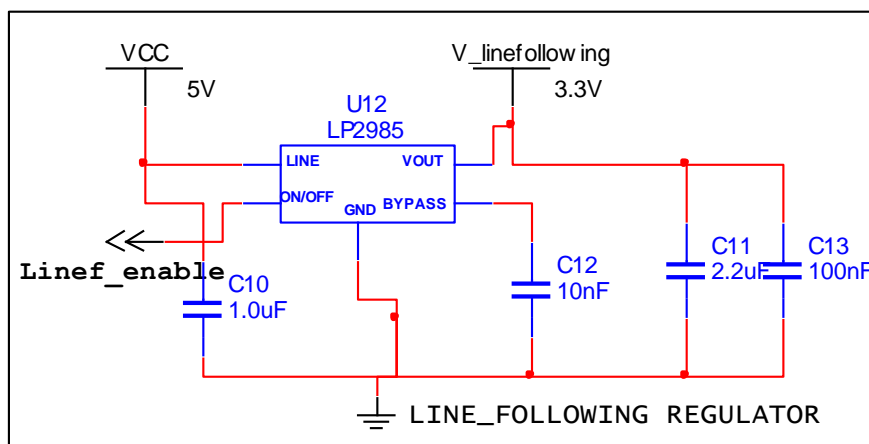


Figur 102: Traco Power TSR1-2450

Batterispennning på opptil 36 V kan dermed tilføres CPU-kortet uten å endre energiforbruket betydelig. Utspenningen VCC brukes som innspenning til andre LDO-regulatorer for 3,3 V og 4,8 V.

3,3 V til linjefølgingsensorer

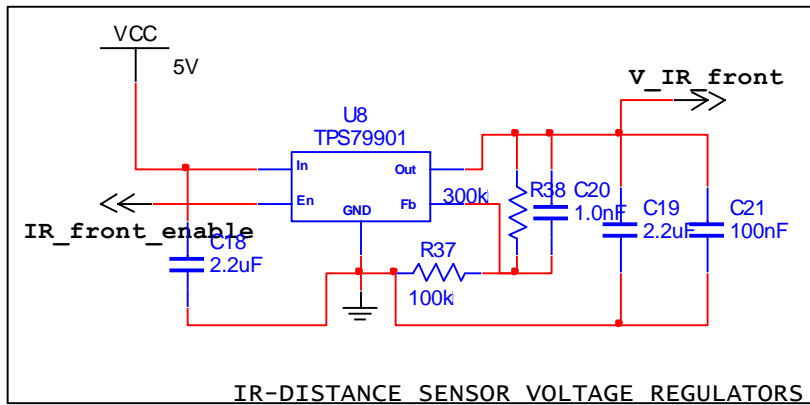
Linjefølgingsensorene trenger en regulert og stabil 3,3 V spenning. Regulatoren LP2985 [39] fra Texas Instruments benyttes til formålet. Denne er relativt nøyaktig, og har en enable-inngang. Enable benyttes av mikrokontrolleren for å slå av linjefølgingsensorene i perioder de ikke behøves, som et bidrag til energisparing. Figur 103 viser skjema for regulatoren.



Figur 103: Spenningsregulator for linjefølgingsensorer

4,8 V til IR-avstandsmålere

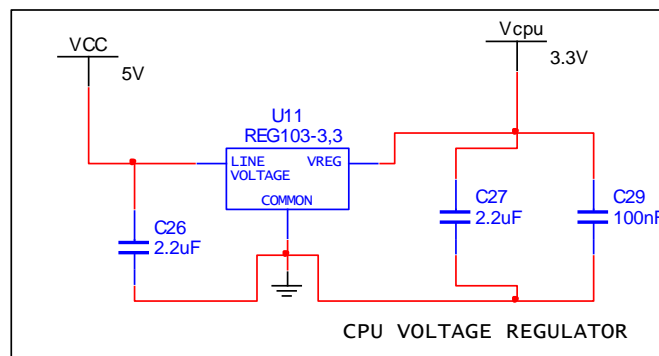
IR-avstandsmålerne krever en spenning mellom 4,5 V og 5,5 V [24]. Hver sensor har en innebygd spenningsregulator, så tilført spenningsnivå er ikke kritisk. Ettersom det er ønskelig å kun benytte avstandsmålerne ved behov, velges en LDO-regulator med enable-inngang for hver sensor. LDO-regulatoren TPS79901 [40] settes opp til å gi en regulert spenning på 4,8 V til hver sensor. Figur 104 viser koblingskjema for en av regulatorene. TPS79901 har en *dropout voltage* på kun 30 mV ved en strøm på 50 mA [40]. Dette gjør den godt egnet til formålet.



Figur 104: Spenningsregulator til en IR-avstandsmåler

3,3 V til mikrokontroller og trådløs kommunikasjon

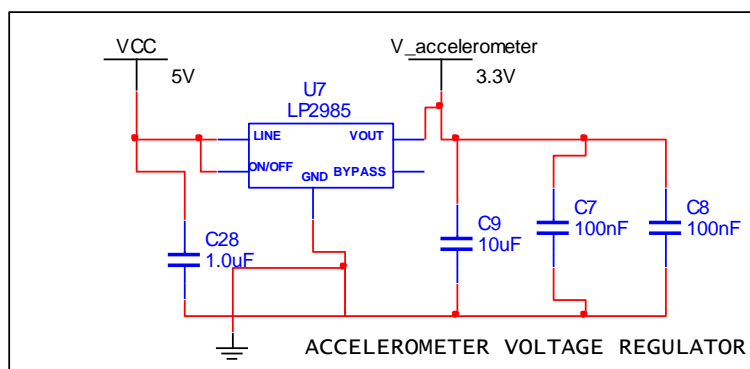
Mikrokontrolleren trenger en stabil spenning for å fungere optimalt. Her velges LDO-regulatoren REG103-3.3 [41] fra Texas Instruments. Denne leverer en regulert 3,3 V, maksimalt 500 mA. Avkobling nær trådløsmodule og mikrokontrolleren er her viktig.



Figur 105: Regulator for mikrokontroller og Xbee

3,3 V til akselerometer

Akselerometeret trenger en stabil spenning for å få en god nøyaktighet. Her benyttes tilsvarende regulator LP2985 [39] som for linjefølgingsensorene. På grunn av akselerometerets lave strømforbruk benyttes ikke enable-funksjonen.



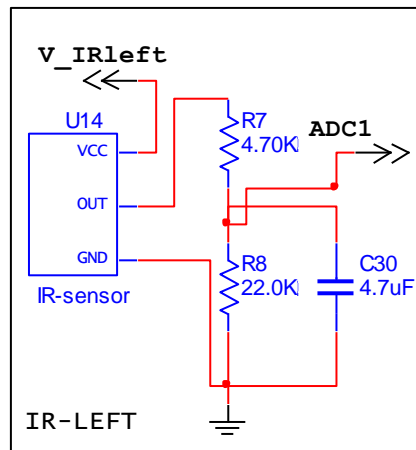
Figur 106: Regulator for akselerometer

11.4.2.4 Sensorinterface

Mikrokontrolleren opererer på 3,3 V. Analoge sensorer med en høyere utspenning må dermed konverteres ned til målbart område for at mikrokontrollerens ADC ikke skal gå i metning. Også lavpassfiltrering av analoge sensorsignaler er viktig for å hindre aliasing.

IR-avstandsmålere

IR-avstandssensorene Sharp GP2Y0A21 en analog utspenning i området 0-3,2 V [24]. Under testing viste det seg at mikrokontrollerens ADC går i metning ved ca 3,0 V. En spenningsdeler benyttes derfor for å sikre at dette ikke skjer. Figur 107 viser koblingen mellom en IR-sensor og ADC1.



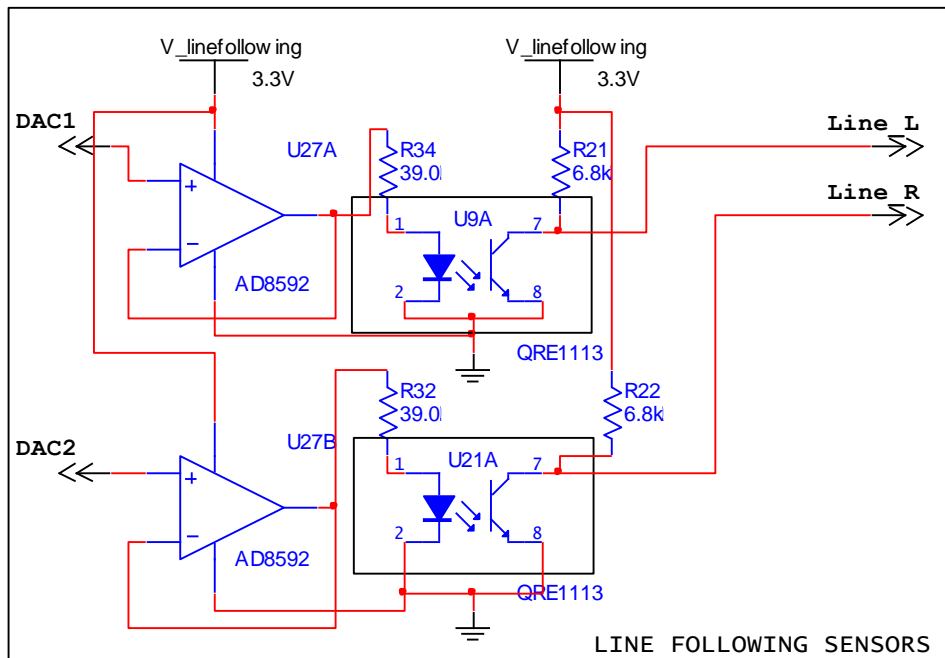
Figur 107: Interface for en IR-avstandsmåler

Et lavpassfilter implementeres ved mikrokontrolleren for å fjerne uønsket høyfrekvent støy. Knekkfrekvensen til filteret settes til:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi * (R7 || R8) * C30} = 8,8\text{Hz} \quad (11.6)$$

Linjefølgingsensorer

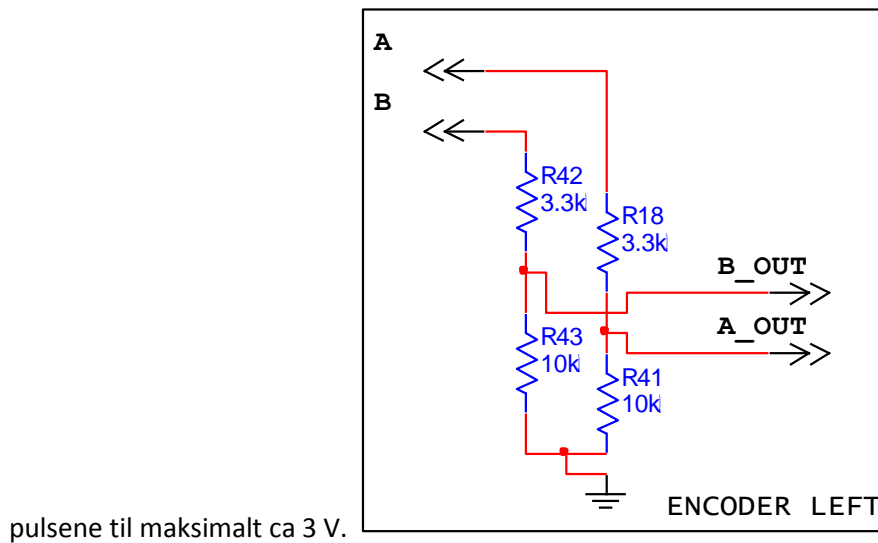
Lysstyrken fra hver av linjefølgingsensorenes IR-emittere styres fra mikrokontrollerens DAC. Dette gir en mulighet for kalibrering av sensorene i programmet. Operasjonsforsterkere av typen AD8592 (U27) benyttes som buffere til diodene [42]. Figur 108 viser koblingsskjema for begge linjefølgingsensorene. Signalene *Line L* og *Line R* leses av i mikrokontrollerens ADC.



Figur 108: Koblingskjema for linjefølgingsensorer

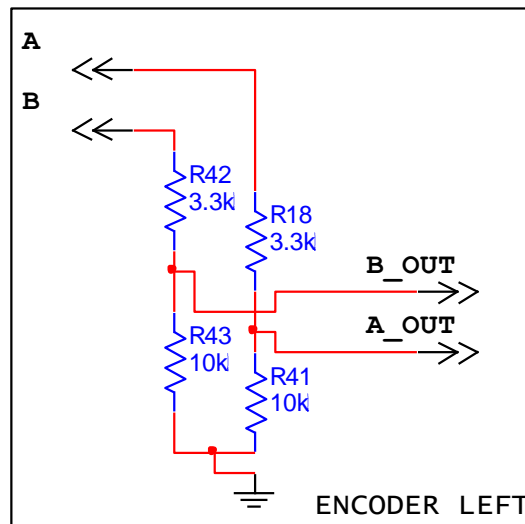
Enkodere

Enkoderen Bourns ENC1J [19] gir et logisk høyt nivå på ca 4 V på kvadraturutgangene A og B. Som beskyttelse av mikrokontrollerens innganger benyttes derfor en spenningsdeler som begrenser



pulsene til maksimalt ca 3 V.

Figur 109 viser spenningsdelere for en enkoder

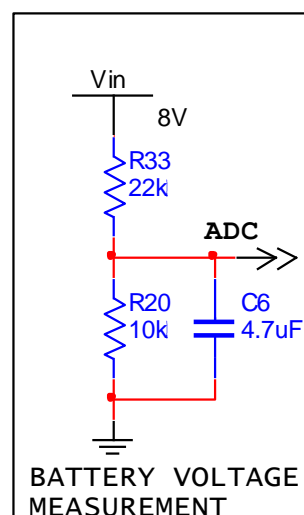


Figur 109: Spenningsdelere for en enkoder

Måling av batterispennning

Mikrokontrolleren overvåker batteriets spenning kontinuerlig. I praksis må spenningen deles ned til målbart område for ADC'en. Et lavpassfilter implementeres for å fjerne uønsket støy. Filterets knekkfrekvens settes lavt:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi * (R20 || R33) * C6} = 4,9\text{Hz} \quad (11.7)$$



Figur 110: Spenningsdeler og LP-filter for spenningsmåling

Skjema

For komplett skjema for CPU-kortet, se vedlegg C.

11.5 Diskusjon

Dette kapitlet viser det planlagte kretskortdesignet for roboten. På grunn av avvik i tidsplanen, ble utlegg av kretskortene nedprioritert. De fleste løsningene ble testet underveis.

I prototypingsfasen ble kretser montert på egne breakout-boards med ledninger mellom. Dette gjør elektronikken plasskrevende og lite robust. Fordelene med stor fleksibilitet var allikevel større i den tidlige utviklingsfasen.

Motordriver

Den benyttede motordriveren benytter bipolare transistorer i utgangstrinnet. I forhold til en moderne motordriver med MOSFET-transistorer i utgangstrinnet, er denne mye tregere i switchingen. Dette medfører større varmetap, og den totale virkningsgraden blir lavere. I et forbedret design bør det derfor oppgraderes til moderne motordrivere med en høyere virkningsgrad og gjerne med et digitalt interface.

Mikrokontroller

På prototypen ble mikrokontrolleren Xmega32A4 benyttet. Denne er stort sett lik XMega256A3 som er valgt i det planlagte designet, men med 44 i stedet for 64-pinner. På grunn av økende behov for I/O og timere i prosjektet, ses behov for en oppgradering til XMega256A3. A3-utgaven har sju timere, mens A4-utgaven kun har fem. Dette innebærer kun små endringer i programvaren.

Sanntidsklokke/kalenderkrets

En separat klokke/kalenderkrets ble vurdert brukt sammen med mikrokontrolleren for å starte renseprosessen til ønskede tider. På grunn av den trådløse overføringen, er en klokke/kalenderkrets overflødig på roboten. Dersom en forenklet robot uten trådløs kommunikasjon skal konstrueres, er dette en mulig løsning.

Strømmålere

Strømmålere for motorene ble designet inn for å benyttes i regulatoren. Disse er pr i dag ikke benyttet. Da momentet i en DC-motor er tilnærmet proporsjonalt med motorstrømmen [13], vil en tilbakekobling være nyttig i en lineariserende controller (kapittel 0). Motorenes moment kan også benyttes for å overvåke maksimale friksjonskrefter i rensesystemet. Dette i form av alarmer eller som hjelp under utvikling.

11.6 Konklusjon

Robotens løsning inneholder lite og enkel elektronikk. Dette er gunstig, da lite feil kan oppstå og kretskortene kan lages fysisk små. Med moderne motordrivere blir den komplette løsningen relativt energieffektiv. Det planlagte designet sammen med en smart programvare for bevegelse og sensorbruk, vil begrense energiforbruket. Tester med dagens prototype viser at elektronikken fungerer bra uten synlige feil.

12 Programvare på robot

12.1 Bakgrunn

Roboten skal håndtere mange krevende oppgaver uten menneskelig hjelp. Dette kan kun løses med programvare tilpasset roboten. Programvarens hovedoppgaver er følgende:

- Estimere egen posisjon på grunnlag av sensordata
- Kjøre etter angitt rute for å traversere en hel tank
- Benytte brosystem for å velge riktige tanker
- Finne tilbake til ladestasjonen
- Kommunikasjon med PC trådløst

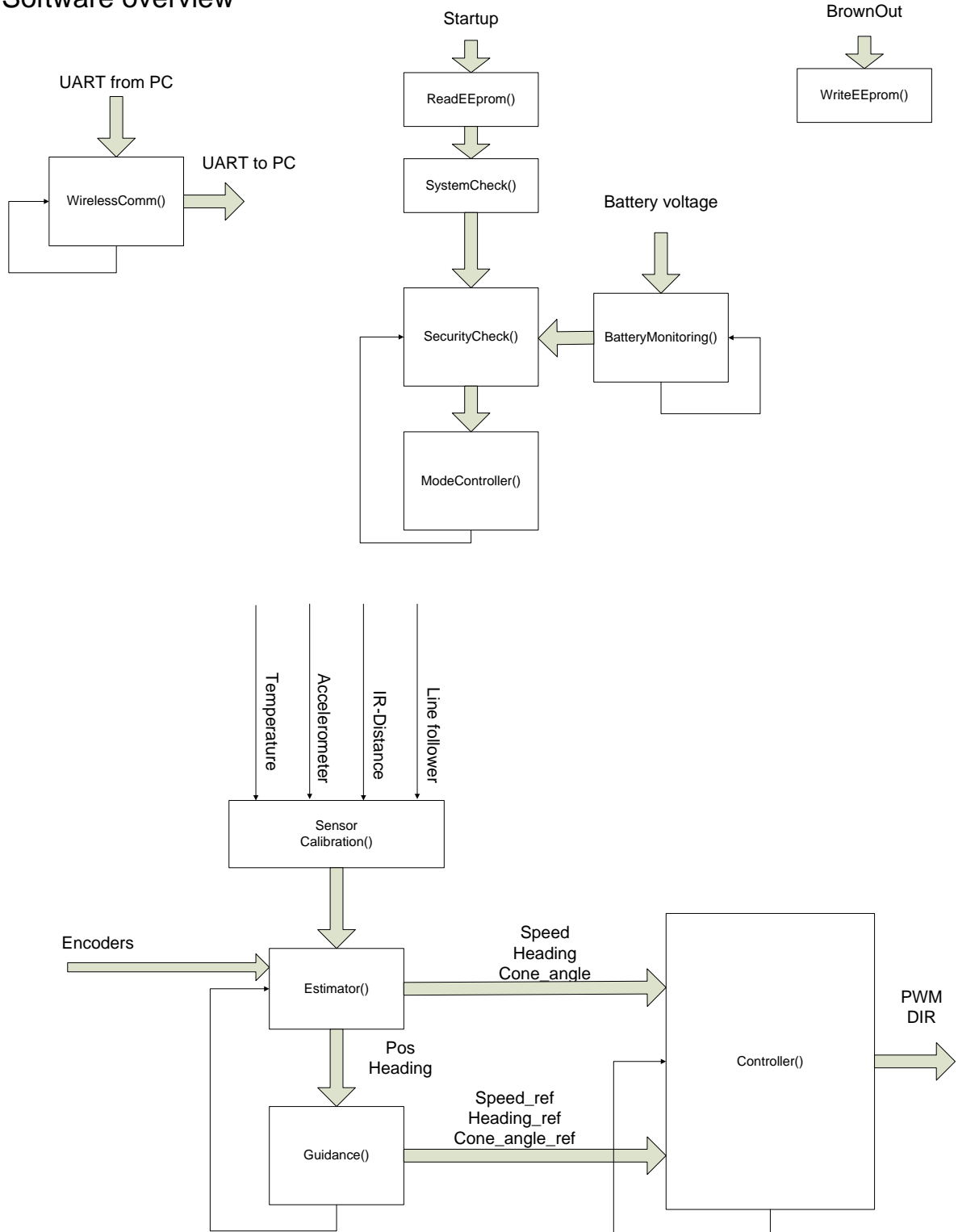
For å få til alt dette kreves mye logikk og beregninger. I dette kapitlet vil man først få en oversikt over oppbygningen av programvaren med naturlige oppdelinger i blokker og funksjoner. Etter hvert gis en funksjonell beskrivelse av de viktigste funksjonene i programmet, med valgte løsninger.

All programvare på roboten er skrevet i C og kompilert med Atmels AVR Studio 4. En innføring på kildekodenivå er ikke gjort, da dette ikke anses som viktig for leseren. Det er også for omfattende for en slik rapport. De viktigste prinsippene for programvaren danner et godt grunnlag for forståelse og videreføring av prosjektet.

12.2 Oversikt over programmet

Programmet er oppbygd av en rekke funksjoner som hver har sin naturlige deloppgave i systemet. Dette gjør programmet oversiktlig og enkelt å endre på. Figur 111 viser en oversikt over alle hovedfunksjoner i programmet, og hvordan disse avhenger av hverandre. Hver funksjon på skjemaet er igjen oppbygd av flere mindre funksjoner.

Software overview



Figur 111: Oversikt over programvarens hovedfunksjoner

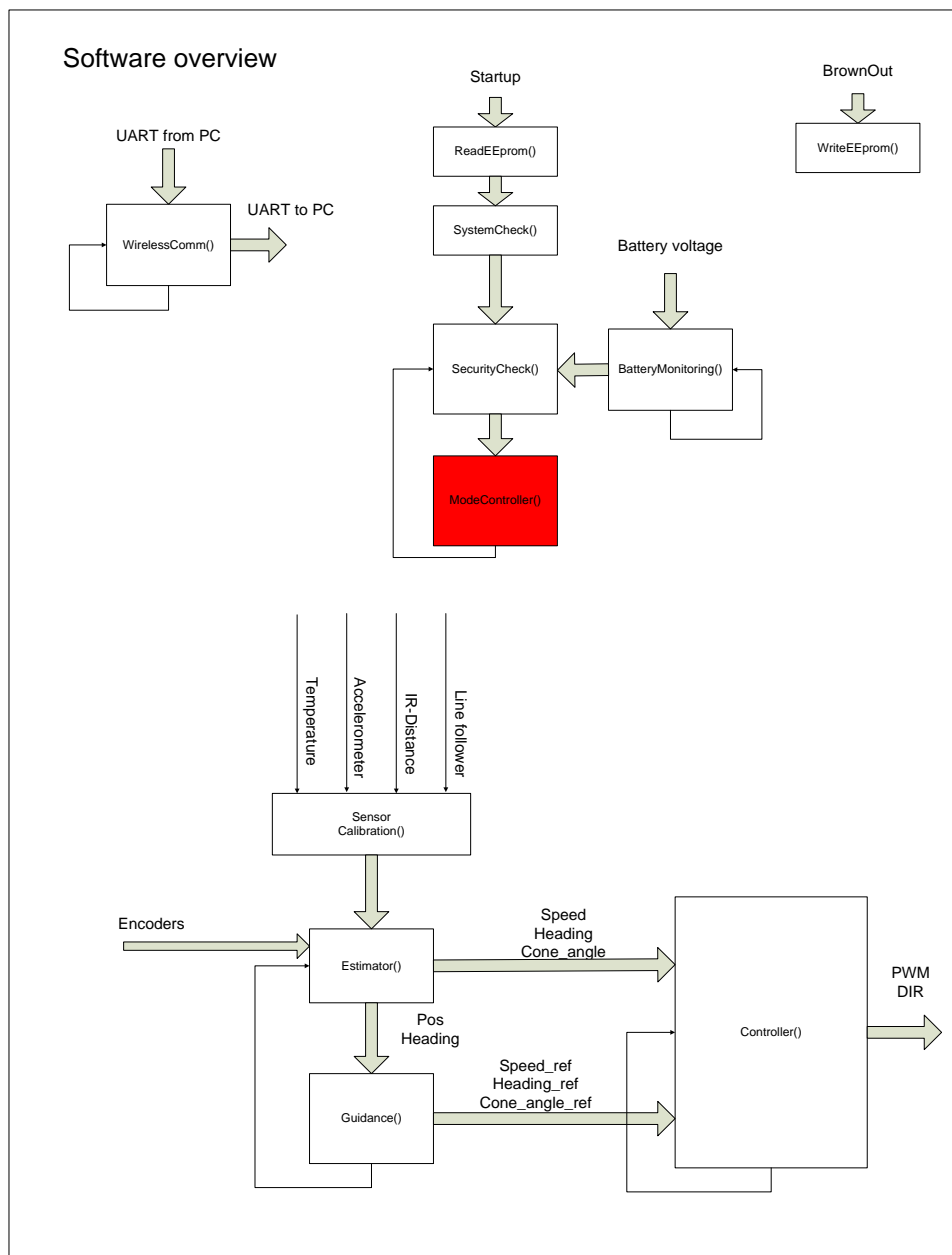
Hovedfunksjoner

- ReadEeprom(): Ved oppstart leses nødvendige parametre fra mikrokontrollerens EEPROM inn i programmet. Parametre som endres under bruk og skal huskes til neste oppstart må lagres i EEPROM.
- WriteEeprom(): Viktige parametre skrives til EEPROM. Dette må gjøres ved for eksempel strømbrudd, slik at roboten vet hvor den befinner seg når batteri tilkobles igjen.
- SystemCheck(): Alle sensorer blir funksjonstestet og må være i orden før roboten kan fortsette. I praksis kontrolleres kommunikasjonen med akselerometeret, og at avstandsmålerne og linjefølgingsensorer gir realistiske verdier.
- SecurityCheck(): Funksjonen sjekker de viktigste sikkerhetsmessige parametre under kjøring eller ved opplading. Dette er:
 1. Spenningen på batteriet
 2. Sensorenes tilstand
 3. Motorenes strømforbruk
- ModeController(): I denne funksjonen tas de viktigste avgjørelsene, da dette er selve "hjernen" i programmet. Her bestemmes i hvilken *mode* roboten er. *Mode* bestemmes ut i fra hvor langt roboten har kommet på renseprosessen, eller om noe uventet inntreffer.
- BatteryMonitoring(): Her overvåkes spenningen på batteriet. Funksjonen ser når batteriet er ferdigladet, og om laderen er tilkoblet.
- WirelessComm(): Funksjonen tar hånd om den trådløse kommunikasjonen med brukergrensesnittet.
- SensorCalibration(): Sensordata leses inn og kalibreres.
- Estimator(): I Estimatoren estimeres posisjon, hastighet og retning på grunnlag av kalibrerte sensordata. Estimatenes benyttes av både Controller() og Guidance().
- Guidance(): Robotens ønskede retning og hastighet kalkuleres på grunnlag av tankstørrelse, waypoints og estimert posisjon/retning.
- Controller(): Regulatoren sørger for at hastighet og retning følger gitte referansesignaler med minst mulig avvik.

12.3 Detaljert beskrivelse

I denne delen forklares oppbygningen til de viktigste hovedfunksjonene.

12.3.1 ModeController



Figur 112: ModeController() i programvaren

Bakgrunn

For at alle robotens funksjoner skal fungere sammen med riktige prioriteter og feilhåndteringer, trengs en funksjon som tar de riktige beslutningene. Dette er typiske spørsmål som:

- Når skal renseprosessen startes?
- Hva skal gjøres hvis en sensor ikke fungerer?
- Har man tilstrekkelig batterikapasitet til å fullføre?
- Har roboten funnet tilbake til ladestasjonen?
- Hvor langt har den kommet på renseprosessen? Hva er neste steg?
- Hvilke regulatorer skal benyttes?

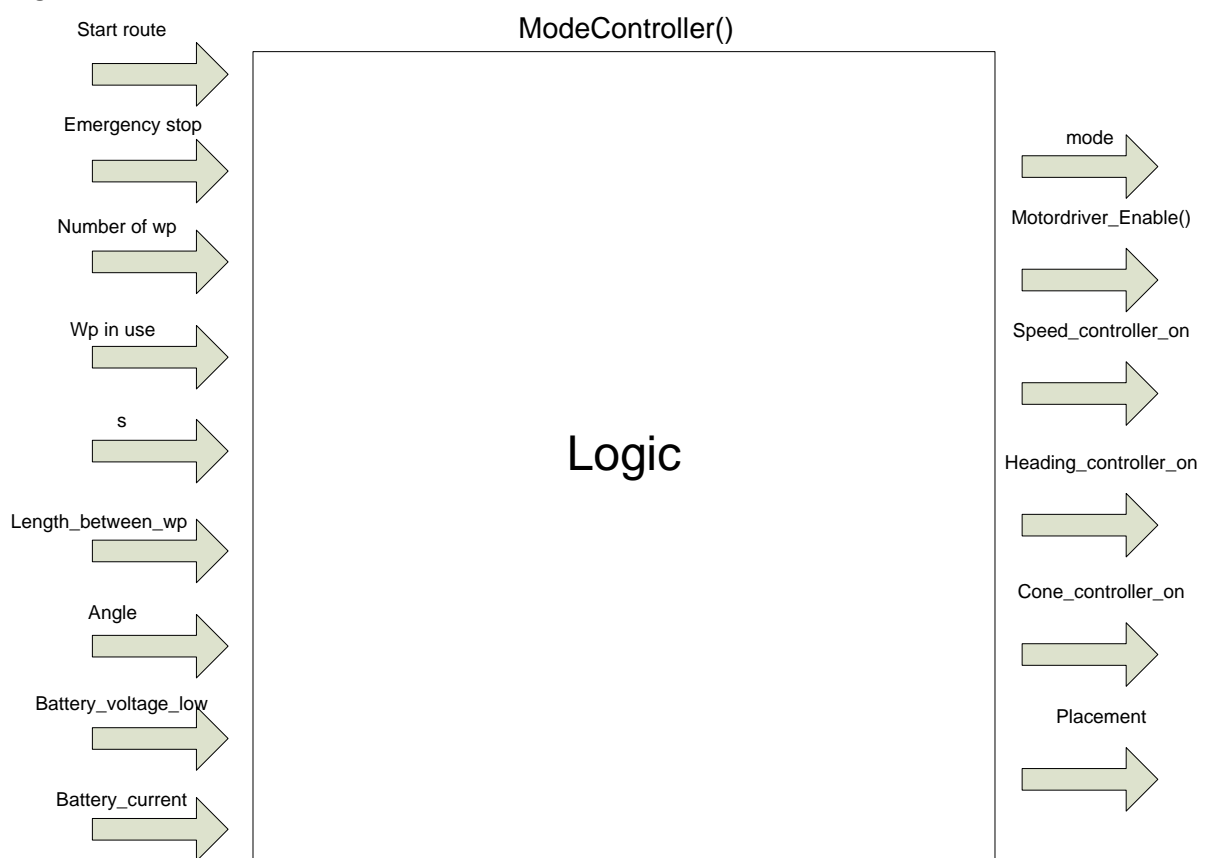
Alternative løsninger

Logikken i programmet kan bygges opp på mange måter. Man kan for eksempel bygge opp alt omkring en mengde logikk rundt omkring i programmet. Dette kan fungere, men blir lett uoversiktlig. Dersom man ønsker å endre på noe i ettertid, kan det fort blir tidkrevende og vanskelig.

Valgt løsning

Løsningen som er valgt er bygd opp rundt funksjonen ModeController(), som og styrer de andre blokkene via parametrene *modes* og *placement*. Når de viktige beslutningene er implementert i en blokk, blir det enkelt å oppgradere logikken eller finne feil.

Figur 112 viser ModeControllerens plassering i programmet. Dette er en oppgave med høy prioritet som kjører typisk flere ganger i sekundet. Den vil dermed gi en rask respons dersom noe skulle skje på den ellers trege roboten. Det er gitt alle hendelser som påvirker funksjonaliteten til roboten, høyest prioritet. Figuren under viser en prinsippskisse for ModeController() med innganger og utganger.



Figur 113: ModeControllerens innganger og utganger

Innsignaler

ModeControlleren bestemmer hva som skal skje i hovedsak ut fra disse innsignalene:

- Startsignal fra PC
- Batterispenning
- Ladespenning tilkoblet
- Waypoint info
- Tilbakelagt distanse
- Posisjonsestimater

Utsignaler

Mode:

De forskjellige *modes* er definert i tabell 4. De viste *modes* gjelder for rens av en komplett tank. En utvidelse av denne tabellen vil skje etter hvert som bevegelse på brosystem blir implementert.

Tabell 4: Modes

0=stay at charging station,
1=go along the top cylinder
2=clean the cylinder
3=go along the lower cylinder
4=move to bottom
5=go along top of cone
6=clean the cone
7=go along lower cone
8=go to cylinder
9=go to top of cylinder
10=drive left to bridge
11=traverse to next tank
12=safety switch pushed-emergency stop
13=manual drive
14=free fall, disable all

Placement:

Variabelen benyttes blandt annet av Guidance() i forbindelse med valg av waypoints.

Tabell 5: Variabelen placement

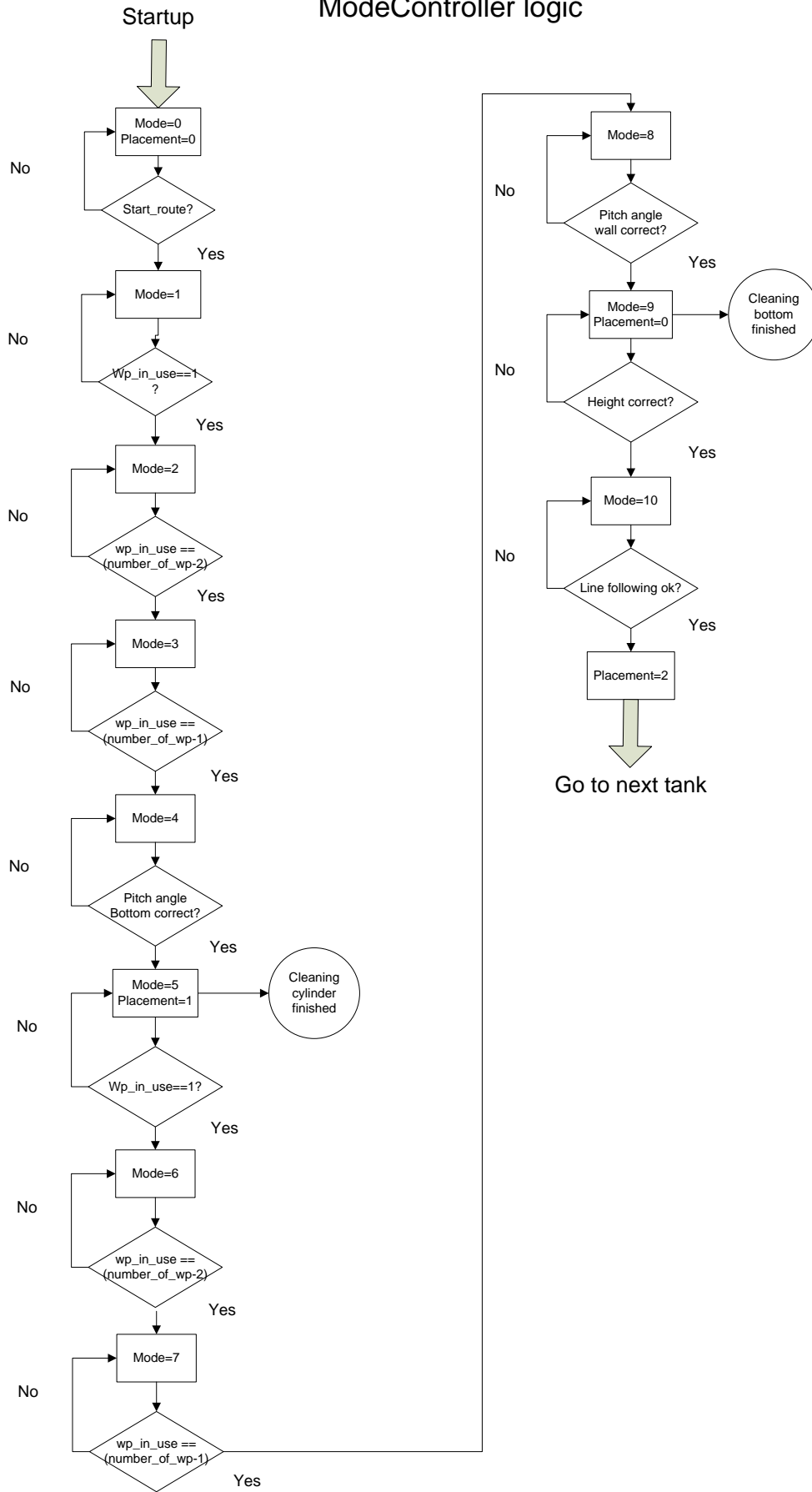
0= on tankwall
1= on tankbottom
2=on bridge between tanks

MotordriverEnable():	Motordriverne slås av eller på
Speed_controller_on:	Hastighetsregulatoren slås av eller på
Heading_controller_on:	Retningsregulatoren for tankvegg slås av eller på
Cone_controller_on:	Retningsregulatoren for tankbunn slås av eller på

Logic

ModeController() er i dag ikke ferdig utviklet for å håndtere en hel tankrigg. Det forventes at *mode*-tabellen og flytskjema vil utvides eller endres etter behov. Figur 114 viser et flytskjema for logikken i ModeController() for rens av en komplett tank. Sikkerhet og feilhåndtering er ikke vist i dette skjemaet. En del feilhåndteringer bør implementeres slik at systemet blir robust og takler små avvik.

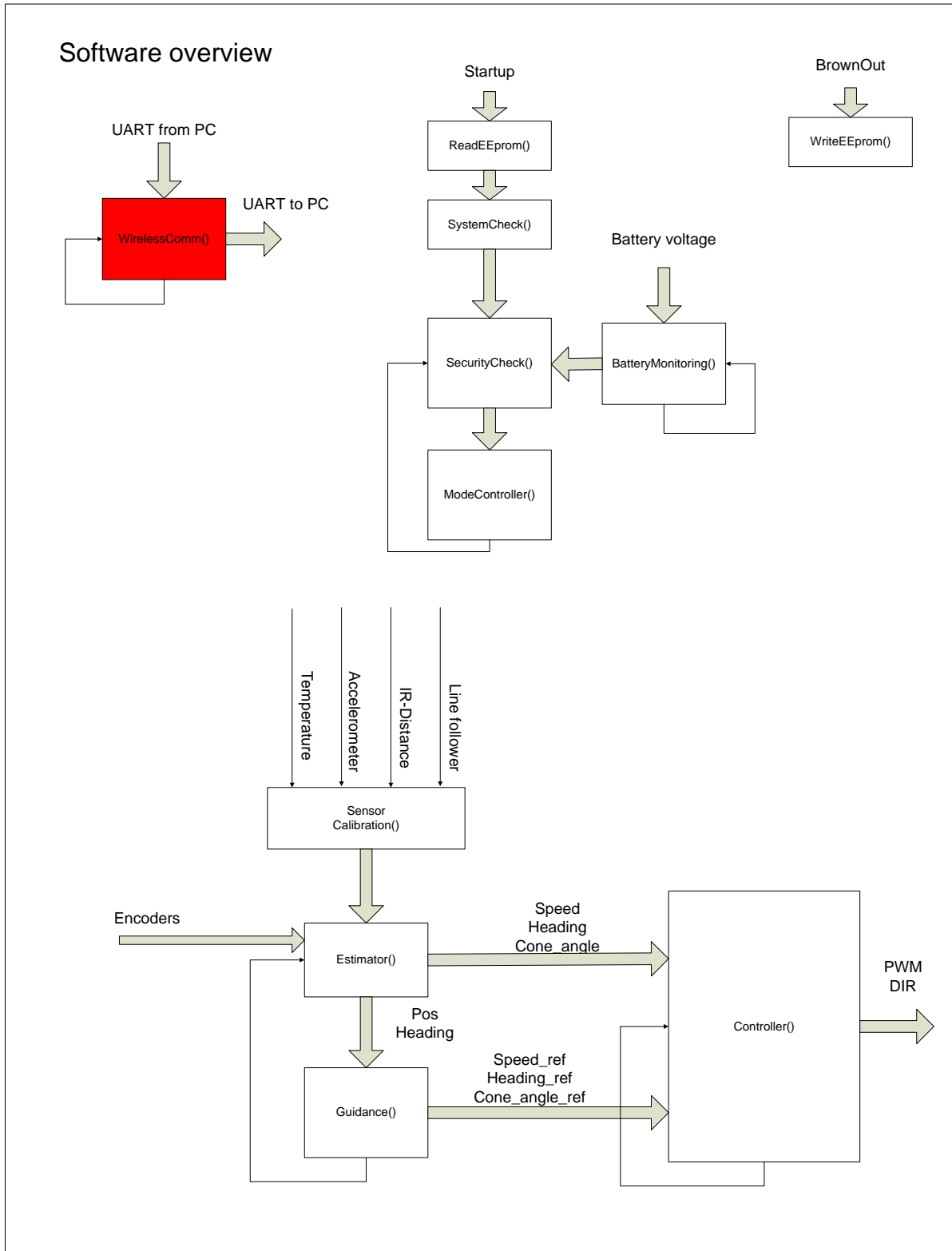
ModeController logic



Figur 114: ModeControllerens logikk for rens av tank

12.3.2 WirelessComm()

Funksjonen WirelessComm() tar hånd om den trådløse kommunikasjonen mellom robot og PC. I praksis er dette tekststrenger i ASCII-format med et kodeord og påfølgende kommaseparerte parametre.



Figur 115: WirelessComm() i programvaren

Fra robot til PC

Alle robotens viktigste parametre kan kontrolleres i brukergrensesnittet i form av numeriske verdier eller grafer. Tabell 6 viser en oversikt over de fem tekststrengene som kan sendes fra roboten til brukergrensesnittet.

Tabell 6: Data fra robot til PC

Type data	Codeword	param1	param2	param3	param4	param5	param6	param7	param8	param9	param10
Sensordata	\$\$RAW	temperature	adc_IR_left	adc_IR_right	adc_IR_front	accel_x	accel_y	accel_z	line_f_left	line_f_right	
Sensordata cal	\$SCAL	temperature	cal_IR_left	cal_IR_right	cal_IR_front	accel_x_cal	accel_y_cal	accel_z_cal	roll	pitch	yaw
Estimator	\$ESTI	height	angle	x	y	speed_left	speed_right	heading	radius	cone_angle	
Guidance system	\$GUID	mode	heading_ref	wp_in_use	alfa	speed_ref					
Controller	\$CONT	u_speed	u_heading	paadrag_left	paadrag_right	cone_angle_ref	u_cone				

Da disse parametrene kun benyttes til overvåkning, brukes ingen feilsjekk i dataoverføringen.

Fra PC til robot

Data fra PC til robot benyttes i hovedsak for å starte rens av tanker eller spesifisere tankenes størrelse og plassering. Også ønsket hastighet og waypoints kan endres fra brukergrensesnittet. Tabell 7 viser en oversikt over tekststrengene som kan sendes fra brukergrensesnittet til roboten.

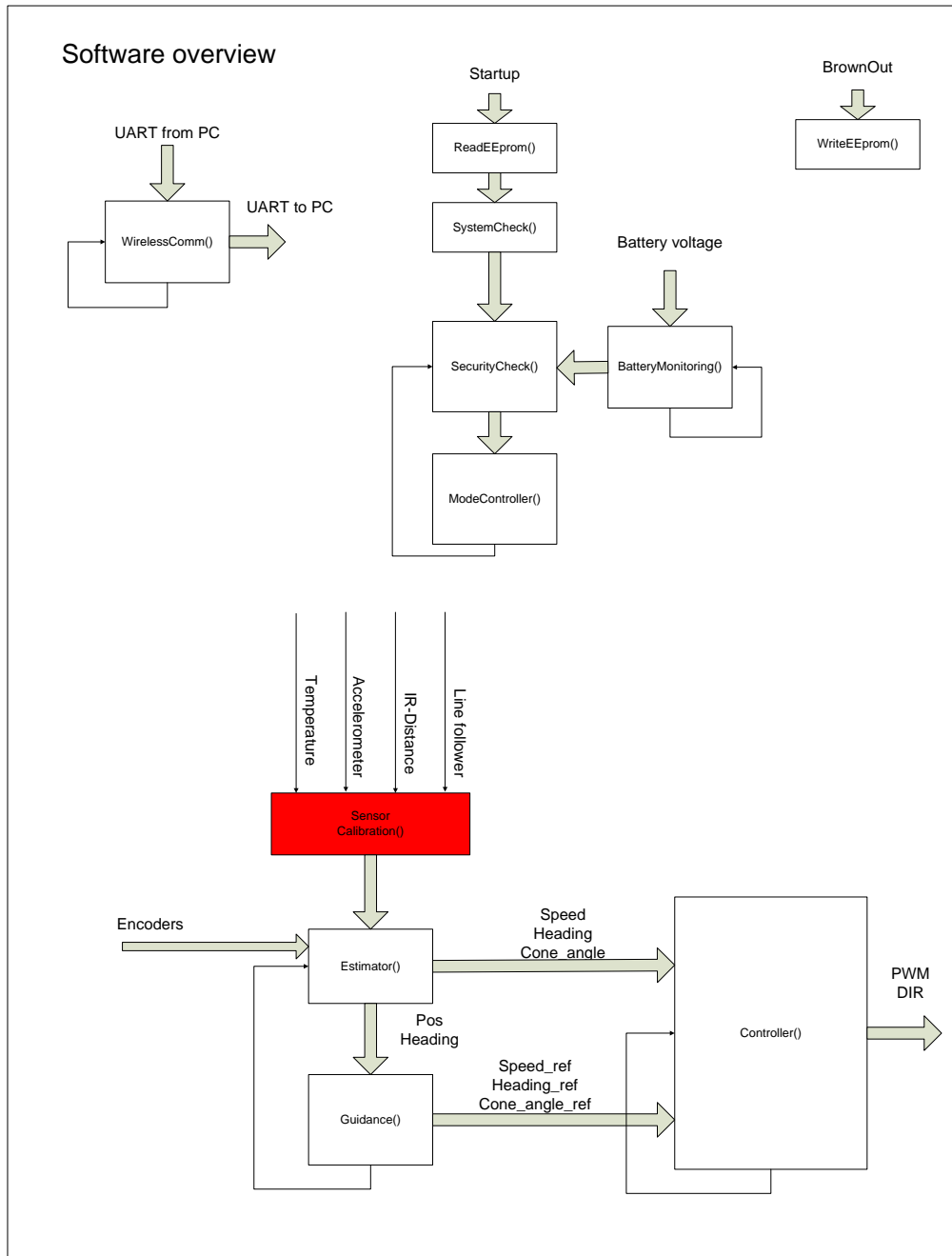
Tabell 7: Data fra PC til robot

Type data	Codeword	param1	param2	param3	param4	param5
Manual drive	= MAN	u_left	u_right	u_cleaner		
Set parameters	!SET_PARA	wheel_dia	dist_bet_wheels			
Set estimator	!SET_ESTI	p_height	i_height	p_radius	i_radius	
Set controller	!SET_CONT	p_speed	i_speed	p_heading	i_speed	d_speed
Set guidance	!SET_GUID	wp_in_use				
Set position	!SET_POSI	placement	angle	height	radius	
Set route	!SET_ROUT	tank1	tank2	tank3	tank3	tank5
Set start time	!SET_STTM	min	hour	date		
Set tankdim	!SET_TDIM	upper_dia	lower_dia	height_cyl	pipe_dia	height_cone
Set tankplacem	!SET_PLCM	x	y	x	y	

Ved overføring av parametre fra PC til robot benyttes en sikkerhetssjekk. Dette gjøres fordi overføring av riktige parametre er viktig. Typisk vil feil i for eksempel hjulenes diameter gi avvik i både odometri og hastighet. Dette vil få store konsekvenser.

Sikkerhet i overføringen oppnås ved at data først sendes fra PC til robot. Deretter sender roboten nøyaktig de samme data i retur. Roboten venter da på en bekreftelse fra PC før den tar i bruk parametrene. Dersom PC ser at sendte og mottatte data er like, sendes acknowledge til roboten og overføringen er godkjent. Dersom feil oppstår, må samme prosedyre gjentas.

12.3.3 SensorCalibration()



Figur 116: SensorCalibration() i programvaren

I funksjonen SensorCalibration() gjøres linearisering og kalibrering av rådata fra sensorer. Følgende sensorer er input til funksjonen:

- Akselerometer
- Temperatursensor
- IR-avstandssensorer
- Linjefølgingsensorer

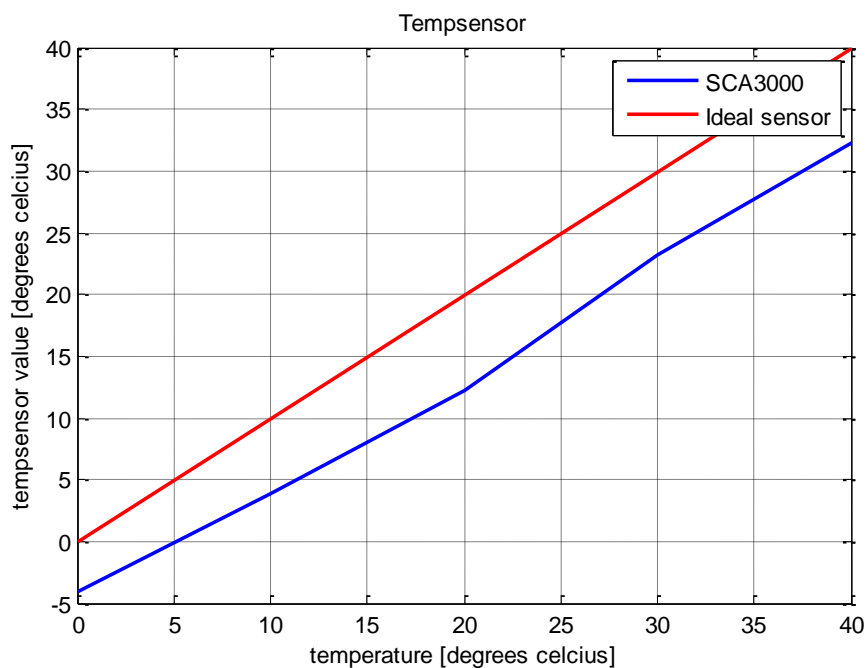
I funksjonen beregnes i tillegg vinklene *roll*, *pitch* og *yaw* på grunnlag av kalibrerte akselerometerdata.

12.3.3.1 Temperatursensor

Dersom tempsensoren kun skal benyttes for sensorkalibrering, spiller det ingen rolle om den gir riktig verdi i forhold til omgivelsestemperaturen. Ettersom det er ønskelig at temperaturverdien skal vises på det grafiske brukergrensesnittet, bør den gi riktig romtemperatur. Temperatursensoren er innebygd i akselerometeret, med en oppløsning på kun ca 0,55 °C. En presis temperatur er derfor ikke oppnåelig med denne sensoren. I følge databladet [20] har temperatursensoren store avvik fra fabrikk.

Kalibrering av temperatursensor

En test av temperatursensorens nøyaktighet ble gjort ved å måle sensorens verdi ved temperaturene 0, 10, 20, 30 og 40 °C. Dette ble gjort i et klimaskap av typen Vötsch VT4011. Figur 117 viser temperatursensorens verdi som funksjon av temperaturen sammenlignet med en ideell sensor. Figuren viser et betydelig avvik.



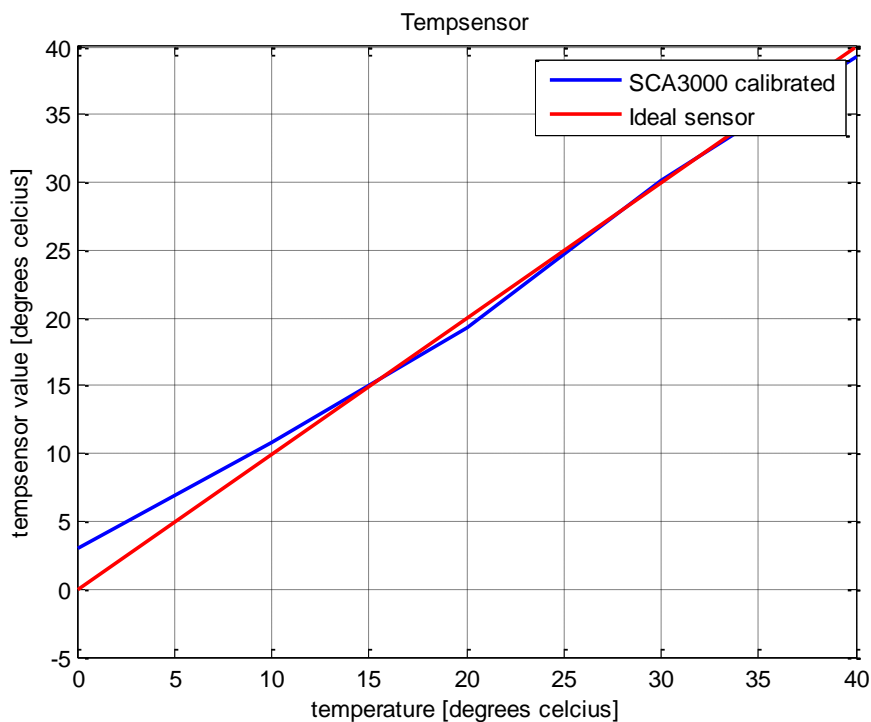
Figur 117: Test av temperatursensor

Temperatursensoren kalibreres ved å legge til en biaskorreksjon:

$$T_{calibrated} = T_{tempensor} + a \quad (12.1)$$

$T_{calibrated}$:	Temperatursensorens kalibrerte verdi
$T_{tempensor}$:	Temperatursensorens rådata
a :	Biaskorreksjon

En biaskorreksjon på 7,0 gir en bra kurvetilpasning med noe avvik ved temperaturer under 10 °C. Figur 118 viser den kalibrerte temperaturverdien.



Figur 118: Kalibrert temperatursensor

Avviket ved lave temperaturer kommer trolig av en kombinasjon av akselerometerets egenoppvarming og at det ble montert i nærheten av en kjøleplate for spenningsregulatorer. Tilsvarende effekt vil oppstå dersom all elektronikk og sensorer kapsles inn på roboten. Elektronikkens varmeutveksling vil da være av betydning. Dersom en nøyaktig måling av romtemperaturen er av interesse, bør derfor en ekstern sensor utvendig på roboten benyttes til formålet. Dette er ikke ansett som nødvendig.

12.3.3.2 Akselerometer

I følge akselerometerets datablad [20] har akselerometeret store avvik levert fra fabrikk. I kapittel 8.5.2 ble et overslag av akselerometerets maksimale feil gjort. Beregningene viste at den totale feilen er større enn det spesifiserte kravet. Dette gjør egen kalibrering av akselerometeret nødvendig. Kalibreringen bør gjøres med sensoren montert på roboten, på grunn av mekanisk skjevstilling i monteringen.

Kalibrering av g

Avlesning av akselerometerverdien for hver akse over SPI-bussen skjer binært i området +-3071. Dette tilsvarer en oppløsning på 0,04° [20]. Det er ønskelig å konvertere og kalibrere dette til riktig akselerasjonsverdi før beregning av vinkler gjøres. Vanlig måte å gjøre dette på er gjennom et polynom [43]:

$$a_{calibrated} = a_0 + a_{sensor} * a_1 + a_{sensor}^2 * a_2 + \dots \quad (12.2)$$

- $a_{calibrated}$: Kalibrert akselerometerverdi
- a_{sensor} : Ukalibrert akselerometerverdi
- a_0 : Bias
- a_1 : Skalafaktor
- a_2 : 2.ordens skalafaktor

På grunn av ønske om enkel kalibrering under prototypingen, velges polynom av 1.orden. Dette gjør kalibreringsprosessen hurtig, ved at kun målinger ved 0 g og +1 g behøves. Følgende kalibreringsrutine gjøres for hver akse:

Parameteren $-a_0$ leses av ved å plassere akselerometets akse til 0 g.

Parameteren a_1 beregnes etter avlesning av akselerometets akse ved +1 g etter følgende formel:

$$a_1 = \frac{1g}{\frac{a_{(g)} - a_{(-g)}}{2}} \quad (12.3)$$

g : Gravitasjonsakselerasjonen (Pirsenteret Trondheim 9,8218 m/s²)

$a_{(g)}$: Avlest akselerometerakse ved 1g

$a_{(-g)}$: Avlest akselerometerakse ved -1g

Ulempen med å benytte et polynom av bare 1.orden, er at akselerometerets ulinearitet ikke kalibreres bort.

Temperaturkalibrering

Temperaturkalibrering av akselerasjonsmålingene gjøres etter følgende formler:

$$a_0 = b_0 + T_{calibrated} * c_0 + T_{calibrated}^2 * d_0 + \dots \quad (12.4)$$

$$a_1 = b_1 + T_{calibrated} * c_1 + T_{calibrated}^2 * d_1 + \dots \quad (12.5)$$

b_0 : Bias temperatur koeffisient 0

c_0 : Skalafaktor temperatur koeffisient 0

d_0 : 2.ordens skalafaktor temperatur koeffisient 0

b_1 : Bias temperatur koeffisient 1

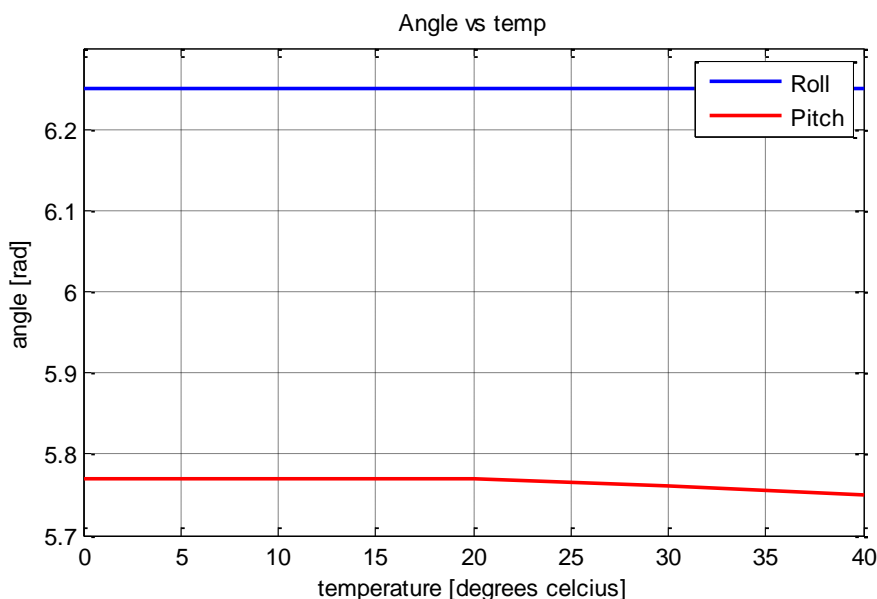
c_1 : Skalafaktor temperatur koeffisient 1

d_1 : 2.ordens skalafaktor temperatur koeffisient 1

Nødvendig orden på temperaturkalibreringen bestemmes på grunnlag av målinger på roboten og akselerometerets datablad.

Kontroll av temperaturavhengighet

For å kontrollere temperaturavhengigheten, ble *roll*, *pitch* og *yaw* målt ved temperaturene 0, 10, 20, 30 og 40 °C i klimaskapet. Figur 119 viser et plott av vinklene *roll* og *pitch* som funksjon av temperaturen. En vinkelendring på opptil 0,02 rad ble observert i *pitch* for hele temperaturområdet. Dette tilsvarer vinkelen 1,15°. I *roll* ble ingen endring målt.



Figur 119: Akselerometerets temperaturavhengighet

I følge databladet er *offset temperature error* typisk $\pm 0,5 \text{ mg}/^\circ\text{C}$. Dersom man antar at temperaturavviket kun er i akselerometerets x-akse, tilsvarer dette for temperaturområdet 0-40 °C maksimal vinkelfeil [22]:

$$\Delta a_x = 3 \text{ mg} * 40^\circ\text{C} = 120 \text{ mg} \quad (12.6)$$

$$\Delta \text{pitch} = \text{atan}\left(\frac{\Delta a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}}\right) = \text{atan}\left(\frac{0,12g}{1g}\right) = 6,8^\circ \quad (12.7)$$

Δa_x : Endring i g på grunn av temperatur

Δpitch : Endring i pitch på grunn av temperatur

Målingene viser at akselerometeret holder de gitte spesifikasjoner, da store biasfeil på grunn av temperatur kan forventes. Ettersom en bedre nøyaktighet er ønskelig, bør akselerometeret temperaturkalibreres i programvaren, alternativt bør en sensor av bedre kvalitet benyttes.

Figur 119 viser at temperaturavhengigheten er ikke linær for området. En temperaturkalibrering av bias av minimum 2.orden bør derfor benyttes:

$$a_0 = b_0 + T_{\text{calibrated}} * c_0 + T_{\text{calibrated}}^2 \quad (12.8)$$

Skalafaktoren a_1 sin temperaturavhengighet er i følge databladet [21] maks $\pm 0,02 \text{ \%}/^\circ\text{C}$. For temperaturområdet 0-40 °C tilsvarer dette maksimalt avvik på:

$$\Delta a_1 = 0,02 \frac{\%}{^\circ\text{C}} * 40^\circ\text{C} = 0,8\% \quad (12.9)$$

Δa_1 : Endring i skalafaktor på grunn av temperatur

Ved maksimalt avvik i kun en akse tilsvarer dette en maksimal vinkelfeil på:

$$\Delta \text{angle} = \text{atan}(\Delta a_1) = \text{atan}(0,008) = 0,46^\circ \quad (12.10)$$

Denne feilen er betydelig mindre enn temperaturfeilen i offset, og blir derfor ikke tatt hensyn til. I praksis vil temperaturvariasjoner på 40 °C ikke forekomme ved bruk i oppdrettssammenheng.

Kalibrering av skjevstilling

Skjevstilling oppstår både internt i akselerometeret og mellom akselerometeret og body-koordinatsystemet. Kalibreringen gjøres ved hjelp av en 3x3 matrise [43]. Dette kan enten gjøres i akselerasjonsvektoren eller i de utregnede body-vinklene *roll*, *pitch* og *yaw*. Vi definerer akselerasjonsvektorene før og etter skjevstillingskalibrering som henholdsvis a og $a_{calibrated}$:

$$a = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} \quad a_{calibrated} = \begin{bmatrix} a_x \text{ calibrated} \\ a_y \text{ calibrated} \\ a_z \text{ calibrated} \end{bmatrix}$$

Sammenhengen mellom den ukalibrerte akselerasjonsvektoren og den virkelige (kalibrerte)akselerasjonsvektoren kan skrives på følgende form:

$$a_x = a_x \text{ calibrated} * A_{11} + a_y \text{ calibrated} * A_{12} + a_z \text{ calibrated} * A_{13} \quad (12.11)$$

$$a_y = a_x \text{ calibrated} * A_{21} + a_y \text{ calibrated} * A_{22} + a_z \text{ calibrated} * A_{23} \quad (12.12)$$

$$a_z = a_x \text{ calibrated} * A_{31} + a_y \text{ calibrated} * A_{32} + a_z \text{ calibrated} * A_{33} \quad (12.13)$$

På matriseform blir dette:

$$a = A * a_{calibrated} \quad (12.14)$$

Der A har følgende form:

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix}$$

Vi løser ut for den kalibrerte vektoren $a_{calibrated}$:

$$a_{calibrated} = A^{-1} * a \quad (12.15)$$

Den inverse matrisen A^{-1} defineres som Δ :

$$a_{calibrated} = \Delta * a \quad (12.16)$$

$$\Delta = \begin{bmatrix} \Delta_x & \Delta_{xy} & \Delta_{xz} \\ \Delta_{yx} & \Delta_y & \Delta_{yz} \\ \Delta_{zx} & \Delta_{zy} & \Delta_z \end{bmatrix}$$

Matrisen A beregnes ved å måle gravitasjonsvektoren a når roboten orienteres i kjente vinkler 0 og 1 g for hver akse. Deretter beregnes den inverse, skjevstillingsmatrisen Δ , som implementeres i programvaren.

Fra g til vinkler

Vinklene *roll*, *pitch* og *yaw* beregnes til verdier i området $[-\pi, \pi]$ på grunnlag av følgende formler[22]:

$$roll = atan2(a_y \text{ calibrated}, \sqrt{(a_x \text{ calibrated})^2 + (a_z \text{ calibrated})^2}) \quad (12.17)$$

$$pitch = -atan2(ax_{calibrated}, \sqrt{(ay_{calibrated})^2 + (az_{calibrated})^2}) \quad (12.18)$$

$$yaw = atan2(az_{calibrated}, \sqrt{(ax_{calibrated})^2 + (ay_{calibrated})^2}) \quad (12.19)$$

$ax_{calibrated}$: Kalibrert akselerometerverdi x_b – aksen
 $ay_{calibrated}$: Kalibrert akselerometerverdi y_b – aksen
 $az_{calibrated}$: Kalibrert akselerometerverdi z_b – aksen

Diskusjon

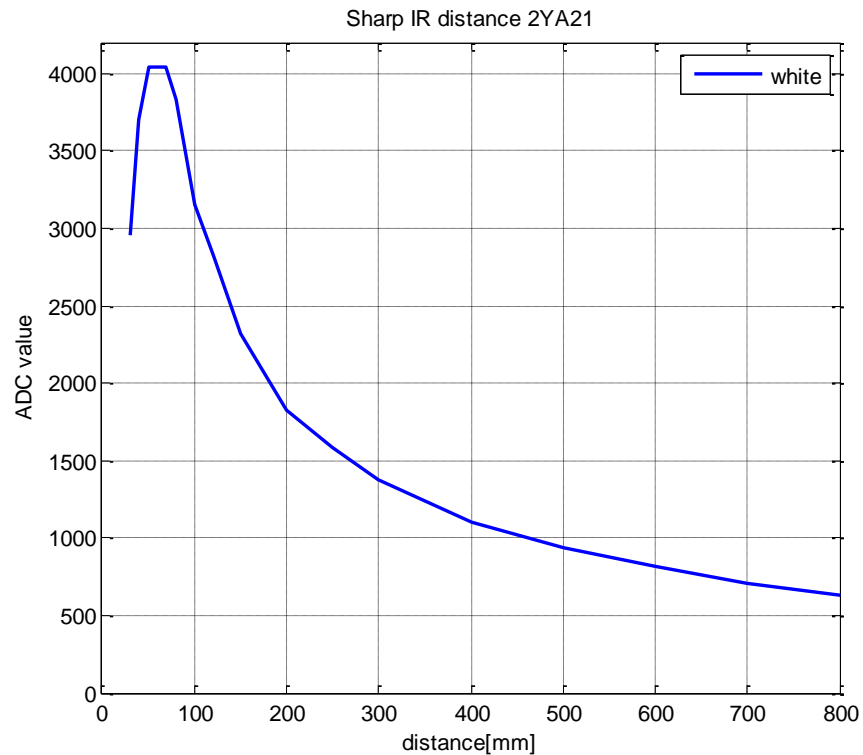
For kalibrering av akselerometeret ble det benyttet en 1.ordens modell på grunn av enkle kalibreringsrutiner. I følge beregningene er avvik på grunn av ulineariteten maksimalt $0,57^\circ$ ved maksimal feil i en akse. Denne feilen er betydelig, men ikke stor i denne sammenhengen. For å minimere feilene på grunn av ulinearitet bør et 2.ordens kalibreringspolynom benyttes. En måleserie bør da gjøres mot en nøyaktig referansesensor ved flere vinkler. De største utfordringene med dette er å unngå mekaniske feil i målingene. En referansesensor på en kalibreringsjigg festet til robotens hjul vil være en god løsning.

Et annet bidrag for feil i beregning av *roll*, *pitch* og *yaw* er robotens fleksible kropp. I valgt løsning er i praksis robotens body-koordinatsystem kun festet til den ene av robotens bevegelige deler. Avvik på grunnlag av dette er ikke tatt med i beregningene. Til dette trengs en modell som beskriver variasjon i robotens kropp på grunnlag av retning og plassering på tanken. Dette kan løses ved å benytte en skjevstillingsmatrise Δ (*heading*) for tankveggen. For tankbunnen kan en matrise $\Delta(\text{cone_angle}, \text{radius})$ implementeres. Alternativt kan et akselerometer festes til hver fleksible del.

Akselerometerets unøyaktighet har hittil vist seg å gi avvik i estimert høyde på inntil 6 mm (figur 205). Dette kommer av en mekanisk skjevstilling som ikke er kalibrert bort på prototypen. En løsning på dette er å fjerne avviket gjennom en integraldel. Dette kan gjøres da feilen er observerbar gjennom Guidance-systemet som et konstant avvik. Løsningen på dette blir forklart i kapittel 15. En bør huske på at feil i *roll*, *pitch* og *yaw* på grunnlag av temperatur, vil på tross av integralvirkningen, påvirke høydeestimatet gjennom en feil i høydemålingens avhengighet av *heading* (kapittel 12.3.4).

12.3.3.3 IR avstandsmålere

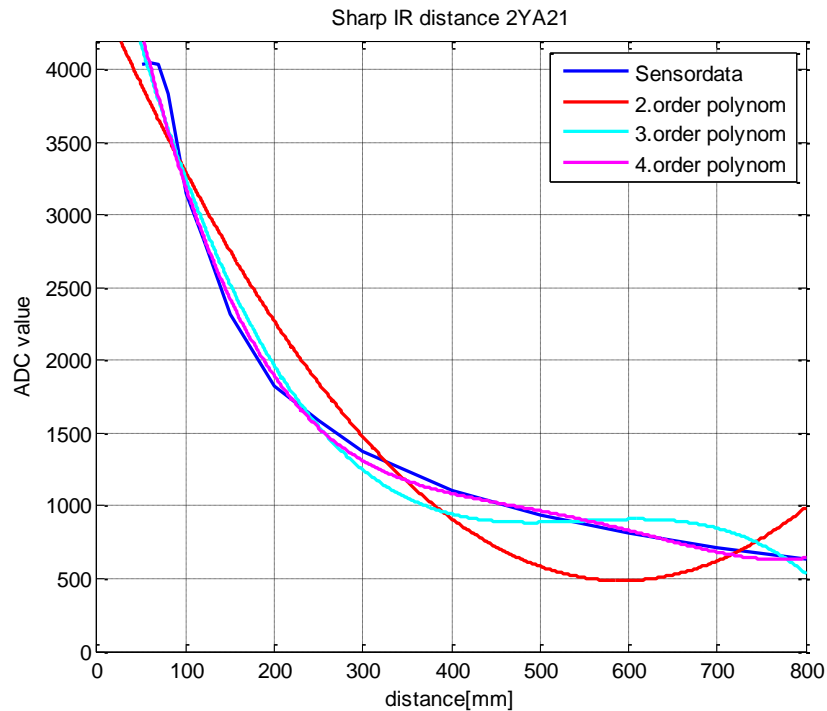
Avstandsmålerens utspenning er ulineær som funksjon av avstanden [24]. For å beregne avstanden trengs derfor en lineariserende funksjon. Figur 120 viser målte verdier for utspenningen sensoren 2YA21.



Figur 120: Spenning som funksjon av avstanden på en IR-avstandsmåler

Lineariserende funksjon

Et polynom er mindre egnet som lineariserende funksjon for sensoren. Dette fordi det trengs et polynom av høyere orden for å få en bra kurvetilpasning. Figur 121 viser kurvetilpasninger av 2, 3 og 4. orden basert på mindre kvadraters metode. Figuren viser at minimum 4.ordens funksjon er nødvendig for å oppnå en god nøyaktighet.



Figur 121: Polynom for kurvetilpasning

Ulempen med et polynom av høy orden er at det blir unødvendig mange parametre og utregninger i mikrokontrolleren. Andre alternative metoder for linearisering er å benytte oppslagstabeller eller dele opp kurven i stykkevisse lineariserte deler [23]. Disse metodene krever mye plass i mikrokontrollerens minne.

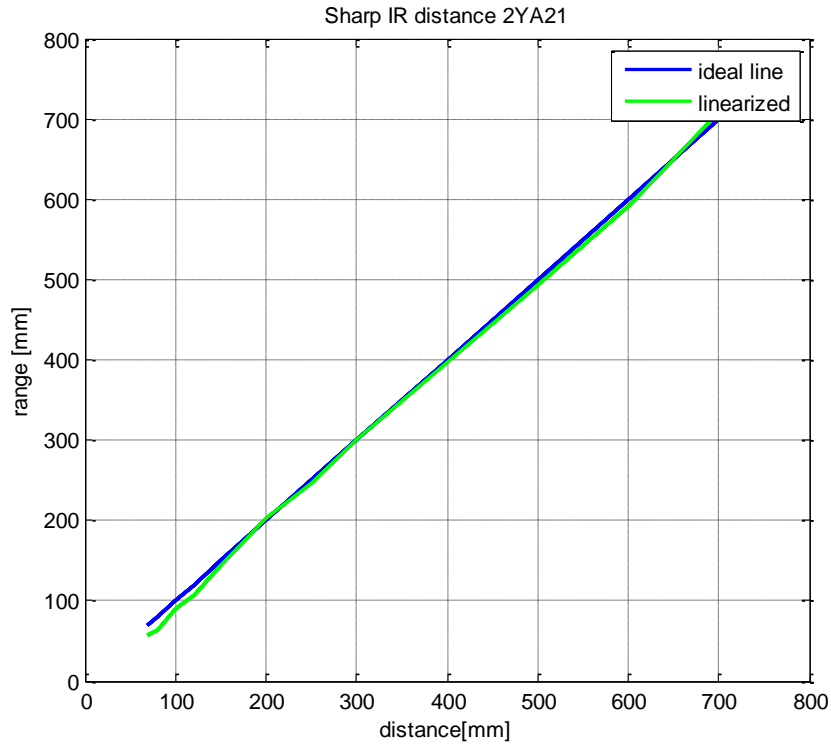
Løsning

Den beste løsningen er å benytte en lineariserende funksjon på formen [23]:

$$IR_{linearized} = \left(\frac{m}{IR_{ADC} + b} \right) - k \quad (12.20)$$

$IR_{linearized}$: *Linearisert avstandssensor*
 IR_{ADC} : *Ulineær avstandssensor målt*
 m, b, k : *Parametre. k = bias, = stigning, b = kurve*

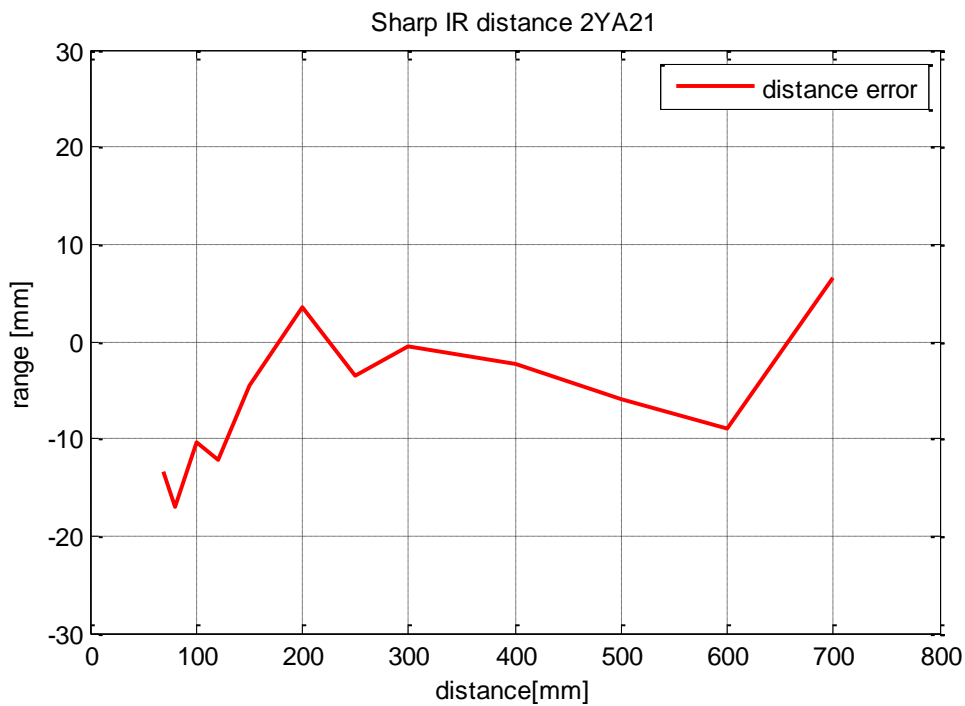
Ved å justere verdiene m , b og k finnes enkelt passende verdier i Matlab visuelt. Figur 122 viser den lineariserte avstandsmåleren, med kun små avvik. Innsatte verdier er her $m=440000$, $b=-135$ og $k=-56$:



Figur 122: Linearisert avstandssensor

Avvik

Ved å se på forskjellen mellom linearisert og ideell kurve, kan det forventede maksimale avviket i lineariseringen vurderes.



Figur 123: Avvik mellom linearisert sensor og ideell sensor

Figuren viser et avvik på mindre enn 16 mm for hele måleområdet. Dersom en minimumsavstand på ca 100 mm benyttes, blir det maksimale avviket ca 12 mm. Dette er godt nok med tanke på en ønsket nøyaktighet i høyde på 3 cm. Avvik på grunn av repeterbarhet over tid, temperatur eller fargeavhengighet er ikke med i denne vurderingen.

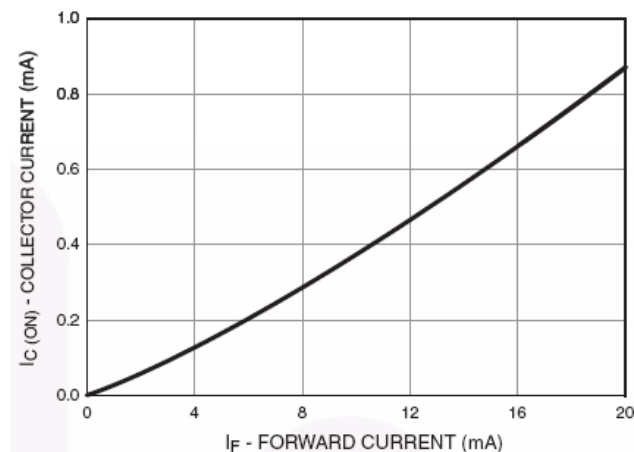
Diskusjon

En linearisering av hver enkelt sensor er nødvendig for å oppnå denne nøyaktigheten, da det er store individuelle forskjeller mellom dem. Et utvalg av flere sensorer bør gjøres for å bekrefte at den viste lineariserte nøyaktigheten gjelder. Dersom sensorer med større avvik oppdages, bør en seleksjon foretas. Det kan være realistisk å anta at en total nøyaktighet på 15 mm er oppnåelig for et større temperaturområde dersom sensoren temperaturkalibreres og lineariseres for riktig farge.

12.3.3.4 Linjefølger

Sensoren QRE1113 består av en IR-LED og en IR-mottaker. Ved linjefølging benyttes i prinsippet sensoren som en digital sensor. For å gjøre roboten mer fleksibel i forhold til tankfarger, velges en sensor med analog utgang. Da kan lys eller mørk stripe velges i programvaren, avhengig av tankens farge.

Figur 124 viser kollektorstrømmens avhengighet av emitterstrømmen [26]. Vi ser at sammenhengen er tilnærmet lineær. Vi kan konkludere med at emitterstrømmen er en god parameter for å kalibrere sensorens utgang.



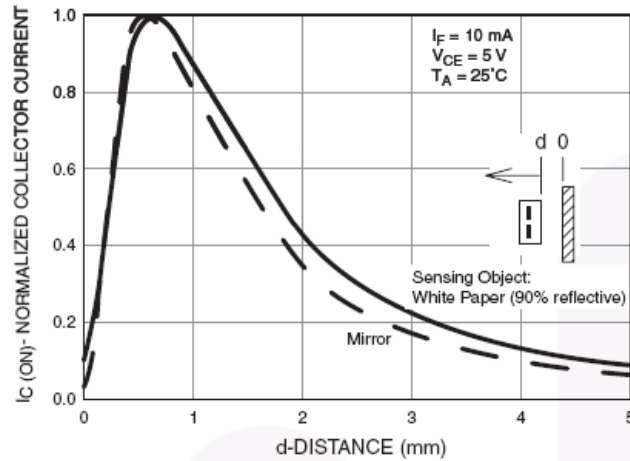
Figur 124: Kollektorstrømmens avhengighet av emitterstrømmen [26]

Kalibrering

Kalibrering av lyssensoren gjøres slik at IR-mottakeren ligger midt i arbeidsområdet ved kjøring på tanken. Avstanden mellom sensoren og tanken vil variere ettersom det er ujevnheter i tanken, og roboten kjører både horisontalt og vertikalt.

Terskelen for skifte mellom høy og lav digital verdi settes midt mellom kurvene for tankfargen og linjen som skal følges. Det kan også være aktuelt å legge inn en hysteres for å unngå oscillasjoner i grenseområdene under kjøring.

Kollektorstrøm



Figur 125: Kollektorstrøm som funksjon av avstanden [26]

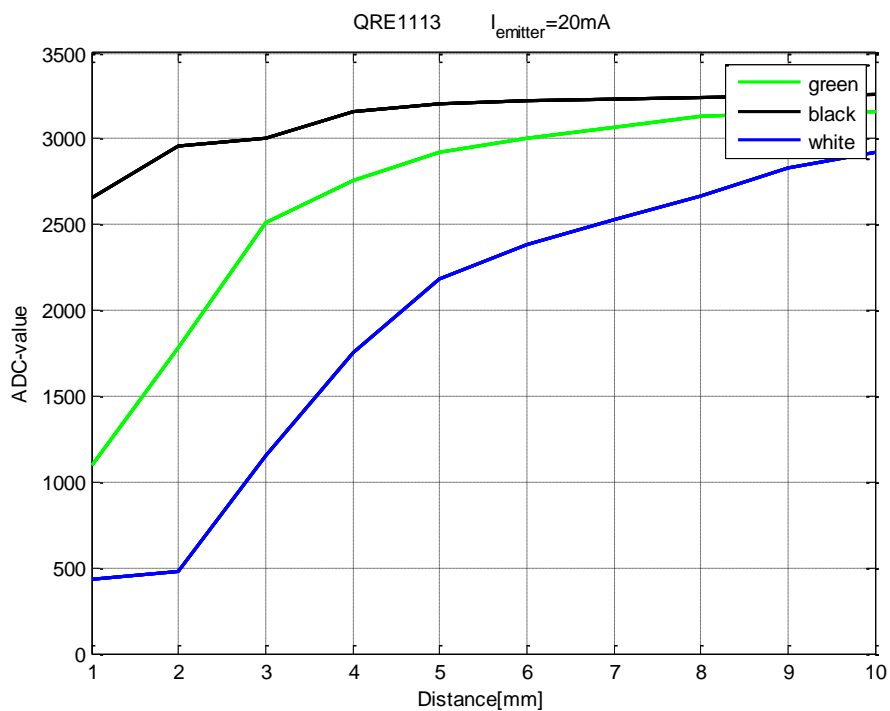
Figur 125 viser kollektorstrømmens avhengighet av avstanden til målet[26]. Den benyttede koblingen for sensorene er vist på Figur 108. Mikrokontrollerens avleste spenning vil ha den inverse formen av kollektorstrømmen, gitt av funksjonen:

$$Line = V_{linefollowing} - I_c * R_c \quad (12.21)$$

$Line$: Mikrokontrollerens avleste verdi
 $V_{linefollowing}$: Spenning for linjefølger (3,3V)
 R_c : Kollektormotstand (6k8)

Test av farger

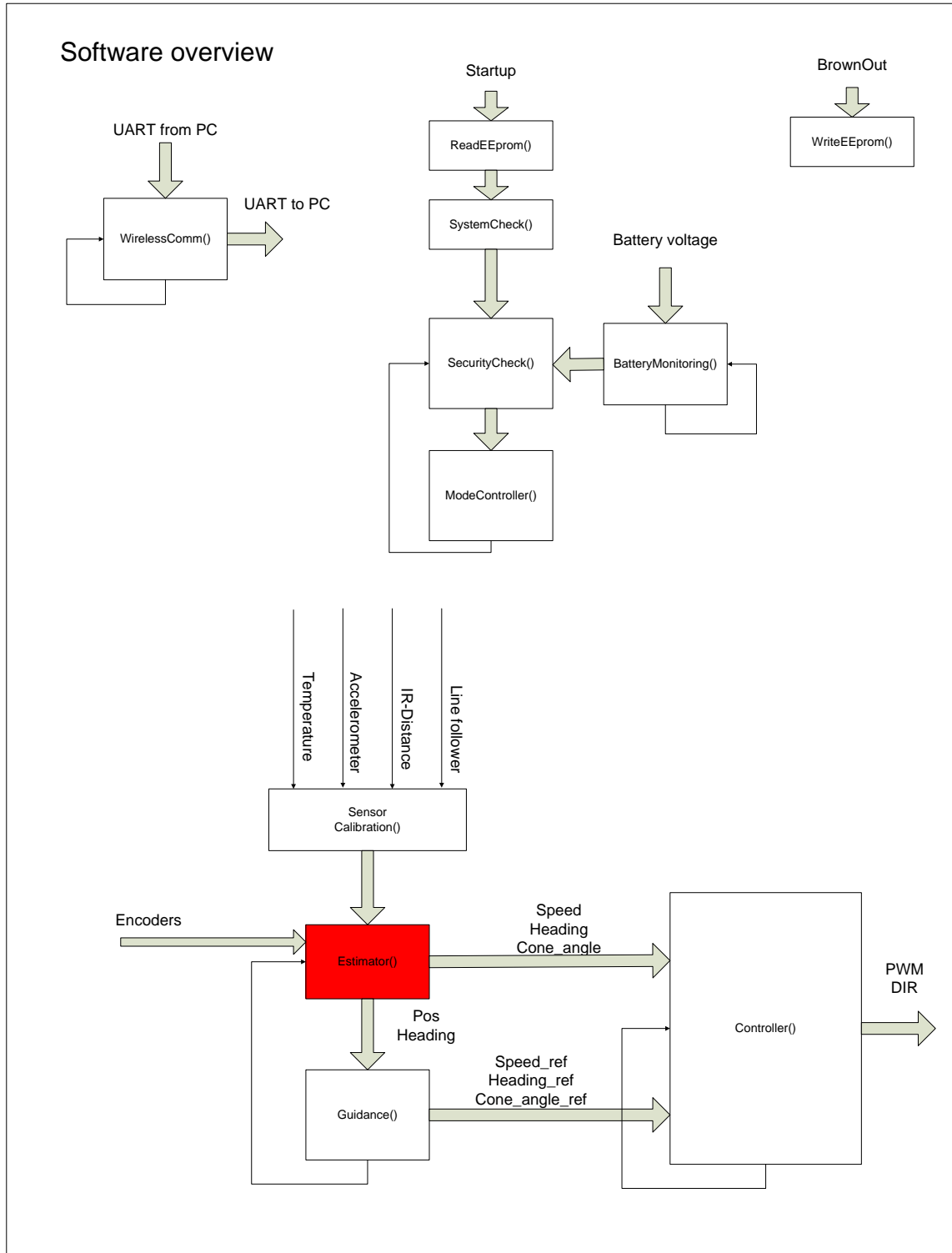
De aktuelle tankene har grønn farge på utsiden. Mulige farger på linjen som skal følges er da sort eller hvit. Sensorenes datablad gir dårlig informasjon om kollektorstrømmens avhengighet av de ulike fargene. For å finne forskjellen i utspenning ved de forskjellige fargene, ble en test med aktuelle farger grønn, sort og hvit gjennomført. Forskjellige farger ble holdt foran sensoren i et avstandsområde 1-10 mm. Avstandene ble målt med linjal. Figur 126 viser resultatet ved en emitterstrøm på ca 20 mA.



Figur 126: Test av linjefølgingsensor

Figuren viser at både sort og hvit kan benyttes, da grønn ligger midt mellom. Dersom emitterstrømmen økes, vil også sensorens avstandsområde økes tilsvarende. Forventet avstand til sensoren er ca 4 mm. Av praktiske grunner bør en sort linje benyttes, ettersom en hvit linje er mer utsatt for støv og skitt.

12.3.4 Estimator



Figur 127: Oversikt programvare

Bakgrunn

Estimator() har som oppgave å estimere robotens retning, hastighet og posisjon på tanken. Dette er en av robotens viktigste oppgaver, og nødvendig for å følge den ønskede ruten. Det er Estimatorens nøyaktighet som i hovedsak bestemmer om posisjoneringssystemet er bra nok.

Estimater

Følgende parametre estimeres:

- **Height [mm]**
Robotens høyde på tanken. Nullnivå er satt ved tankveggenes bunn.
- **Angle [rad]**
Robotens posisjon på tanken i det horisontale plan. Gitt i vinkel i forhold til en bestemt vertikal linje på tanken. Angle har verdier i området $0 - 2\pi$.
- **Heading [rad]**
Robotens retning ved kjøring på tankveggen. 0 tilsvarer x_b rettet horisontalt mot høyre sett fra tankens utside. *Heading* kan ha verdier i området $0 - 2\pi$.
- **Cone angle [rad]**
Robotens retning ved kjøring på tankbunnen. 0 tilsvarer x_b rettet tangentielt på tankbunnens sirkel. En positiv verdi tilsvarer x_b rettet inn mot tankens senter.
- **Radius [mm]**
Tankens *radius* ved aktuell posisjon. Denne er gitt av tankens dimensjoner. På bunnen estimeres denne på grunnlag av avstandsmålinger og odometri.
- **Speed [mm/s]**
Robotens hastighet.
- **Area_position [mm]**
Robotens posisjon i forhold til et X-Y-koordinatsystem for hele tankriggen (figur 60).

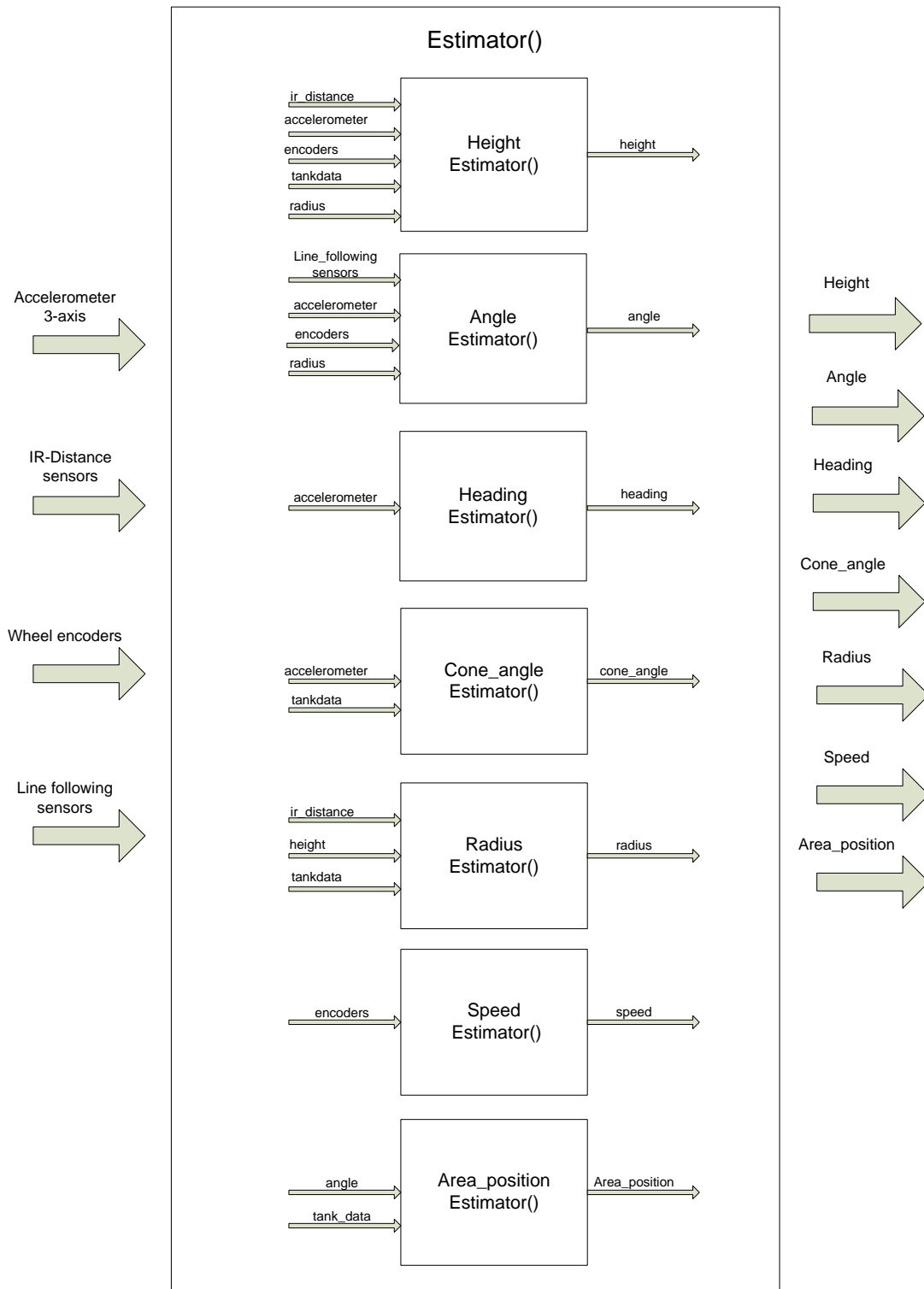
Innsignaler

Estimatorens innsignaler er i hovedsak:

- En enkoder på hvert hjul
- Vinkelmålinger *roll*, *pitch* og *yaw*
- Kalibrerte avstandsmålinger venstre, høyre og foran
- Linjefølgingssensorer venstre og høyre foran

Valgt løsning

Det er valgt å dele opp estimatoren i 7 hovedblokker: Height Estimator(), Angle Estimator(), Heading Estimator(), Cone Angle Estimator(), Radius Estimator(), Speed Estimator() og Area_Position Estimator(). Hver blokk har i oppgave å estimere hver sine parametre. Figur 128 viser en oversikt over den valgte løsningen med innsignaler og utsignaler.



Figur 128: Oppbygning av estimatoren

Odometri

Formler omkring grunnleggende odometri en robot med to hjul, basert på et enkelt X-Y-plan [44]:

$$O_{t+1} = O_t + \frac{D_R - D_L}{W} \quad (12.22)$$

$$D_{(t,t+1)} = \frac{D_R + D_L}{2} \quad (12.23)$$

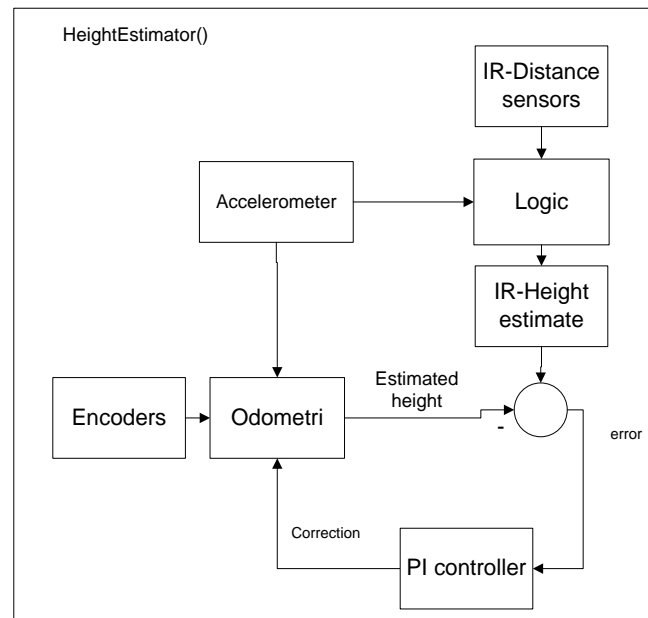
$$X_{t+1} = X_t + D_{(t,t+1)} \cos(O_{t+1}) \quad (12.24)$$

$$Y_{t+1} = Y_t + D_{(t,t+1)} \sin(O_{t+1}) \quad (12.25)$$

- O*: Retning i radianer
D_R: Tilbakelagt strekning høyre hjul siden forrige måling
D_L: Tilbakelagt strekning venstre hjul siden forrige måling
W: Avstand mellom hjulene
D_(t,t+1): Distanse kjørt siden forrige måling
X: Posisjon i X – retning
Y: Posisjon i Y – retning

12.3.4.1 HeightEstimator()

HeightEstimator() estimerer høyden ved kjøring på tankenveggen. Dette er i hovedsak basert på odometri fra enkoderne og avstandsmålinger. Odometri har alltid små avvik, gjerne på grunn av feil hjuldiameter, ujevnheter i underlaget, hjulspinn eller numeriske feil. Derfor er det ønskelig å oppdatere estimatet med en korleksjon.

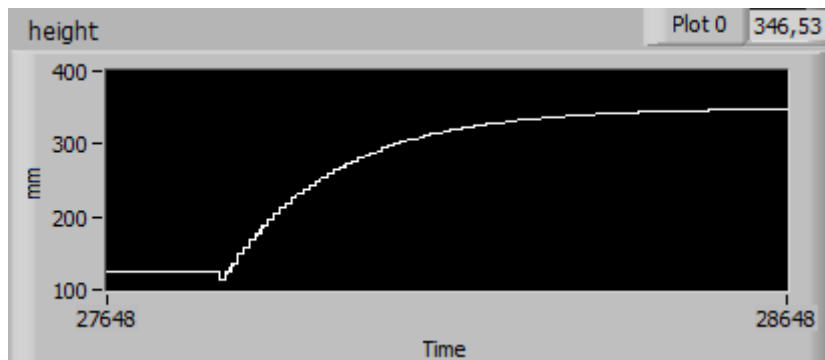


Figur 129: Prinsipp for heightEstimator()

Korreksjonen kommer fra avstandsmålingene. Avviket mellom høyde basert på avstandsmålinger og det beste posisjonsestimatet kobles tilbake til odometrien som en korleksjon via en regulator. Ved å justere forsterkningen i PI-regulatoren, endres avstandsmålingens vektning. Dette er en justeringsparameter som bør stå i forhold til forventet avvik på odometrien og høydemålingens støy. Dersom ingen avstandsmåling foreligger, oppdateres høyden kun på grunnlag av odometri.

Tuning av PI-controller

PI-regulatoren justeres med utgangspunkt i det forventede avviket på odometrien. Integrasjonstida til regulatoren må være lavere enn det forventede avviket i odometrien i samme tidsperiode. Figur 130 viser høydeestimatet ved et sprang i høyden fra ca 100 mm til 346 mm.



Figur 130: Sprangrespons for estimert heading

Den ønskede responsen er rolig uten oversving. En praktisk innstilling av parametrene er vist i kapittel 15.

Oppdatering av høydeestimat på grunnlag av odometri

Odometrien oppdaterer høydeestimatet på grunnlag av følgende beregninger:

$$\alpha = \operatorname{atan} \left(\frac{\frac{\text{upper_dia}}{2} - \frac{\text{lower_dia}}{2}}{\text{height_cylinder}} \right) \quad (12.26)$$

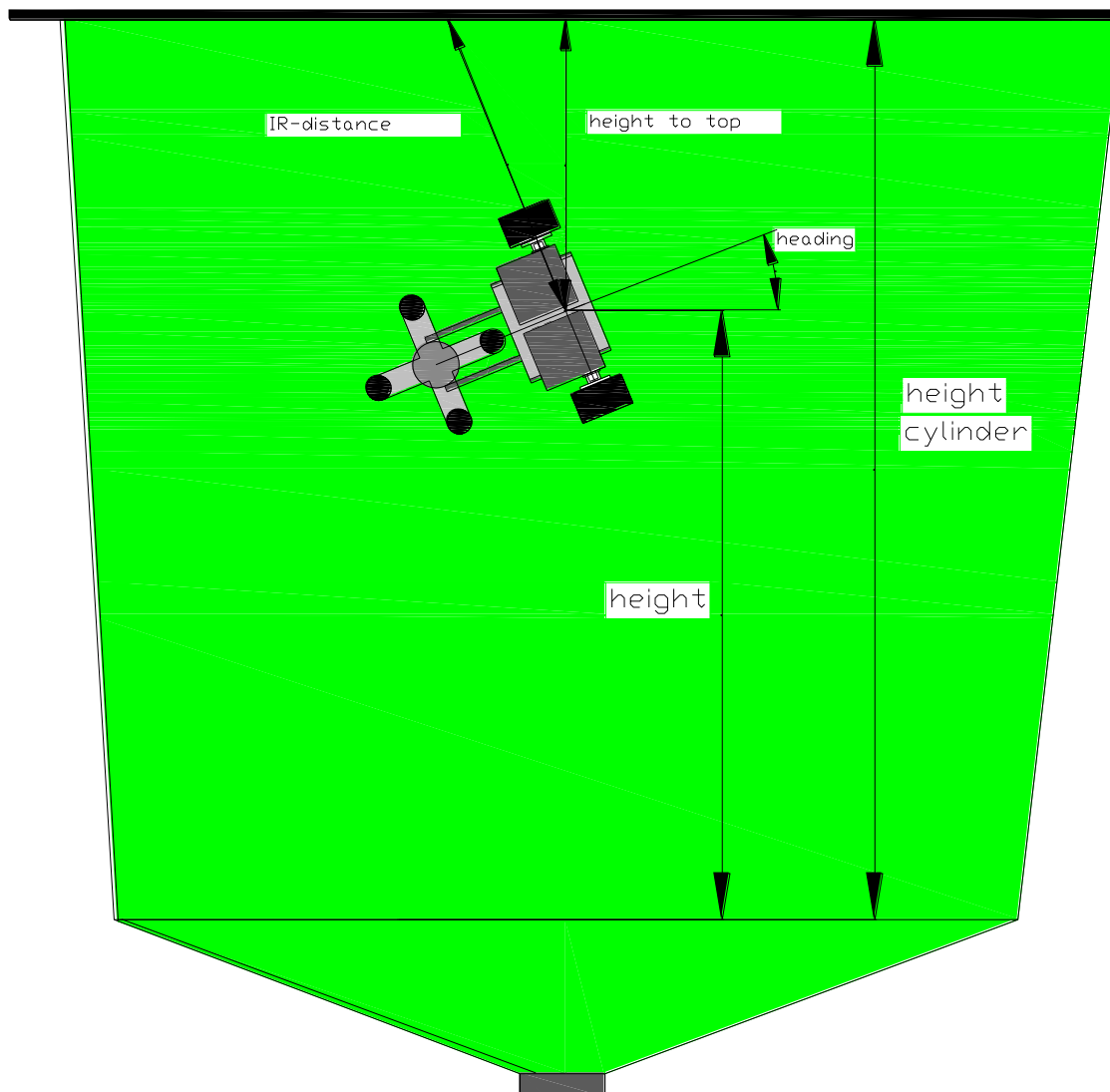
$$\text{height}_{(k+1)} = \text{height}_{(k)} + \frac{D_{(t,t+1)} * \sin(\text{heading}) * \cos(\alpha)}{\text{radius}} \quad (12.27)$$

<i>upper_dia</i> :	<i>Tankveggenes øvre diameter</i>
<i>lower_dia</i> :	<i>Tankveggenes nedre diameter</i>
<i>height_cylinder</i> :	<i>Tankveggenes høyde</i>
<i>height_(k+1)</i> :	<i>Oppdatert estimat av høyden</i>
<i>height_(k)</i> :	<i>Forrige estimat av høyden</i>
<i>heading</i> :	<i>Robotens retning i forhold til det horisontale plan</i>
<i>radius</i> :	<i>Beste estimat av tankens radius ved aktuell høyde</i>
<i>zero update</i> :	<i>Deteksjon av nullstripe</i>
<i>α</i> :	<i>Tankveggenes vinkel i forhold til vertikalen. Ca 3° for aktuelle tanker.</i>
<i>D_(t,t+1)</i> :	<i>Distanse kjørt siden forrige måling</i>

Av ligningene ser vi at dette er en kombinasjon av odometri og vinkelmålinger, da parameteren *heading* beregnes på grunnlag av akselerometerets vinkler. Løsningen gir et estimat med begrenset drift over tid, da *headingens* avvik er tilnærmet konstant.

IR-Height estimate

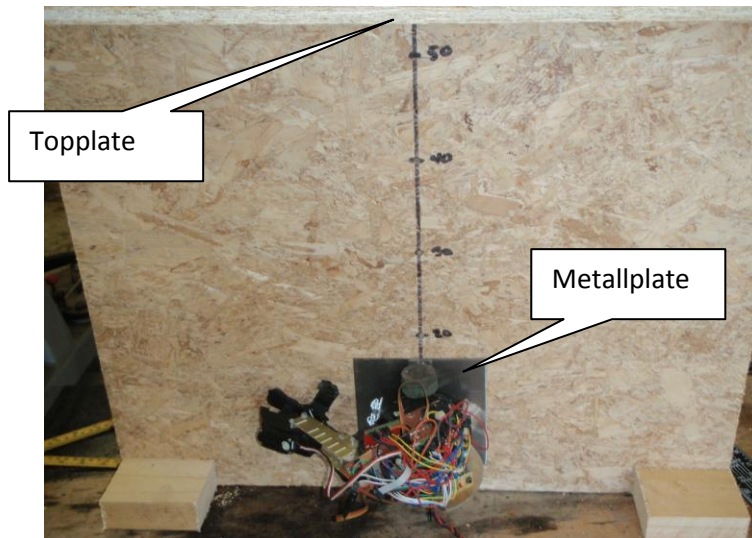
Høydeestimatet fra avstandsmålingen baserer seg på en målt avstand opp til tankenriggens toppplate. Ettersom *heading* vil variere, må avstandsmålingen korrigeres for vinkelen. Figur 131 viser prinsippet for avstandsmåling med robotens venstre avstandsmåler.



Figur 131: Høydemåling med avstandssensorer

Kalibreringsrigg

Det ble konstruert en testrigg for kalibrering og test av høydeestimatet. Testriggen består av en treplate med flere kjente avstander mot en topplate. Testriggen kan simulere parameteren *height* for verdiene 10, 20, 30, 40 og 50 cm. En metallplate med en sentertapp mot origo i robotens body-kordinatsystem sikrer en konstant høyde når robotens *heading* endres. Magnetisk feste gjør det enkelt å endre robotens *heading*. *Heading* og *height* leses av i brukergrensesnittet. Figur 132 viser et bilde av roboten på kalibreringsriggen.



Figur 132: Kalibreringstrigg for høydemåling

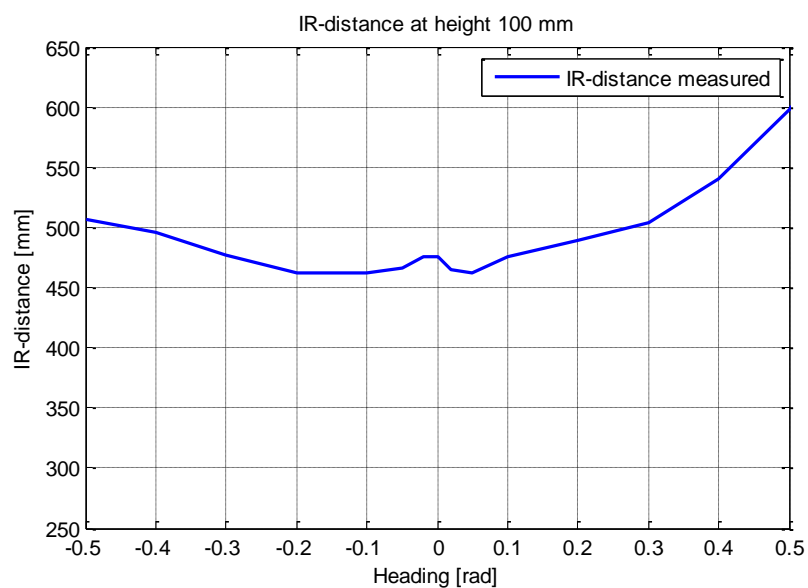
IR-distance ved varierende heading

For å finne avvik i høyde ved ulike heading, ble målinger av vestre IR-avstandssensor mot topplaten gjennomført. Dette ble gjort ved høydene 10 cm og 40 cm på kalibreringsriggen. Målinger ved forskjellige høyder er viktig, da sensorenes deteksjonsbredde er avhengig av avstanden. Figur 133 og Figur 134 viser avstandsmålinger ved heading-variasjoner på opptil 0,7 rad (ca 40°) for høydene 10 cm og 40 cm. Ved følgende vinkler i begge retninger ble målinger utført i hver høyde:

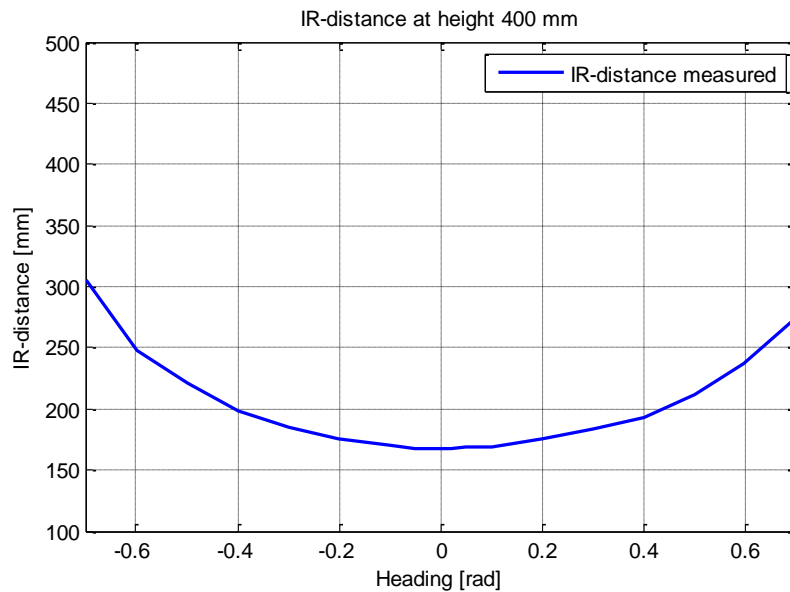
Tabell 8: Heading-verdier i måling

Heading [rad]	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,05	0,02	0
---------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	---

Ved høyden 100 mm ble endringer i heading over 0,5 rad utelatt, da målingene var varierende og usikre. Figurene viser et tydelig behov for korreksjoner for varierende heading. Ved begge høydene måles et avvik på opptil 130 mm for de viste vinklene. Avviket gir store feil i estimat av height, og dermed også robotens bevegelser.



Figur 133: IR-distance ved høyde 100 mm



Figur 134: IR-distance ved høyde 400 mm

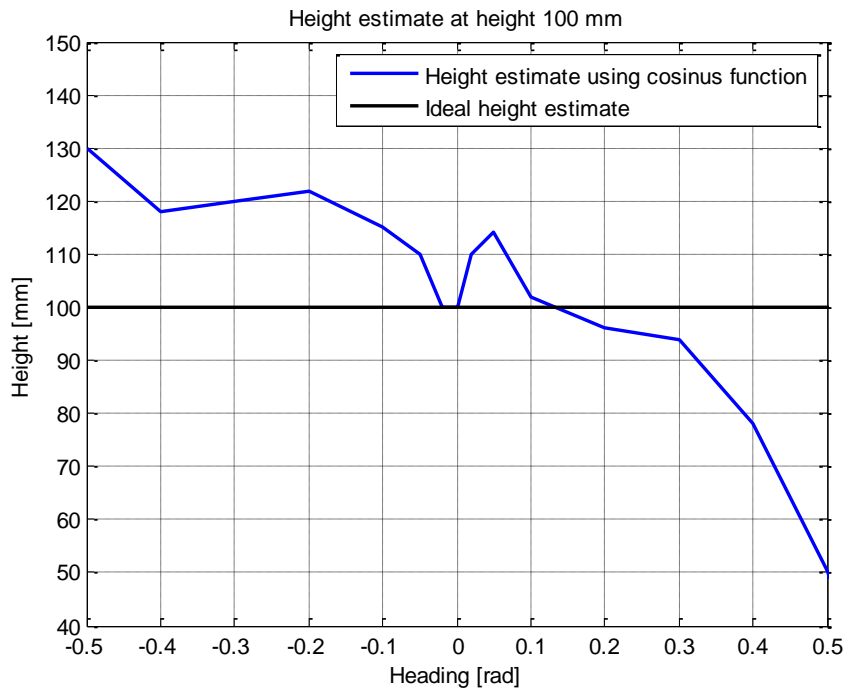
Høydeestimat basert på trigonometri

En naturlig korreksjon er å benytte enkel trigonometri. Følgende kalkulasjon vil korrigere estimatet av høyden for varierende heading:

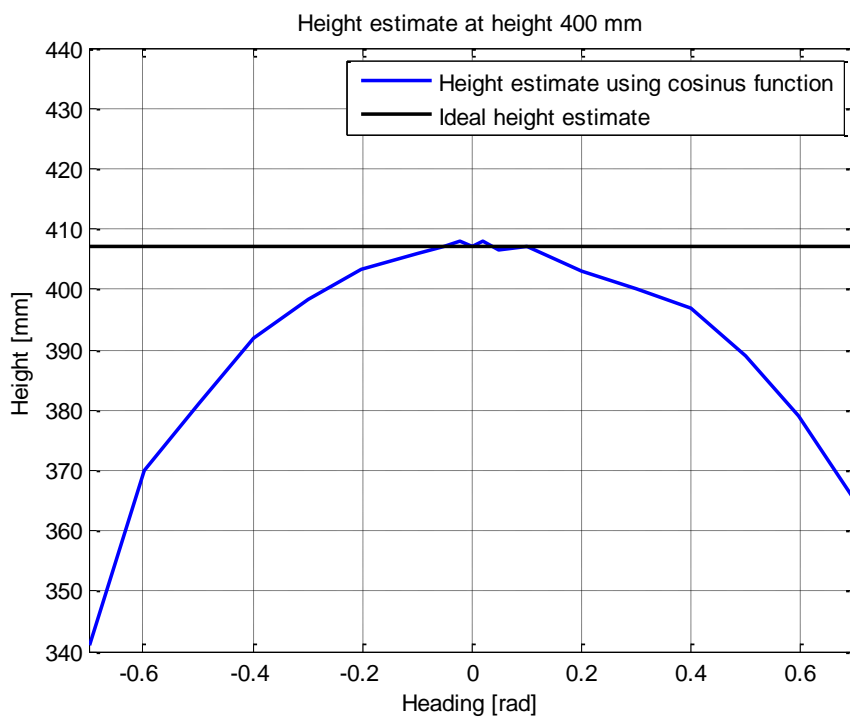
$$height = height\ cylinder - IR\ distance * \cos(heading) \quad (12.28)$$

<i>height:</i>	<i>Høydeestimat fra avstandsmåler</i>
<i>height cylinder:</i>	<i>Tankveggens høyde</i>
<i>IR distance:</i>	<i>Måling fra avstandsmåler</i>
<i>heading:</i>	<i>Robotens retning i det vertikale plan</i>

Ulempen med denne metoden er at det forventes at avstandssensoren er perfekt vinklet i forhold til robotens koordinatsystem, og at sensorens deteksjonsbredde er konstant for hele måleområdet og liten. Figur 135 og Figur 136 viser høydeestimater basert på trigonometri for høydene 10 cm og 40 cm basert på de samme målte verdiene.



Figur 135: Høydeestimat med trigonometri for høyde 100 mm



Figur 136: Høydeestimat med trigonometri for høyde 400 mm

Grafene viser avvik på typisk opptil 50 mm fra virkelig høyde ved et økende avvik i heading. Ved bruk av metoden basert på enkel trigonometri reduseres da feilen fra 130 mm til 50 mm. Vi kan konkludere med at metoden er for unøyaktig for våre posisjonskrav.

Utelate målinger

Et mulig tiltak for å minske avviket er å utelate avstandsmålingene dersom *heading* varierer mye. Dette kan gjøres i blokken Logic (Figur 129). Da vil kun odometri benyttes for å oppdatere høydeestimatet dersom *heading* varierer mye. Dersom avstandsmålingene ved *heading* større enn $\pm 0,3$ rad utelukkes, vil avvikene reduseres til mindre enn ca 20 mm i høyde (Figur 135, Figur 136). Ulempen med denne løsningen er at roboten i større perioder må oppdatere høyden kun på grunnlag av odometrien. I verste fall kan dette føre til store avvik.

Korrigere for strålebredden

En mulighet for å forbedre nøyaktigheten er dersom sensorens deteksjonsbredde korrigeres. Dette kan gjøres ved at deteksjonsområdet modelleres som for eksempel en trekant, et rektangel eller en mer avansert funksjon av avstanden. Beregningene blir da også tilsvarende mer avanserte. Ved å se på Figur 135 og Figur 136, ser vi at det er kun ved høyden 40 cm at høydeestimatet er tilnærmet symmetrisk om *heading*=0. Dette viser at en avansert modell for deteksjonsområdet må utvikles dersom god nøyaktighet skal oppnås for begge høydene.

Høydeestimat basert på kurvetilpasning

Løsningen basert på trigonometri gir uønsket stort avvik. Alternativet er å benytte et polynom for å beskrive forholdet mellom avstandsmålingen og parametrene *heading* og *height*. Med denne løsningen blir skjevstilling og forskjeller i hver sensor naturlig kalibrert bort gjennom en individuell kalibrering.

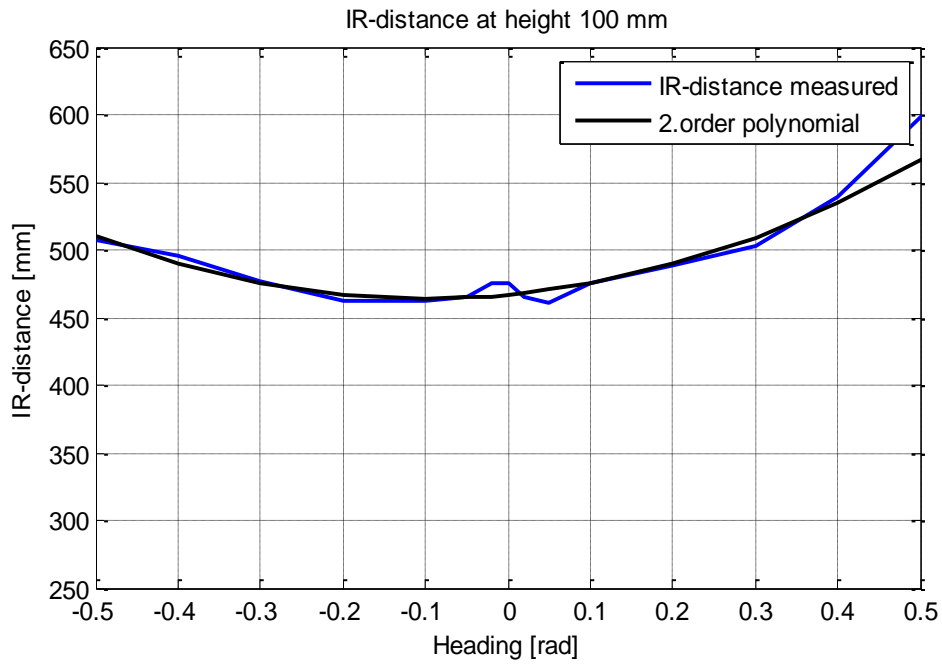
Kurvetilpasning

Minste kvadraters metode benyttes for å få en kurvetilpasning av de gjennomførte målingene. Det er ønskelig å holde polynomets orden så lavt som mulig, og samtidig få en god nok nøyaktighet. Det fordi et polynom av høyere orden gir unødvendig mange parametre og utregninger i mikrokontrolleren. Målt avstand kan uttrykkes som:

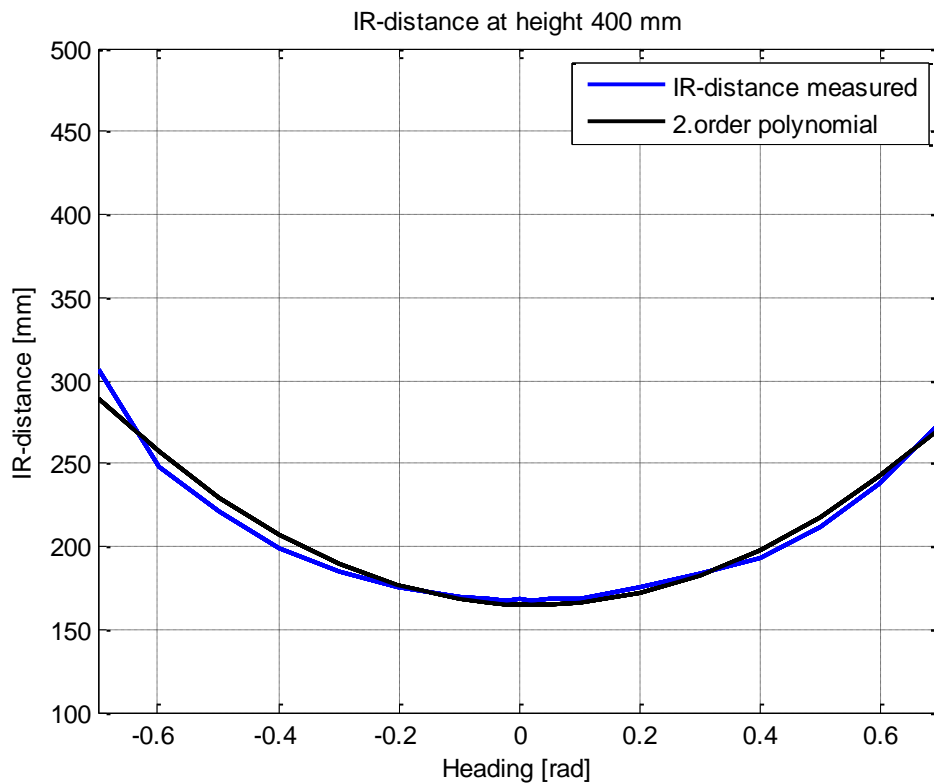
$$IR_{dist_polynomial} = P(3) + heading * P(2) + (heading)^2 * P(1) \quad (12.29)$$

P: 2. ordens polynom
IR_{dist_polynomial}: Kurvetilpasset polynom

Figur 137 og Figur 138 viser kurvetilpasninger med 2.ordens polynomer for de to aktuelle høydene.



Figur 137: Kurvetilpasning 2.ordens polynom ved høyde 100 mm

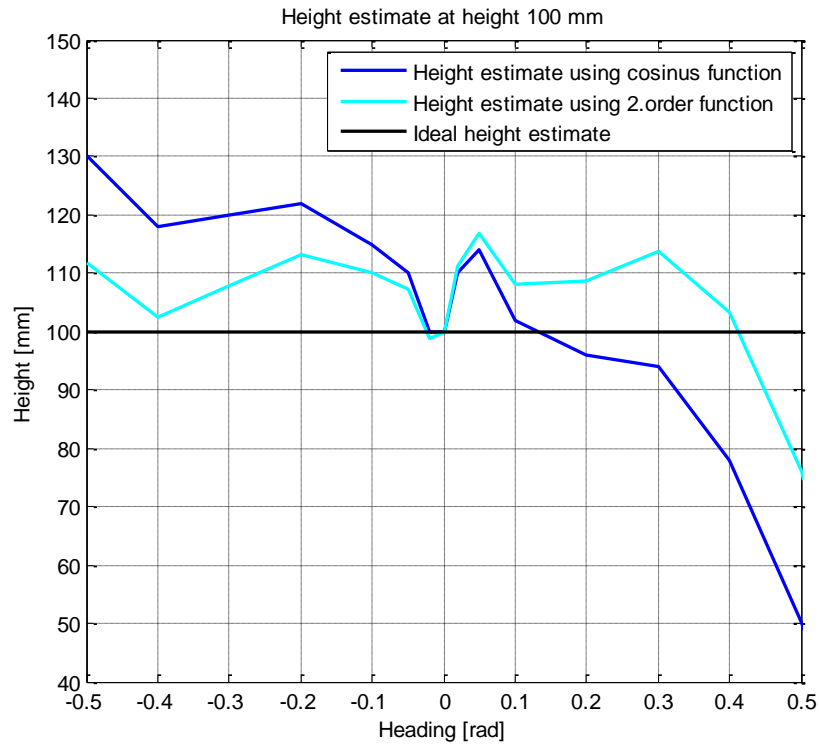


Figur 138: Kurvetilpasning 2.ordens polynom ved høyde 100 mm

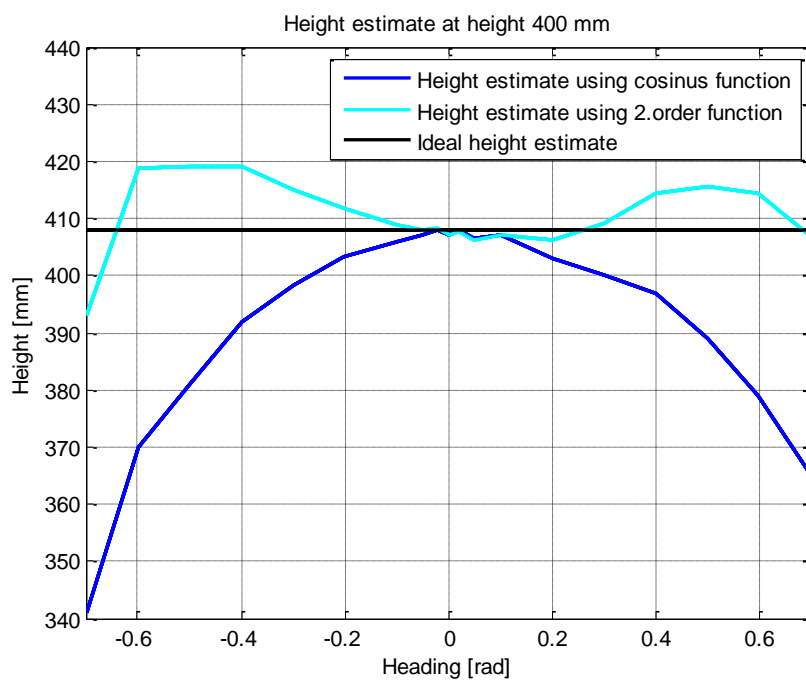
Kurvetilpasningene med 2.ordens polynomer gir små avvik og vurderes derfor som gode nok. Et høyere ordens polynom er unødvendig, da feil i målingene og andre usikkerheter trolig er større. Basert på viste kurvetilpasninger estimeres høyden gjennom følgende sammenheng:

$$Height = height\ cylinder - (IR\ distance - (heading * P(2) + (heading)^2 * P(1))) \quad (12.30)$$

Figur 139 og Figur 140 viser høydeestimatene ved bruk av 2.ordens-funksjonen for de aktuelle høydene, sammenlignet med metoden basert på trigonometri. Grafene viser en betydelig forbedring i forhold til metoden basert på trigonometri. Avviket holder seg typisk under 20 mm for hele vinkelområdet.

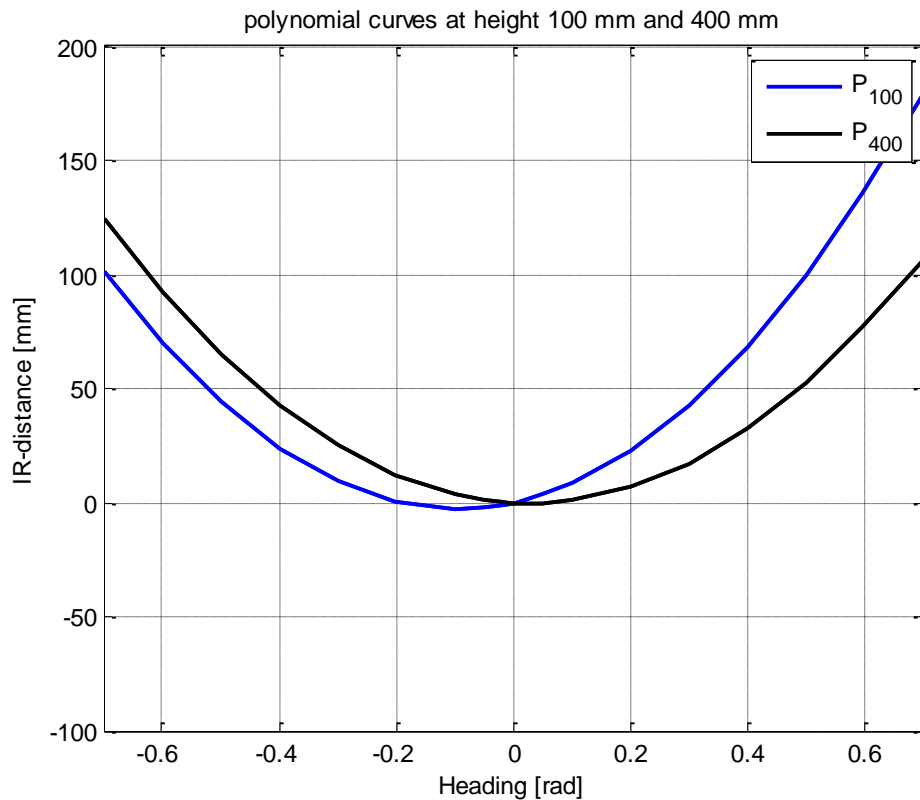


Figur 139: Høydeestimat ved 2.ordens funksjon og trigonometri ved høyde 100 mm



Figur 140: Høydeestimat ved 2.ordens funksjon og trigonometri ved høyde 400 mm

Ulempen med den viste metoden er at et polynom må tilpasses hver av de to høydene. I praksis vil avstanden variere mellom dem. Et bytte mellom de to polynomene vil gi betydelig avvik og uønsket støy. For å løse dette kan man lage polynomer for flere avstander, og bytte mellom dem basert på estimert høyde. Alternativt kan man ha et polynom som er en funksjon av høyden eller et polynom som representerer middelveiden av de to polynomene. For å vurdere dette, kan vi se på de to polynomene for høydene 10 cm og 40 cm.



Figur 141: 2.ordens polynomer for høydene 100 mm og 400 mm

Polynomene er ulike. Dette vil gi store avik på opptil 6 cm dersom kun ett av polynomene eller en middelveidi mellom dem benyttes. Polynomene har følgende numeriske verdier:

$$P_{100} = [286,10 \quad 55,41 \quad 466,89] \quad (12.31)$$

$$P_{400} = [235,17 \quad -12,75 \quad 164,63] \quad (12.32)$$

Polynom som funksjon av høyden

Det er ønskelig at begge polynomene P_{100} og P_{400} beskrives av et polynom som en funksjon av høyden. Da man forventer at det beste høydeestimatet alltid kun har små avvik i forhold til den virkelige høyden, er dette mulig.

I polynomene representerer $P(3)$ offsetverdien for høyden. Denne er ikke av interesse i dette tilfellet. Løsingen blir derfor å finne en funksjon for hver av de to første parametrene $P(1)$ og $P(2)$.

1.ordens eller 2.ordens funksjon

Ettersom polynomer for kun to høyder er laget, velges en 1.ordens tilnærming for hver av parametrene $P(1)$ og $P(2)$. Dersom tre eller flere høydepolynomer var tilgjengelig, ville muligheten for

en mer nøyatig modell basert på en 2.ordens modell vært tilstedet. Dette kan gjøres i ettertid dersom modellen gir for store avvik i høydeestimatet.

En lineær modell av høydeavhengigheten ble laget og implementert for å vurdere nøyaktigheten. Funksjonen for hver av parametrene $P(1)$ og $P(2)$ blir dermed følgende.

$$P(1) = a_1 * height + b_1 \quad (12.33)$$

$$P(2) = a_2 * height + b_2 \quad (12.34)$$

Parametrene a_i og b_i finnes ut fra følgende beregninger:

$P(1)$:

$$a_1 = \frac{P_{400}(1) - P_{100}(1)}{400 - 100} = \frac{235,17 - 286,10}{400 - 100} = -0,170 \quad (12.35)$$

$$b_1 = P_{100}(1) - a_1 * 100 = 286,10 - (-0,1698) * 100 = 303,1 \quad (12.36)$$

$P(2)$:

$$a_2 = \frac{P_{400}(2) - P_{100}(2)}{400 - 100} = \frac{-12,75 - 55,41}{400 - 100} = -0,227 \quad (12.37)$$

$$b_2 = P_{100}(2) - a_2 * 100 = 55,41 - (-0,227) * 100 = 78,1 \quad (12.38)$$

Kontroll av funksjonene $P(1)$ og $P(2)$ gjøres ved å lage tilsvarende polynomer for høydene 20 cm og 30 cm, og sammenligne dem med polynomene P_{100} og P_{400} . Funksjonene blir som følger:

P_{200} :

$$P_{200}(1) = a_1 * height + b_1 = -0,170 * 200 + 303,1 = 269,1 \quad (12.39)$$

$$P_{200}(2) = a_2 * height + b_2 = -0,227 * 200 + 78,1 = 32,7 \quad (12.40)$$

$$P_{200} = [269,1 \quad 32,7 \quad 0] \quad (12.41)$$

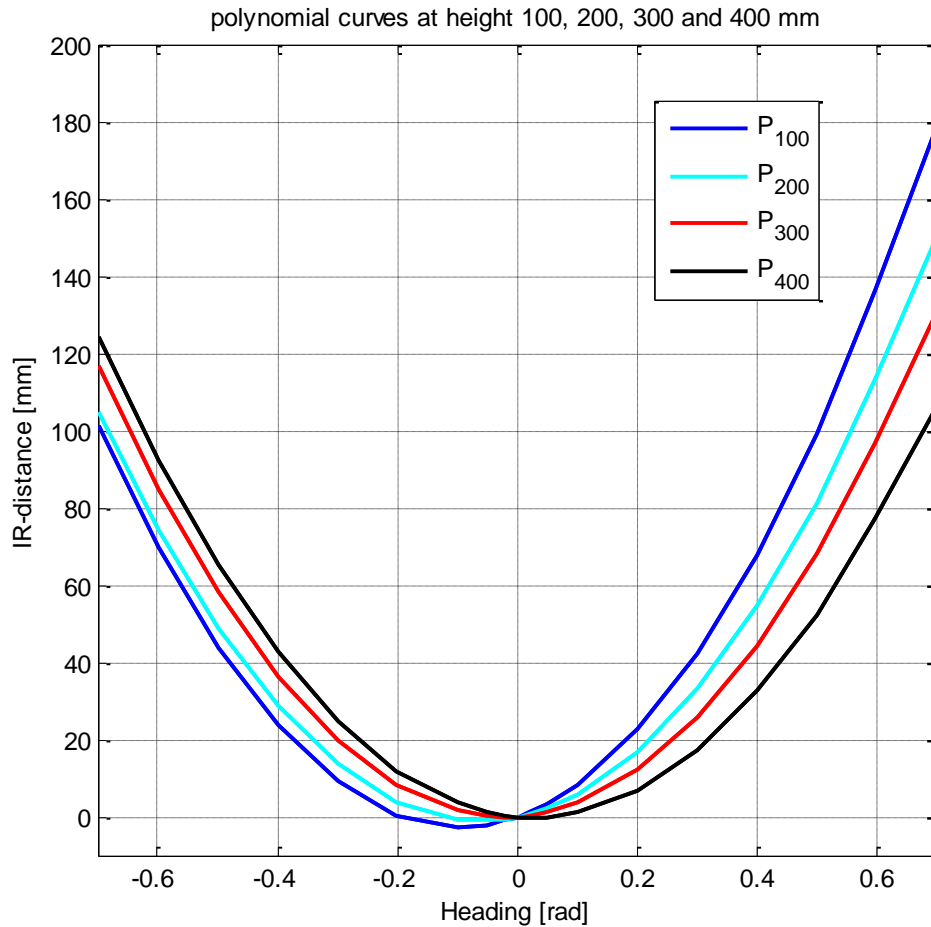
P_{300} :

$$P_{300}(1) = a_1 * height + b_1 = -0,170 * 300 + 303,1 = 252,1 \quad (12.42)$$

$$P_{300}(2) = a_2 * height + b_2 = -0,227 * 300 + 78,1 = 10,0 \quad (12.43)$$

$$P_{300} = [252,1 \quad 10,0 \quad 0] \quad (12.44)$$

Figur 142 viser et plott av polynomene P_{100} , P_{200} , P_{300} og P_{400} . Grafene viser at polynomet er avhengig av høyden. Resultatet ser bra ut, og kun en praktisk test ved alle høydene 10, 20, 30 og 40 cm på kalibreringsriggen vil vise hvor god modellen er.



Figur 142: Kontroll av høydeavhengig polynom

Den sammensatte funksjonen for høyden som funksjon av avstandsmålingen, *headingen* og høyden blir dermed følgende:

$$\begin{aligned}
 & height_{(k+1)}(IR\ distance_{(k)}, heading_{(k)}, height_{(k)}) = \\
 & height\ cylinder - (IR\ distance_{(k)} - (heading_{(k)} * P_2(height_{(k)}) + (heading_{(k)})^2 * P_1(height_{(k)})))
 \end{aligned}
 \tag{12.45}$$

Innsatt P_i :

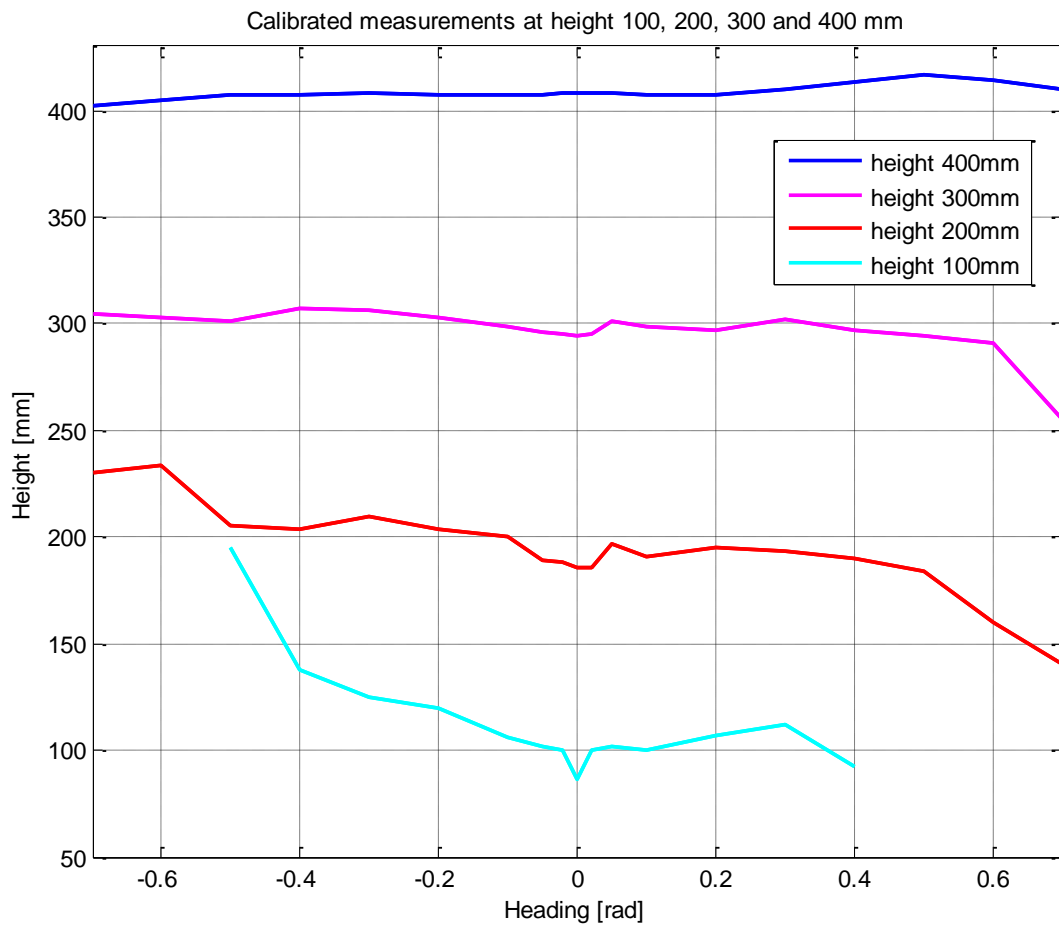
$$\begin{aligned}
 & height_{(k+1)}(IR\ distance_{(k)}, heading_{(k)}, height_{(k)}) = \\
 & height\ cylinder - (IR\ distance_{(k)} - (heading_{(k)} * (a_2 * height_{(k)} + b_2) + (heading_{(k)})^2 * (a_1 * height_{(k)} + b_1)))
 \end{aligned}
 \tag{12.46}$$

- $height_{(k+1)}$: Beregnet høydeestimat fra avstandsmålingen
- $height_{(k)}$: Beste høydeestimat tilgjengelig fra forrige sample
- $heading_{(k)}$: Robotens retning ved forrige sample
- $IR\ distance_{(k)}$: Kalibrert avlesning fra avstandsmåler

På grunn av store individuelle forskjeller i avstandssensorene, er en funksjon $height(IR\ distance, heading, height)$ for hver av avstandsmålerne nødvendig.

Praktisk test av funksjonen

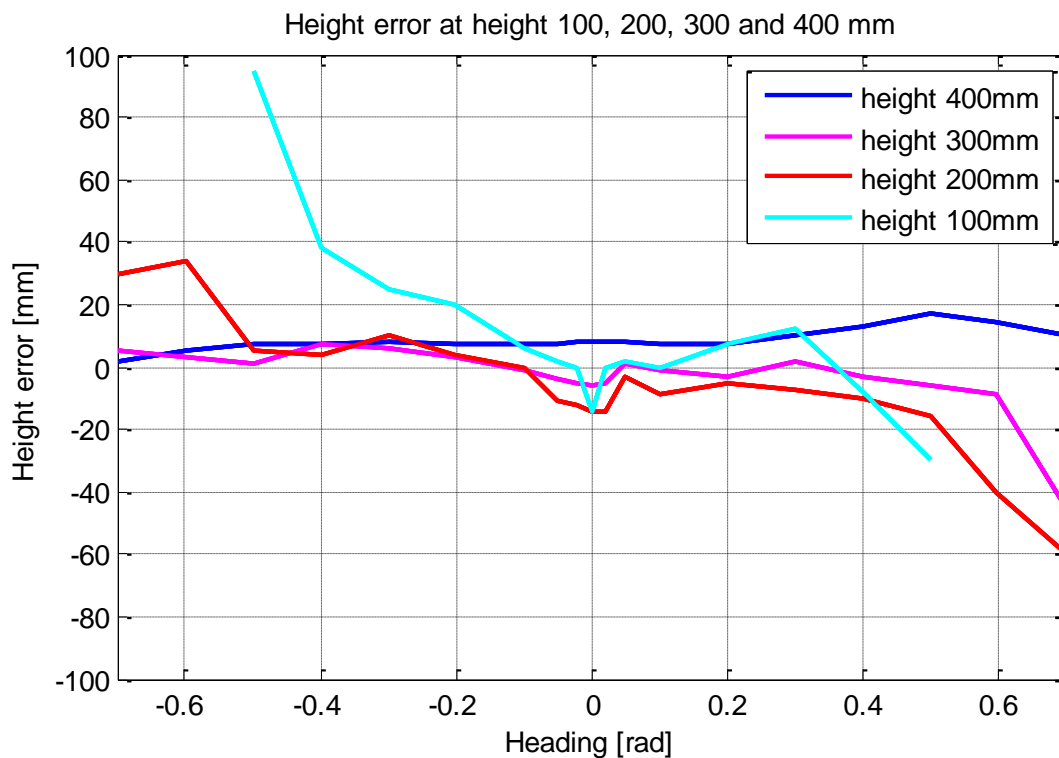
For å teste den utviklede funksjonen ble en måleserie gjennomført på testtriggen. Denne ble gjennomført ved alle høydene 10 cm, 20 cm, 30 cm og 40 cm. Figur 143 viser resultatet. Vi ser at kurvene er meget flate, og sammenlignet med bruk av kun trigonometri (figur 135 og figur 136), er en stor forbedring oppnådd. Blå kurve ligger i overkant av 400 mm. Dette kommer av unøyaktighet i lineariseringen av sensoren.



Figur 143: Test av høydeestimat

Diskusjon

Figur 144 viser avviket i estimert høyde for alle målingene på figur 143. For høydene 20, 30 og 40 cm ser vi at avviket er under 2 cm for hele området $\pm 0,5$ rad. Dette er meget bra.

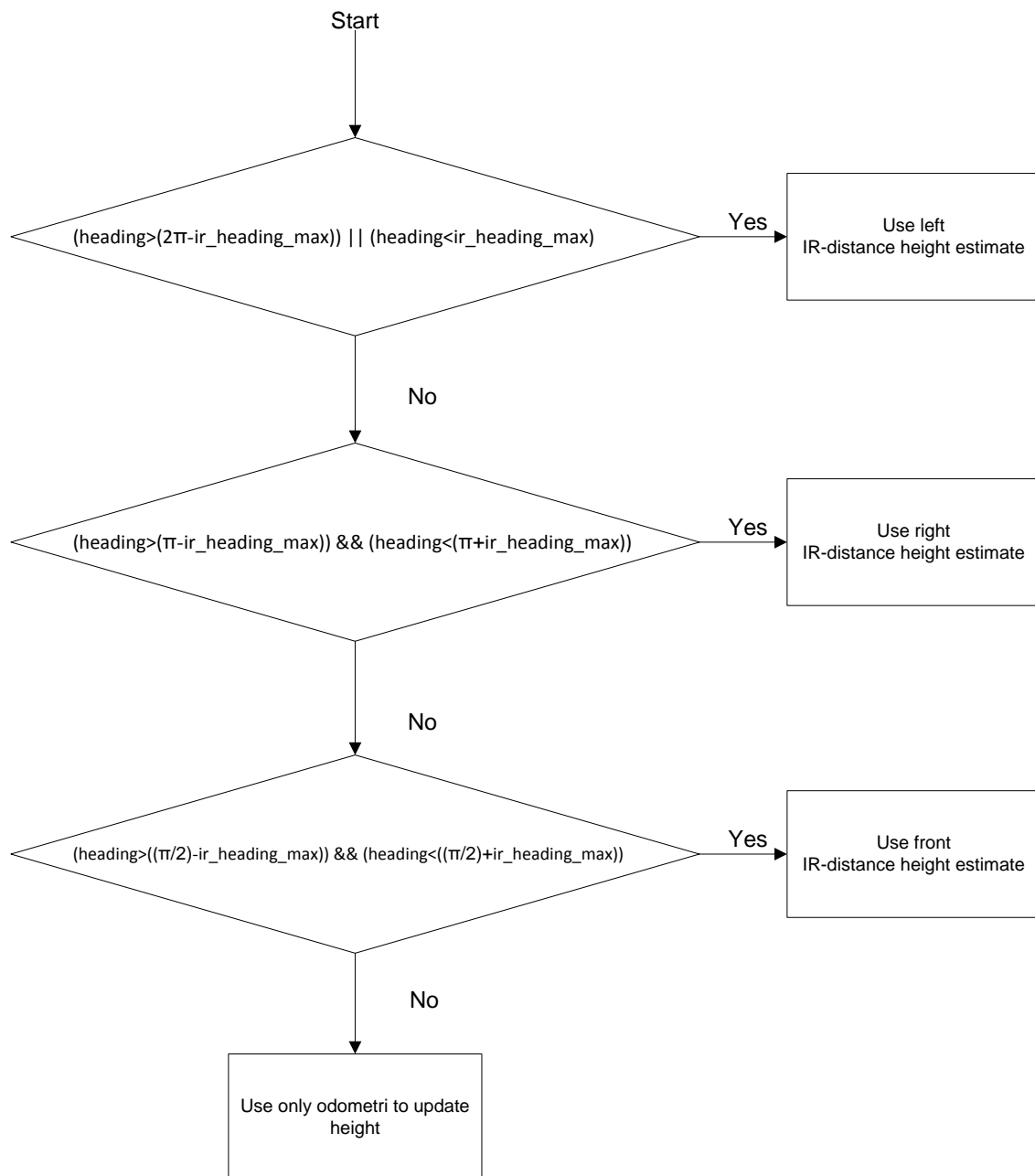


Figur 144: Høydefeil for høydene 100-400 mm

Resultatet viser at estimatet av *height* på grunnlag av avstandsmålerne holder den ønskede nøyaktigheten på 3 cm. I praksis vil de viste avvikene virke direkte inn på *height*-estimatet ved rens av tankvegg. Det fordi *heading* da alltid er innenfor de gitte vinklene i figuren over.

Logic funksjon

Logic-funksjonen (figur 129) bestemmer i hovedsak hvilken av avstandsmålerne som skal benyttes til oppdatering av høydeestimatet. Dette gjøres på grunnlag av robotens *heading*. Parameteren som bestemmer den maksimale variasjonen i *heading* for gyldig avstandsmåling kalles *ir_heading_max*. Dette gir følgende logikk for valg av IR-avstandsmåler:



Figur 145: Logikk for valg av IR-avstandssensor til høydeestimering

Figur 143 viser målt estimert høyde som funksjon av *heading*. Ved høyden 100 mm er avviket i *height* over 2 cm ved en *heading* større enn +0,3 rad. Ved økende høyde utvides dette området. Det viser at parameteren *ir_heading_max* bør være høydeavhengig. Dermed kan et større utslag i *heading* tillates ved en større høyde. Slik får Estimatoren utnyttet avstandsmålerne maksimalt.

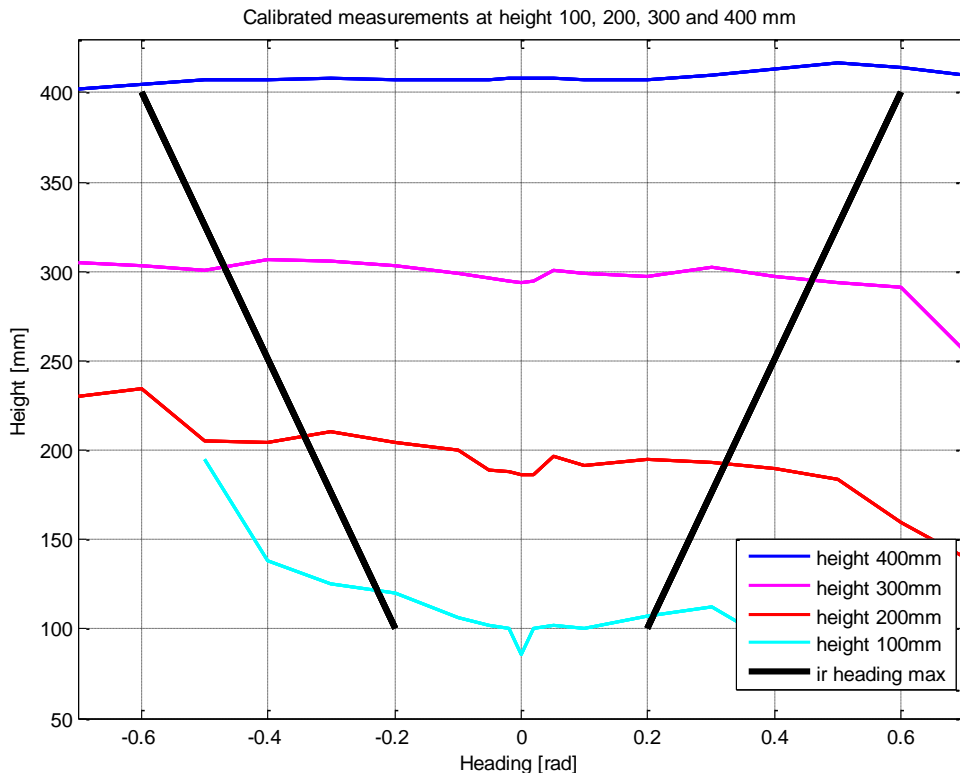
Høydeavhengig *ir_heading_max*

Figur 146 viser en løsning for høydeavhengig parameter *ir_heading_max*. En 1.ordens funksjon benyttes. Løsningen blir da på formen:

$$ir_heading_max(height) = c * height + d \quad (12.47)$$

c: Førsteordens koeffisient
d: Offsetverdi

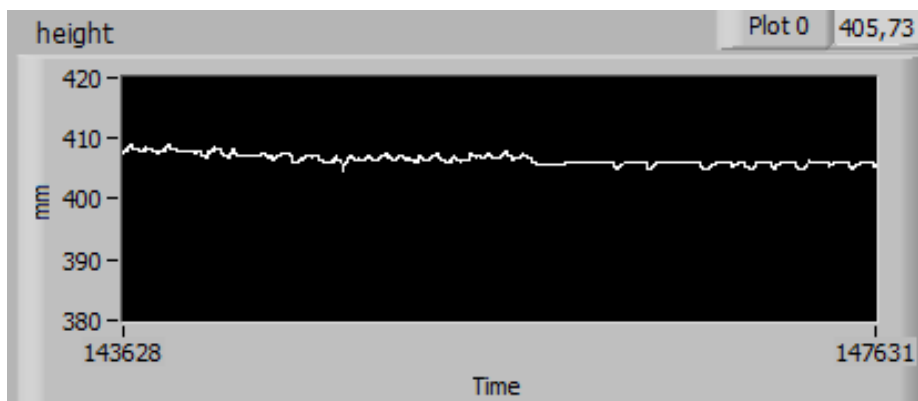
Det er ønskelig at grenseverdiene skal krysse punktene (+-0,2 100) og (+-0,6 400). Parametrene $c=0,00133$ og $d=0,067$ gir kurvene på figuren. Gyldig område er mellom de sorte strekene. Et avvik på under ca 2 cm oppnås da for hele tankveggen høyde.



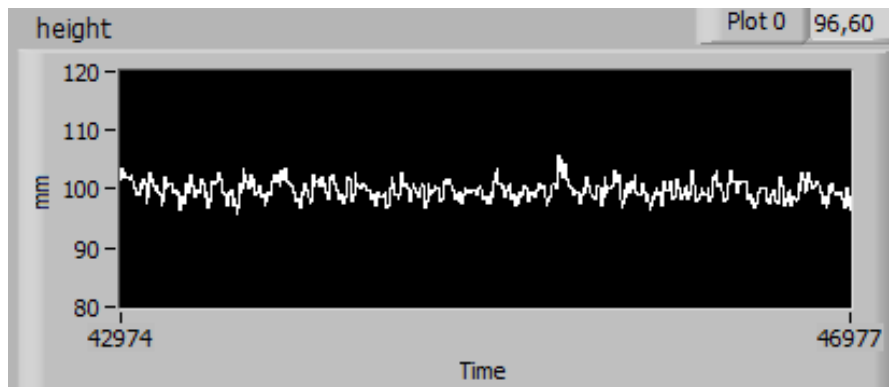
Figur 146: Høydeavhengig *ir_heading_max*

Diskusjon

Løsningen med å tilbakekoble *height* i vinkelkorreksjonen for høydeestimatet er en smart løsning. Mye tyder på at IR-avstandsmålerens nøyaktighet er utnyttet til det maksimale av hva som er praktisk mulig. Dette kan vi se fra sensorens egenstøy på Figur 147 og Figur 148. Denne er betydelig ved større avstander.



Figur 147: IR-sensorens egenstøy ved høyden 40 cm

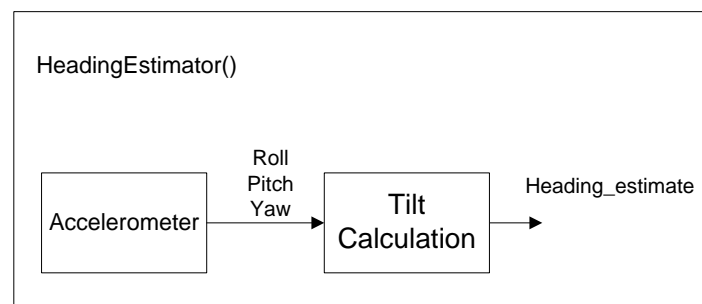


Figur 148: IR-sensorens egenstøy ved høyden 10 cm

Avstandssensorens støy ved en høyde på 10 cm er oppe i maksimalt 1 cm p-p. Forskjellen på støyen i de forskjellige høydene kommer av sensorens logaritmiske utgang. Følgende tiltak gjøres i HeightEstimator() for å fjerne støyen:

PI-Controlleren justeres med en lav forsterkning og lengre integrasjonstid slik at avstandsmålerens støy fjernes fra reguleringsløyfen. I praksis lavpassfilteres da avstandsmålingen gjennom en integrator. Odometrien vil på den måten få en større påvirkning. Odometri har naturligvis en stor nøyaktighet for endringer over korte tidsrom.

12.3.4.2 HeadingEstimator()



Figur 149: Prinsipp HeadingEstimator()

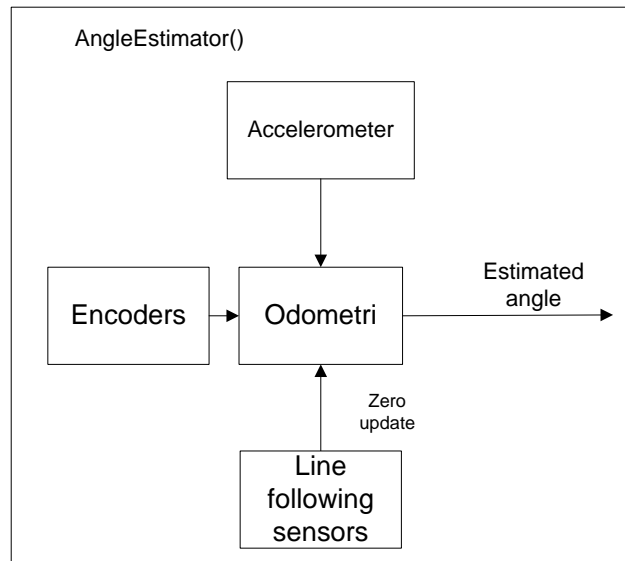
HeadingEstimator() er en enkel utregning av *heading* på bakgrunn av vinklelen *pitch*. Akselerometeret gir absolutt vinkel med en høy båndbredde, så ingen oppdatering fra odometri er nødvendig. Følgende sammenheng gir estimert *heading* i området $[0, 2\pi]$:

$$heading = pitch \quad (12.48)$$

$$if(pitch < 0) \rightarrow heading = pitch + 2\pi \quad (12.49)$$

12.3.4.3 AngleEstimator()

Funksjonen AngleEstimator() oppdaterer parameteren *angle* i hovedsak på grunnlag av odometri. På grunn av odometriens avvik, oppdateres *angle* av strekfølgeren en gang på hver runder rundt tanken (se figur 73). Den totale feilen i *angle* blir dermed liten.



Figur 150: Blokkskjema for AngleEstimator()

Følgende beregninger gjøres i odometrien:

$$angle_{(k+1)} = angle_{(k)} + \frac{D_{(k,k+1)} * \cos(heading_k) * \sin(\alpha)}{radius} \quad (12.50)$$

$$if(zero\ update) \rightarrow angle_{(k+1)} = 0 \quad (12.51)$$

$angle_{(k+1)}$:	Oppdatert estimat av angle
$angle_{(k)}$:	Beste estimat av angle
$heading_{(k)}$:	Beste estimat av heading
$radius$:	Beste estimat av tankens radius ved aktuell høyde
$zero\ update$:	Deteksjon av nullstripe
α :	Tankveggenes vinkel i forhold til vertikalen.
$D_{(k,k+1)}$:	Distanse kjørt siden forrige måling

0-2 π problem

Det er ønskelig at $angle$ holdes i området $[0, 2\pi]$. Løsningen på dette er enkel logikk:

$$if(angle_{(k+1)} > 2\pi) \rightarrow angle_{(k+1)} = angle_{(k+1)} - 2\pi \quad (12.52)$$

$$if(angle_{(k+1)} < 0) \rightarrow angle_{(k+1)} = angle_{(k+1)} + 2\pi \quad (12.53)$$

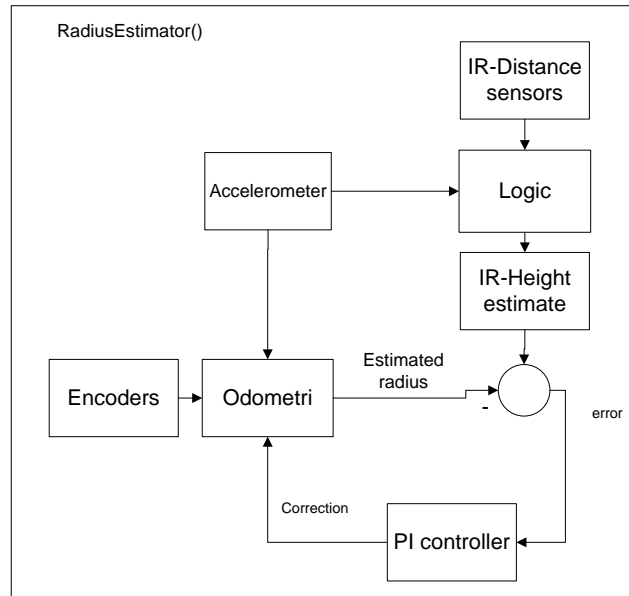
12.3.4.4 RadiusEstimator()

Ettersom tankens dimensjoner er kjent, vil $radius$ på tankveggen være gitt av høyden som:

$$radius_{wall} = \frac{lower_dia}{2} + height * \cos(\alpha) \quad (12.54)$$

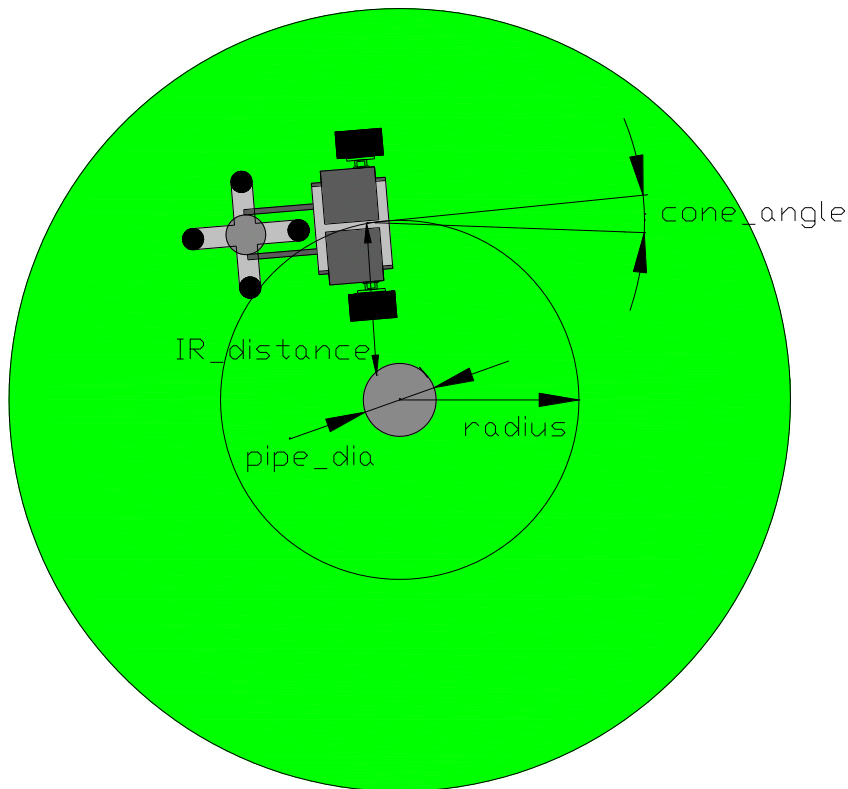
$lower\ dia$: Tankveggenes nedre diameter

I praksis vil et godt estimat av $height$ også gi et godt estimat av $radius$. På tankens bunn benyttes avstandsmålere og odometri for estimering av $radius$. Dette kan sammenlignes med høydeestimatet for tankveggen.



Figur 151: Blokkkjema for RadiusEstimator() på tankbunn

Løsningen kan begrunnes med at et godt høydeestimat ikke er tilgjengelig her, og en liten endring i *height* vil gi stort avvik i *radius*. Figur 152 viser prinsippet for estimering av *radius* på tankens bunn.



Figur 152: Estimering av *radius* på tankbunn, sett fra tankens underside

Odometri

Odometrien oppdaterer *radius*-estimatet på grunnlag av følgende beregning:

$$\beta = \text{atan} \left(\frac{\text{height_cone}}{\frac{\text{lower_dia} - \text{pipe_dia}}{2}} \right) \quad (12.55)$$

$$\text{radius}_{k+1} = \text{radius}_k - D_{(k,k+1)} * \sin(\text{cone_angle}_k) * \cos(\beta) \quad (12.56)$$

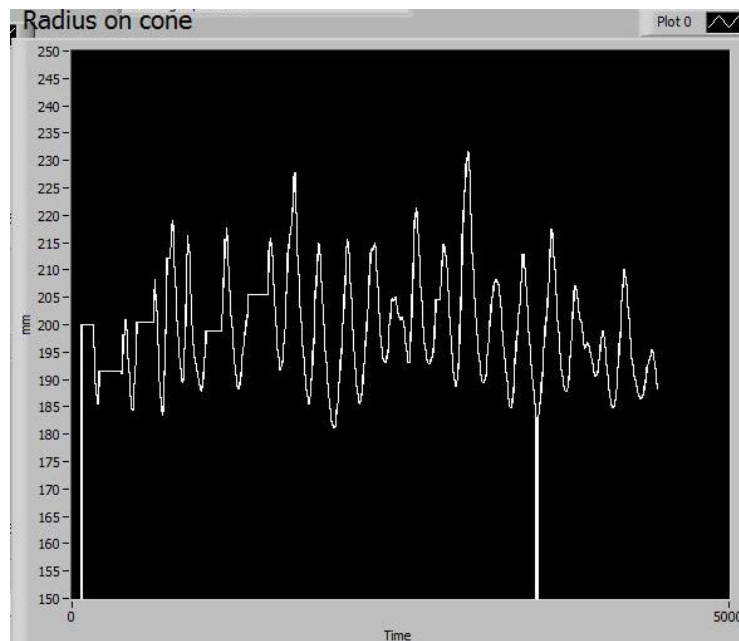
<i>cone_angle_(k)</i> :	<i>Beste estimat av cone angle</i>
<i>height_cone</i> :	<i>Tankbunnens høyde</i>
<i>lower_dia</i> :	<i>Tankveggenes nedre diameter</i>
<i>pipe_dia</i> :	<i>Utløpsrørets diameter</i>
<i>β</i> :	<i>Vinkel mellom horisontalen og tankbunnen</i>

Utfordring med måling mot utløpsrør

Måling av avstanden mot utløpsrøret er utfordrende. Dette fordi røret har en diameter på kun 55 mm. Refleksjoner fra et rundt rør er svært avhengig av IR-strålens treffpunkt på røret. For å teste nøyaktigheten til estimatet av *radius* basert på IR-avstandsmåleren, ble følgende enkle estimator implementert på roboten:

$$\text{Radius} = IR_{\text{distance right}} \quad (12.57)$$

En sirkel med referanseverdi *radius*=200 mm ble spesifisert som ønsket kjørerute i Guidance(). Figur 153 viser *radius*-estimatet ved kjøring av en hel sirkel på tankens bunn.

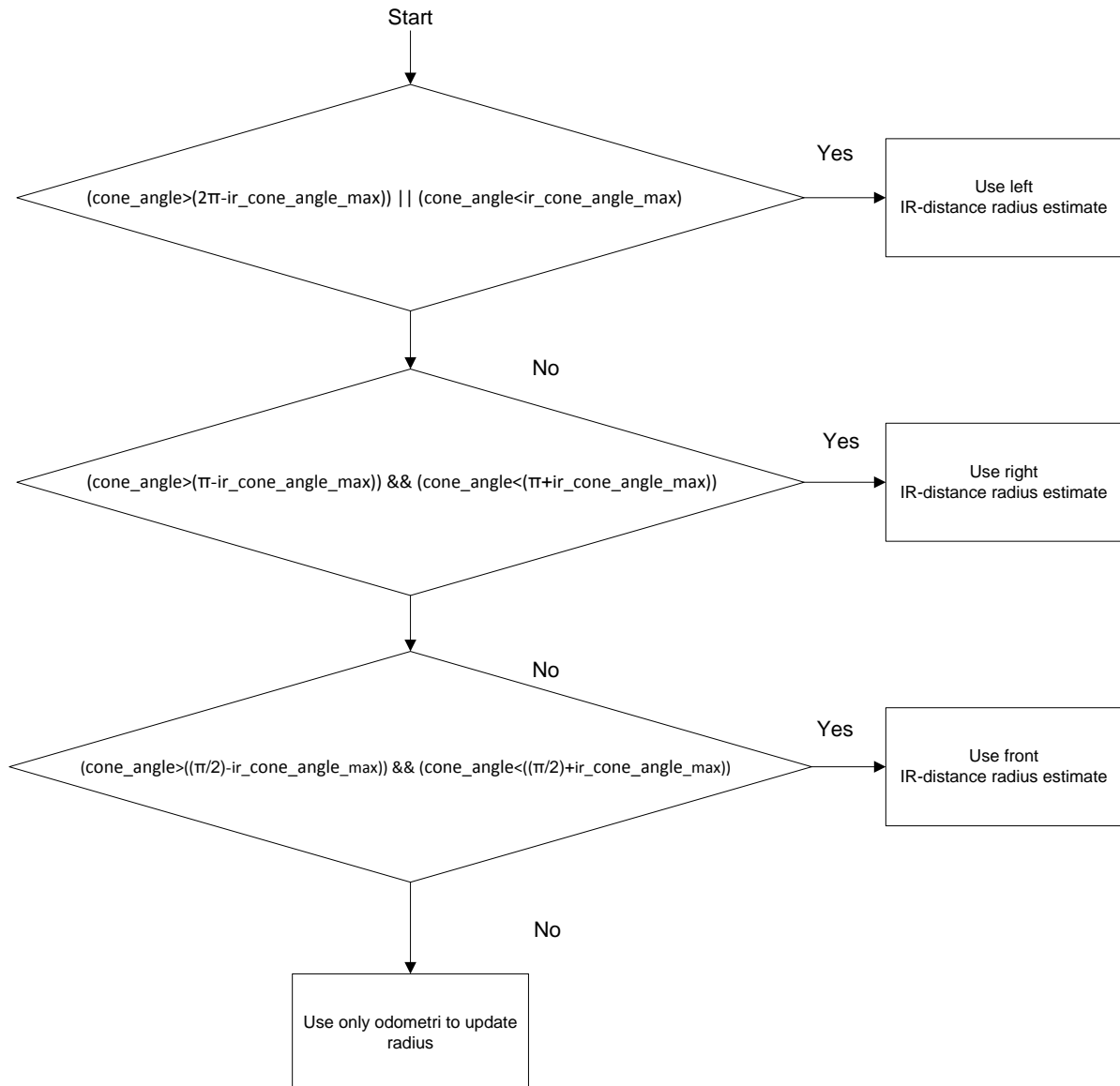


Figur 153: Test av *radius*-estimat basert på avstandsmåler

Regulatoren gav betydelige svingninger i *cone_angle*. Figuren viser at estimatet basert på avstandsmåleren gir avvik på opptil 40 mm. Det er store avvik fra virkelig *radius*. Dette tyder på at en kombinasjon av både avstandsmåling, odometri og logikk er nødvendig for å oppnå et godt estimat.

Logic

Løsningen på det viste problemet er å begrense gyldige målinger fra avstandsmåleren til når den er rettet mot senter av røret. Dette implementeres i blokken Logic. Parameteren *ir_cone_angle_max* spesifiserer den maksimale endringen i *cone_angle* for en gyldig måling. Figuren under viser et flytskjema for Logic-funksjonen. Denne tilsvarer logikken for valg av avstandssensor på tankveggen.



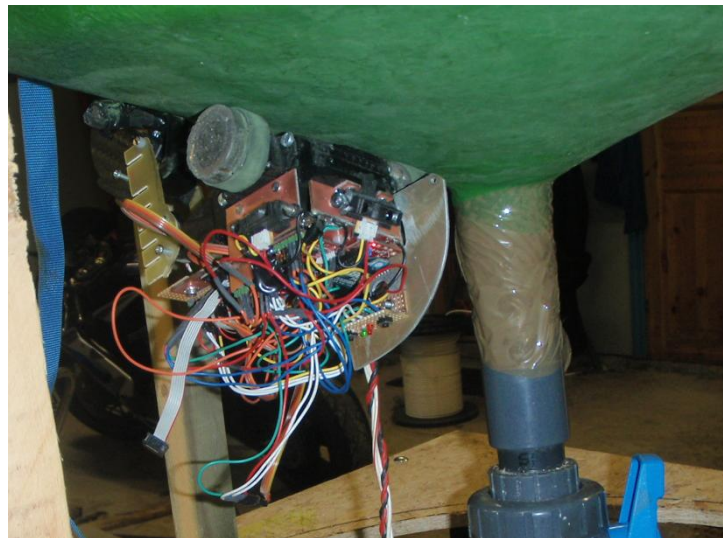
Figur 154: Flytskjema for Logic-funksjon for radius-estimat

Cone_angleEstimator()

Det er viktig at *cone_angle* holdes liten ved kjøring på tankbunnen (Figur 152). Dersom vinkelen blir for stor, risikerer man å miste avstandsmålingen mot utløpsrøret. Vinkelen beregnes på grunnlag av akselerometerdata og tankens dimensjoner. Tankbunnen kan ses på som en opp-ned-kjegle. Beregning av *roll*, *pitch* og *yaw* som funksjoner av *cone_angle* kan gjøres både matematisk og ved måling.

Matematisk blir roboten tre kontaktpunkter mot kjeglen. Et ligningssett må da løses ved hvert tidssteg. Når man i tillegg må finne aktuell vinkelfeil på grunn av robotens fleksible kropp, blir ligningssettet svært komplisert. En modell basert på eksperimentell modellering er derfor å

foretrekke. Figur 155 viser roboten plassert på tankbunnen. De tre kontaktpunktene er to hjul og renseren.



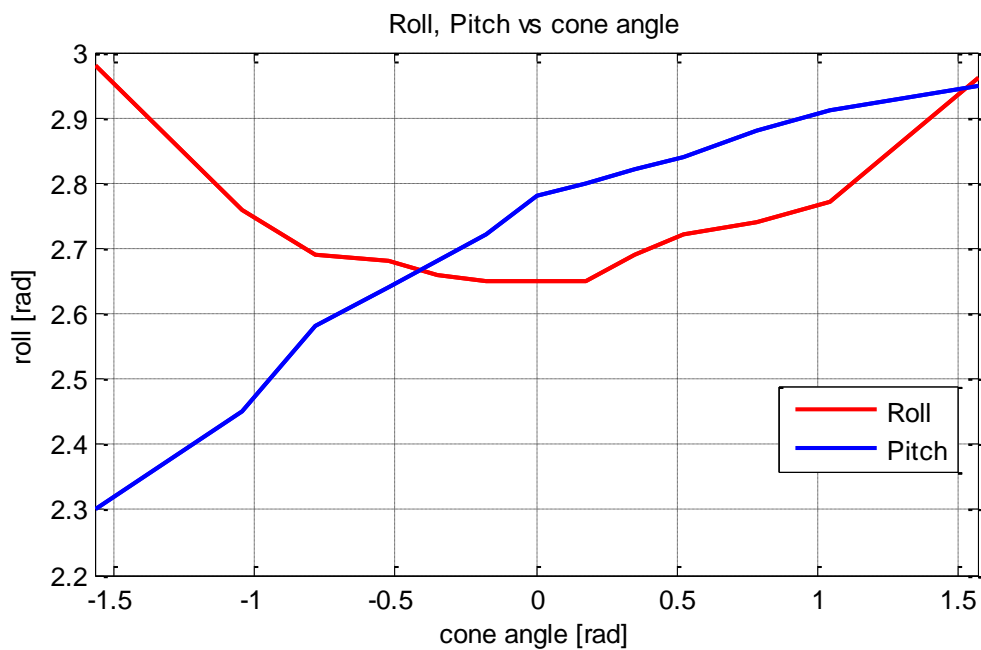
Figur 155: Robot på tankens bunn

Roll, pitch og yaw sin avhengighet av cone_angle

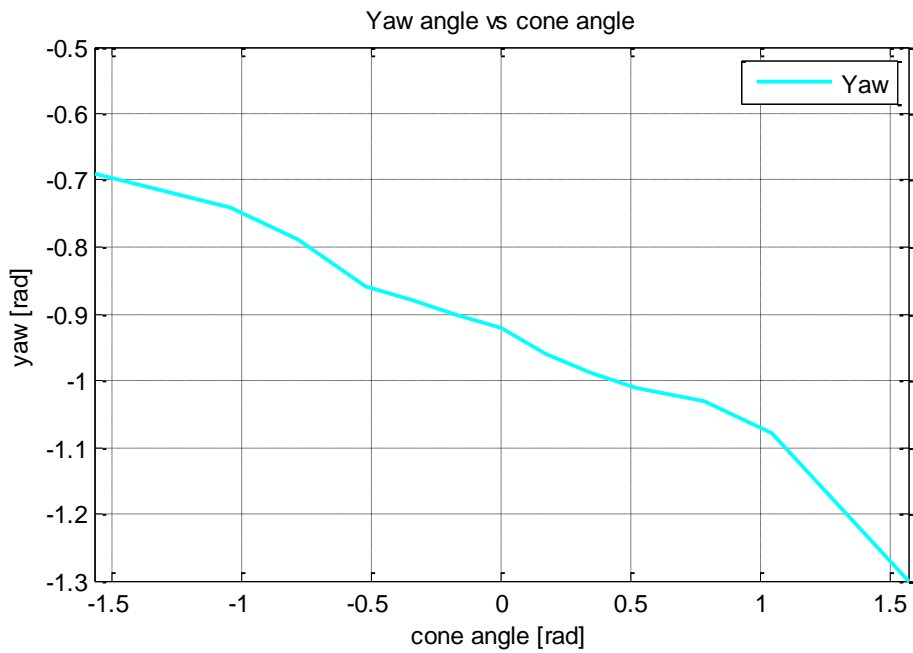
En målerserie med roboten på tankens bunn ble gjennomført for å finne bevegelsen i *roll*, *pitch* og *yaw* som funksjon av *cone_angle*. Vinkelen *cone_angle* ble målt visuelt med en gradskive på tankbunnen. Figur 156 og Figur 157 viser målinger for *cone_angle*-verdier spesifisert i tabell 9. Måleserien ble gjennomført ved en radius lik halve tankbunnens største radius.

Tabell 9: Cone_angle-vinkler målt

cone_angle [deg]	-90	-60	-45	-30	-20	-10	0	10	20	30	45	60	90
------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	---	----	----	----	----	----	----

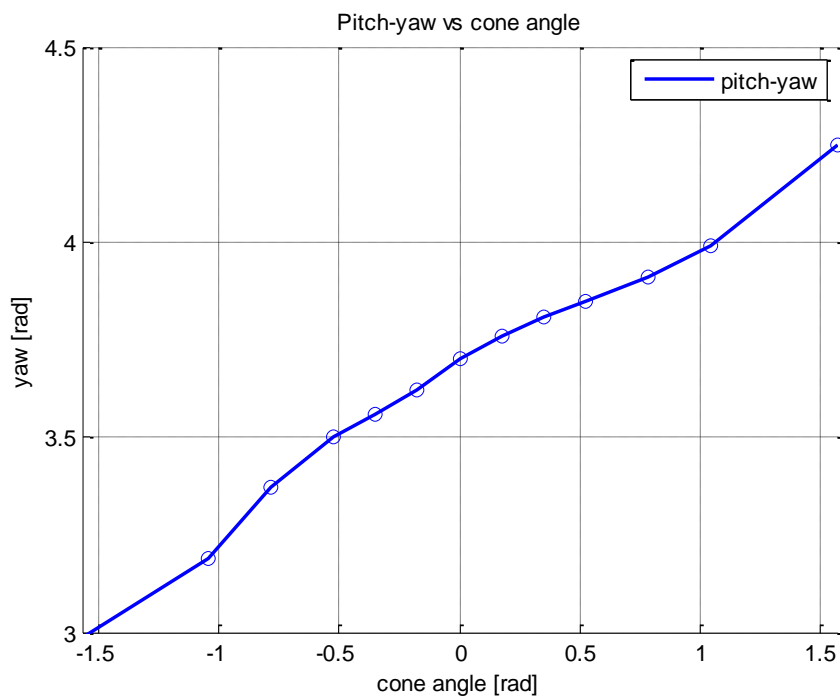


Figur 156: Roll og pitch sin avhengighet av cone_angle



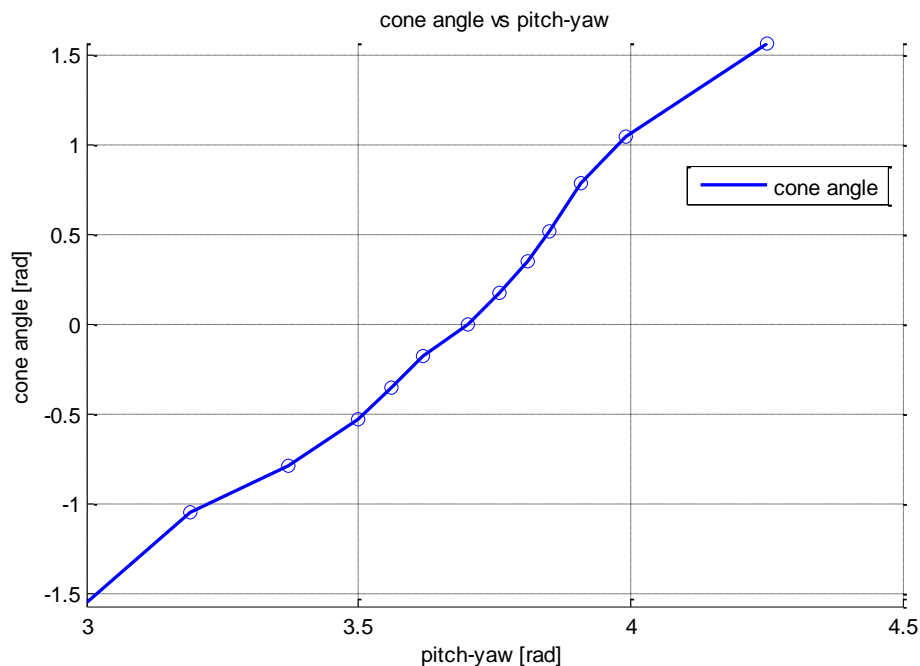
Figur 157: Yaw's avhengighet av cone_angle

Kurvene viser at både *pitch* og *yaw* kan benyttes for deteksjon av *cone_angle*. Roll er symmetrisk om vertikalen og gir dermed to mulige løsninger. Differansen mellom *pitch* og *yaw* gir en kurve som er ganske lineær omkring null og med et høyere stigningstall enn hver enkelt av dem. Figur 158 viser et plott av differansesignalet *pitch-yaw*, som velges i videre beregninger:



Figur 158: Differansen mellom pitch og yaw

Da det er ønskelig å finne en funksjon for *cone_angle* som funksjon av *pitch-yaw*, bør aksene byttes om og aktuelt kurvefit finnes. Figur 159 den samme grafen med aksene byttet.



Figur 159: Cone_angle som funksjon av pitch-yaw

Et 2.ordens kurvefit benyttes for å beskrive *cone_angle* som funksjon av *pitch-yaw*. Ytterpunktene ved $\pi/2$ og $-\pi/2$ utelates fra polynomet, da en høy orden kreves for å få et passende fit. Store verdier for *cone_angle* skal ikke forekomme ved kjøring på tankbunnen. Kurvetilpasningen benevnes *2. order polynom* og har følgende form:

$$2. \text{ order polynom} = c(3) + (\text{pitch} - \text{yaw}) * c(2) + (\text{pitch} - \text{yaw})^2 * c(1) \quad (12.58)$$

c: Polynom for å beskrive *cone angle* som funksjon av *pitch - yaw*

c(1): 2. ordens koeffisient

c(2): 1. ordens koeffisient

c(3): Bias

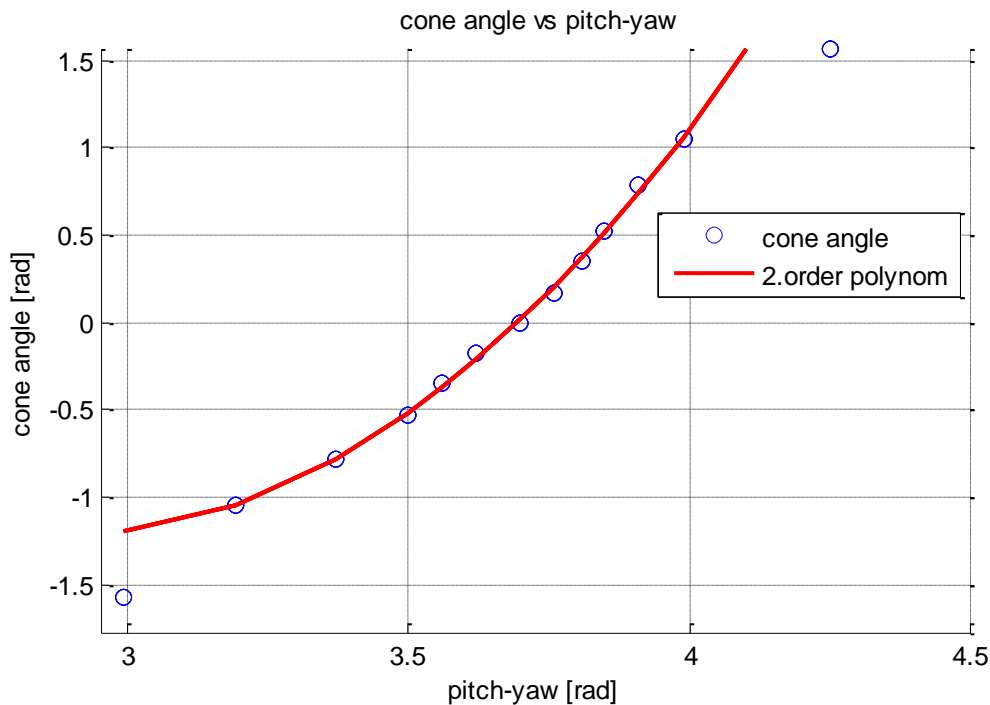
pitch: Vinkelen *pitch* i radianer

yaw: Vinkelen *yaw* i radianer

Matlab finner optimale verdier for polynomet *c*:

$$c(1) = 1,871, \quad c(2) = -10,802, \quad c(3) = 14,374$$

Figur 160 viser *2. order polynom* og de målte verdiene som sirkler. Vi ser at avvikene omkring null er veldig små. Vi kan konkludere med at funksjonen gir en bra beskrivelse av målingene i det aktuelle området. En etterjustering av bias, *c*(3) kan gjøres dersom små avvik forekommer.



Figur 160: 2.ordens polynom

Løsningen for funksjonen ConeAngleEstimator() blir dermed følgende:

$$\text{cone_angle}(\text{pitch}, \text{yaw}) = c(3) + (\text{pitch} - \text{yaw}) * c(2) + (\text{pitch} - \text{yaw})^2 * c(1) \quad (12.59)$$

Diskusjon

Ved utvikling av funksjonen $\text{cone_angle}(\text{pitch}, \text{yaw})$ ble en måleserie ved en radius lik halve tankbunnens største radius benyttet. I praksis er sammenhengen mellom cone_angle og roll , pitch og yaw også avhengig av radius . Dette fordi kjeglens overflate blir mer kurvet mot tankbunnens senter. Ved mindre eller større radius vil funksjonen ha betydelige avvik. Løsningen på dette er å lage et polynom som er avhengig av både pitch-yaw og radius , $\text{cone_angle}(\text{pitch}, \text{yaw}, \text{radius})$. Dette blir en tilsvarende løsning som funksjonen $\text{height}(\text{IR distance}, \text{heading}, \text{height})$ utviklet for HeightEstimator().

I dagens løsning er estimatet av cone_angle kun basert på verdier fra akselerometeret.

Nøyaktigheten som oppnås i cone_angle er ikke målt, men kun basert på visuell kontroll. En mulig oppgradering for bedre estimat, kan være å benytte input fra odometri også. Odometrien vil da ha følgende formel på tankens bunn:

$$\text{cone_angle}_{k+1} = \text{cone_angle}_k + \frac{D_L - D_R}{W} - \text{atan} \left(\frac{D_{(t,t+1)} * \cos(\text{cone_angle}_k)}{\text{radius}} \right) \quad (12.60)$$

D_R : Tilbakelagt strekning høyre hjul siden forrige måling

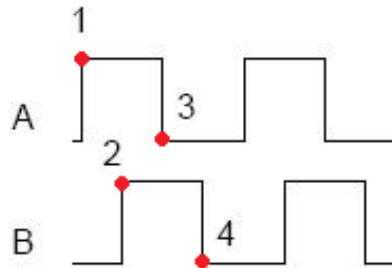
D_L : Tilbakelagt strekning venstre hjul siden forrige måling

W : Avstand mellom hjulene

Hvilket forbedringspotensiale dette har bør testes i praksis. En bør huske på at dersom endringer i kalibreringen av akselerometeret gjøres, må også polynomet c oppdateres.

12.3.4.5 SpeedEstimator()

SpeedEstimator() har som oppgave å estimere robotens hastighet. På grunn av enkodernes lave oppløsning og robotens lave hastighet, er ikke en kvadraturteller godt nok for hastighetsmåling (kapittel 8.5.1). Beregning av hastigheten gjøres derfor ved at mikrokontrolleren kjører et interrupt ved endring i den optiske enkoderen. Tidsmåling mellom hvert interrupt gjøres med en av timer. Figur 161 viser prinsippet for fire hastighetsmålinger på grunnlag av enkoderens signaler A og B.



Figur 161: Hastighetsmåling ved tidspunktene 1-4

Hastighetsbidraget fra ett hjul kalkuleres slik:

$$D_{pulse} = \frac{\pi * d_{wheel}}{n_{encoder} * 8} \quad (12.61)$$

$$speed_{wheel} = \frac{D_{pulse}}{\Delta t} \quad (12.62)$$

Robotens totale hastighet beregnes som summen av bidragene fra hvert hjul:

$$speed_{robot} = speed_{left} + speed_{right} \quad (12.63)$$

- D_{pulse} : Kjørt distanse siden forrige enkoderpuls. Bidrag fra ett hjul.
- d_{wheel} : Hjul diameter
- $n_{encoder}$: Oppløsning i enkoderne (PPR)
- $speed_{wheel}$: Robotens hastighetsbidrag fra ett hjul
- $speed_{robot}$: Robotens hastighet
- $speed_{left}$: Robotens hastighetsbidrag fra venstre hjul
- $speed_{right}$: Robotens hastighetsbidrag fra høyre hjul
- Δt : Tid siden forrige enkoderpuls

Det benyttes en 16-bits timer med 32 μs tidsintervall pr puls. Dette gir en maksimal tidsmåling før timer-overflow:

$$\Delta t_{max} = 32 \mu s * 2^{16} = 2,1 s \quad (12.64)$$

Den minste hastigheten som kan detekteres blir dermed:

$$speed_{min} = \frac{D_{pulse}}{\Delta t_{max}} = \frac{\pi * 37 mm}{128 PPR * 8 * 2,1 s} = 0,055 mm/s \quad (12.65)$$

Denne beregningen baserer seg på at kun ett hjul beveger seg. I praksis vil begge hjulene bevege seg, og minste målbare hastighet blir det dobbelte. Verdien er meget lav, og vil ikke gi noen avvik av

betydning. Med timerens 32 μs tidsintervall blir også oppløsningen i hastighet meget bra. Hastigheter mindre enn $speed_{min}$ blir estimert lik null.

Ulempen med den benyttede metoden for hastighetsmåling er dersom ustabilitet oppstår slik at hastigheten på et hjul går mot null. I prinsippet vil da estimatoren benytte tiden $\Delta t_{max}=2,1\text{s}$ for å registrere at hastigheten er null. Dette er en stor varierende tidsforsinkelse som skaper problemer for regulatoren. Løsningen på dette er å senke verdien Δt_{max} . Dette kan gjøres, da roboten alltid skal holde en konstant hastighet ulik null.

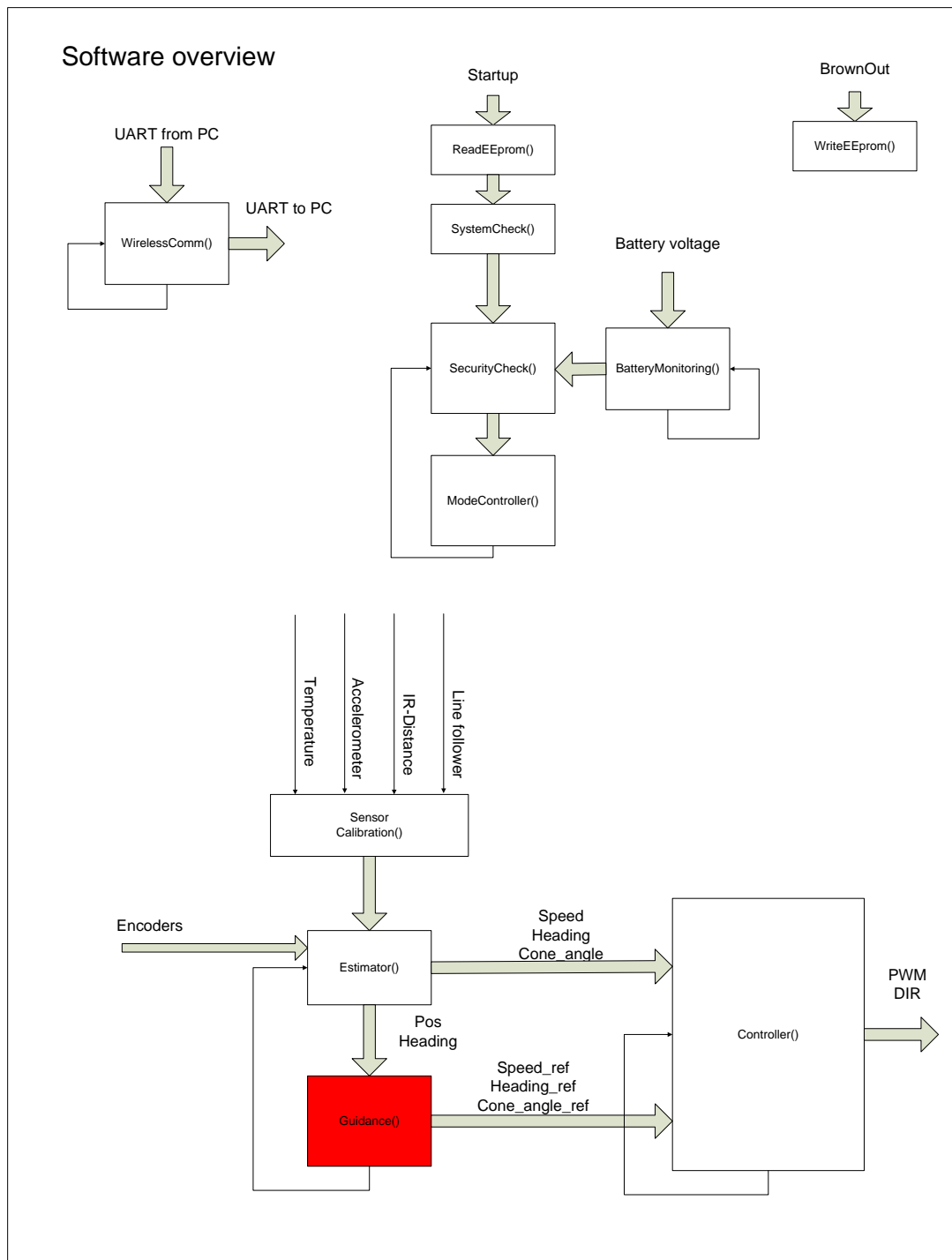
12.4 Diskusjon

Estimatoren har trolig et forbedringspotensiale ved at man implementerer en modell av roboten. Dette kan gjøres i for eksempel en Luenberger Observer eller et Kalman filter basert på en modell. Et Kalmanfilter er en optimal observer med tanke på minimum varians[45]. Ulempen med en mer avansert Estimator() er at den bruker mer prosessorkraft, da større matriseberegninger må utføres. Forbedringspotensialet er trolig begrenset uten bruk av sensorer med en bedre ytelse, da roboten kun gjør sakte bevegelser. En posisjonsnøyaktighet på millimeternivå er unødvendig for dette bruksområdet.

12.5 Konklusjon

Selv om stabilitet for de valgte løsningene i Estimator() ikke er bevist matematisk, har praktisk testing vist gode resultater. Resultatet er et godt utgangspunkt for videre utvikling og optimalisering. Estimatoren har mange tuning-parametre, der enkelte avhenger av hverandre. Det bør derfor brukes mer tid på å finne optimale innstillinger av de ulike parametrene. Hittil har vurdering av sprangresponser og støy blitt benyttet for grunninnstillinger. Etterjustering har blitt gjennomført etter praktisk testing på tanken. Estimert høyde innenfor det spesifiserte kravet på 3 cm er oppnådd.

12.5.1 Guidance



Figur 162: Guidance()-blokk i programvaren

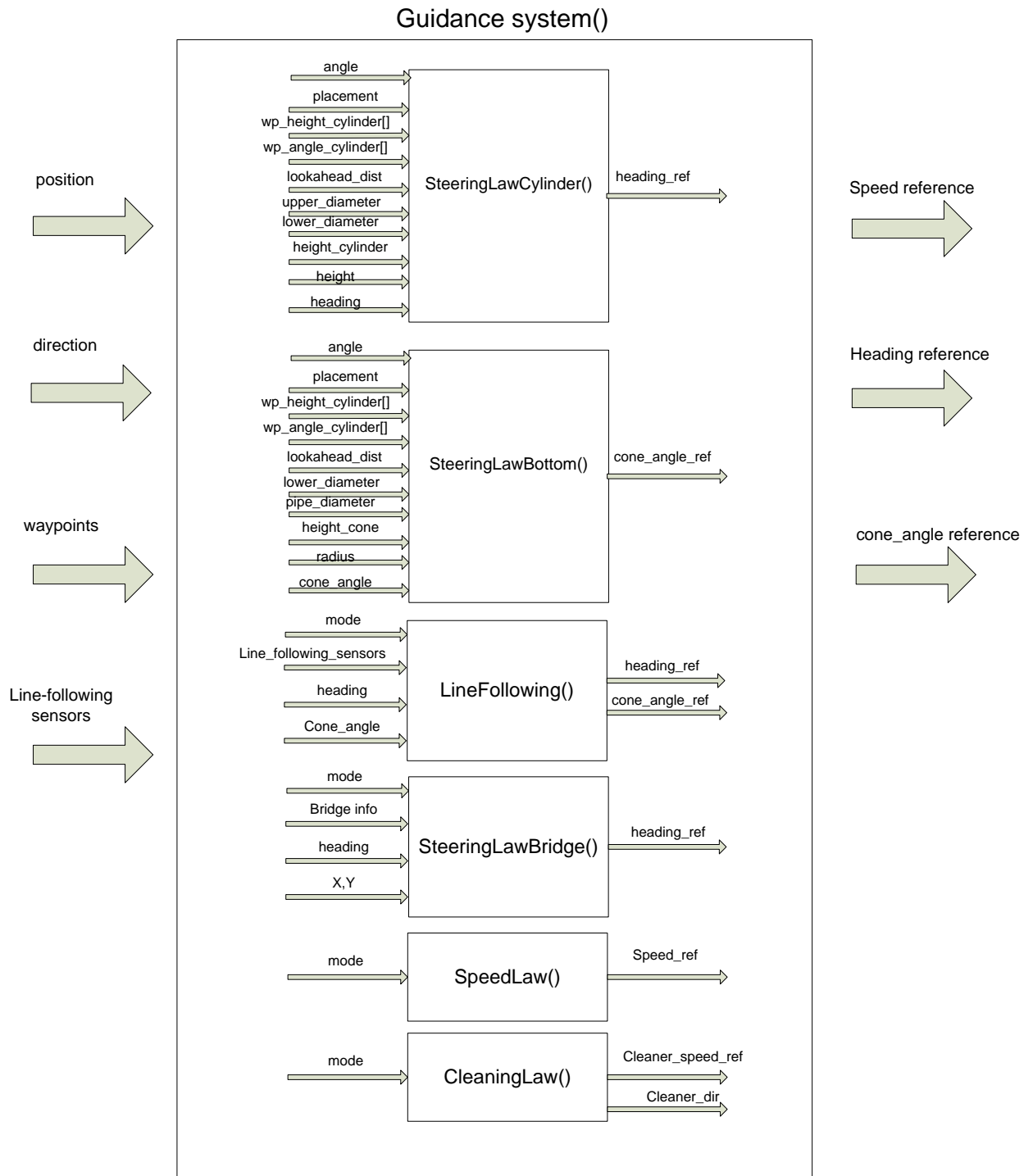
Bakgrunn

Guidance-systemets oppgave er i hovedsak å finne ut i hvilken retning og hastighet roboten bør bevege seg for å følge den ønskede ruten best mulig. Dette gjøres på grunnlag av estimert posisjon, retning og gitte waypoints. Guidance() gir referansesignaler til Controller(). For at roboten skal fungere i daglig drift, kreves mer enn at den bare renser en tank. Dette er for eksempel å finne tilbake til ladestasjonen etter endt renseprosess.

Valgt løsning

For å gjøre Guidance() mest mulig oversiktlig, er den delt opp i 6 hovedblokker:

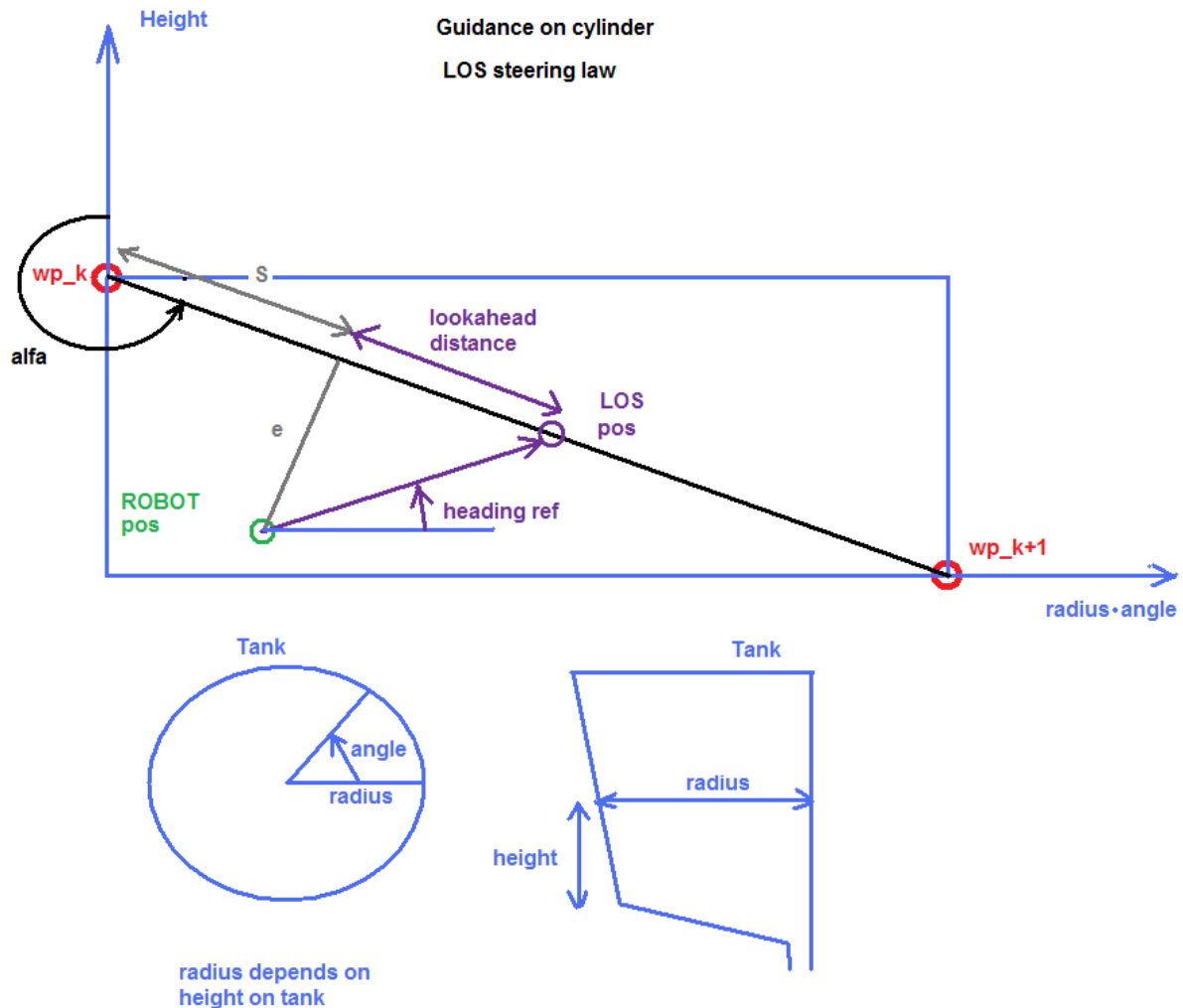
SteeringLawCylinder(), SteeringLawBottom(), LineFollowing(), SteeringLawBridge(), SpeedLaw() og CleaningLaw(). Figur 163 viser prinsippet for oppdeling i blokker med aktuelle parametre.



Figur 163: Guidance-systemets blokker

SteeringLawCylinder()

SteeringLawCylinder() er algoritmen for å følge angitt rute på tankveggen. Line-Of-Sight Guidance prinsippet benyttes (kapittel 7.3.3). Dette er en robust algoritme som fungerer bra til formålet. Etersom den opprinnelige LOS-algoritmen er beregnet for et 2-dimensjonalt plan, er noen modifikasjoner nødvendig for å tilpasse algoritmen til tankveggens polarkoordinater. Figur 164 viser prinsippet for LOS-algoritmen for tankveggen.



Figur 164: Linjefølgingsalgoritme for tankvegg

Formlene i algoritmen baserer seg på følgende sammenhenger mellom tankveggen og et XY-plan:

$$x = radius * angle \quad (12.66)$$

$$y = height \quad (12.67)$$

Beregning av ønsket heading, heading_ref:

$$\alpha = atan2((x_{k+1} - x_k), (y_{k+1} - y_k)) \quad (12.68)$$

$$s(t) = (x(t) - x_k) \cos(\alpha) + (y(t) - y_k) \sin(\alpha) \quad (12.69)$$

$$e(t) = -(x(t) - x_k) \sin(\alpha) + (y(t) - y_k) \cos(\alpha) \quad (12.70)$$

$$x_{los} = x_k + (s(t) + lookahead_distance) * \sin(\alpha) \quad (12.71)$$

$$y_{los} = y_k + (s(t) + lookahead_distance) * \cos(\alpha) \quad (12.72)$$

$$heading_ref = -atan2(y_{los} - y(t), x_{los} - x(t)) + \frac{\pi}{2} \quad (12.73)$$

$s(t)$:	<i>Along – track error</i>
$e(t)$:	<i>Cross – track error</i>
$heading_ref$:	<i>Desired heading</i>
wp_k :	<i>Last waypoint</i>
wp_{k+1} :	<i>Next waypoint</i>
x_k :	<i>x – position at wp_k</i>
y_k :	<i>y – position at wp_k</i>
x_{k+1} :	<i>x – position at wp_{k+1}</i>
y_{k+1} :	<i>y – position at wp_{k+1}</i>
x_{los} :	<i>x – position at LOS – position</i>
y_{los} :	<i>y – position at LOS – position</i>
$x(t)$:	<i>Actual x – position for robot</i>
$y(t)$:	<i>Actual y – position for robot</i>
α :	<i>Angle between y – axis and line between waypoints</i>
<i>lookahead distance</i> :	<i>Distance to LOS – position along the line</i>

Bytte mellom waypoints:

Bytte mellom waypoints kan gjøres på to måter [18]:

1. Når avstanden $s(t)$ har blitt nesten like stor som den totale avstanden mellom punktene wp_k og wp_{k+1} , byttes det til neste waypoint.
2. Når roboten er innenfor en tenkt sirkel rundt punktet wp_{k+1} , byttes det til neste waypoint.

I praksis betyr dette at med metode 1 kan bytte av waypoints skje selv om $e(t)$ er stor. I metode 2 vil roboten jobbe for å komme seg innenfor sirkelen, og i verste fall endre retningen totalt for å få det til. Ettersom det forventes liten *Cross – track error* i vårt system og vi ønsker en rolig oppførsel i *heading*, er metode 1 implementert. Metode 1 blir slik:

$$if (s(t) + change\ distance > \sqrt{(x_{k+1} - x_k)^2 + (y_{k+1} - y_k)^2}) \rightarrow wp_k = wp_{k+1} \quad (12.74)$$

$$wp_{i+1} = wp_{i+2}$$

$i = 1, 2, 3 \dots n$

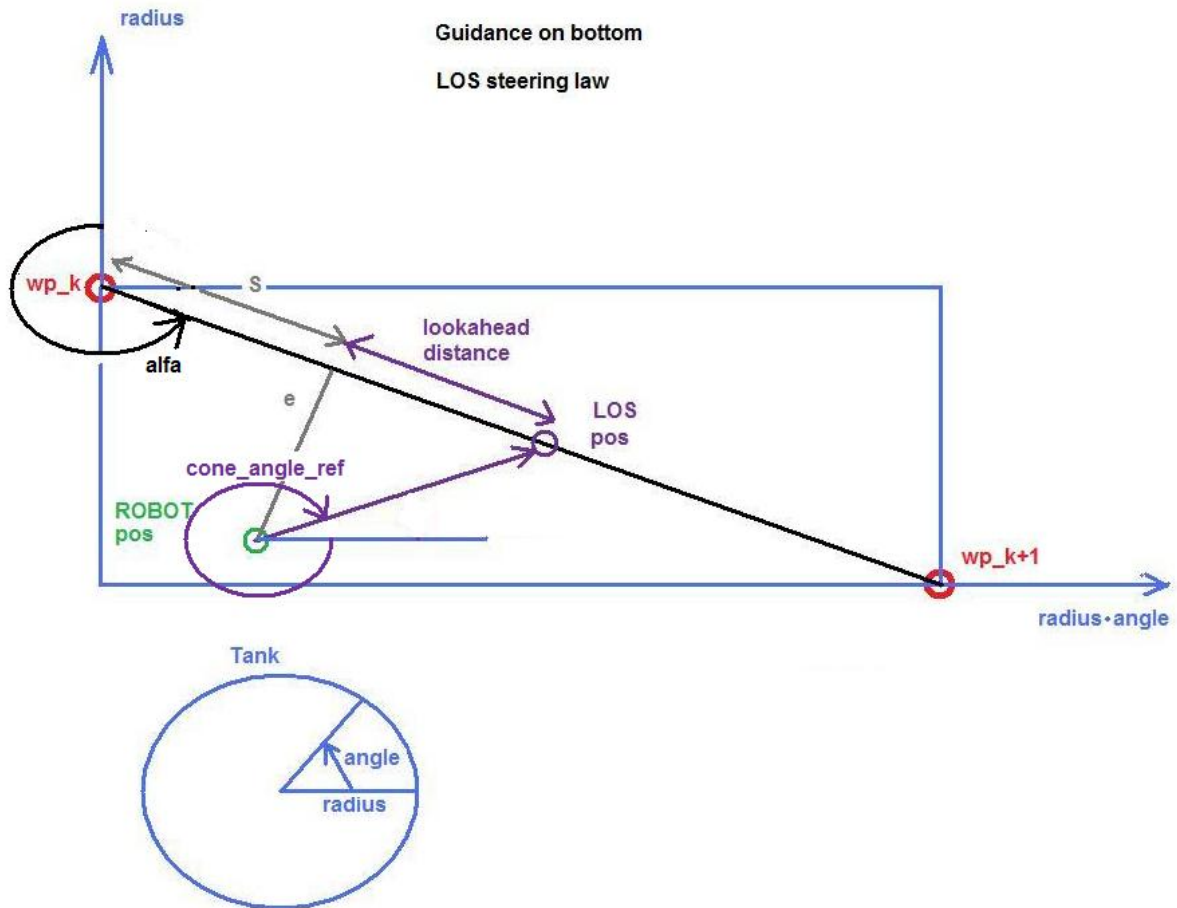
change distance: *Parameter to set distance from wp_{k+1} to change waypoint*

Avvik

SteeringLawCylinder() baserer seg på at tankveggen er en sylinder med rette vegger. I praksis er veggene ikke vertikale, og tankveggen har dermed ikke form som en perfekt sylinder. Avvikene på grunn av dette små, og gir ingen feil av praktisk betydning for de aktuelle tankene.

SteeringLawBottom()

SteeringLawBottom() fungerer i prinsippet som SteeringLawCylinder(), men benyttes på tankens bunn. Her benyttes andre parametre på aksene, da tankbunnens polarkoordinater konverteres til et XY-plan.



Figur 165: Linjefølgingsalgoritme for tankbunn

Formlene i LOS-algoritmen baserer seg på følgende sammenhenger mellom tankbunnen og et XY-plan:

$$x = radius * angle \quad (12.75)$$

$$y = radius \quad (12.76)$$

En kan tenke seg at x-aksen er en sirkel som krysser wp_{k+1} . Y-aksen står da normalt på tangenten til denne sirkelen. Beregning av *cone_angle_ref* gjøres slik:

$$\alpha = \text{atan2}((x_{k+1} - x_k), (y_{k+1} - y_k)) \quad (12.77)$$

$$s(t) = (x(t) - x_k) \cos(\alpha) + (y(t) - y_k) \sin(\alpha) \quad (12.78)$$

$$e(t) = -(x(t) - x_k) \sin(\alpha) + (y(t) - y_k) \cos(\alpha) \quad (12.79)$$

$$x_{los} = x_k + (s(t) + \text{lookahead_distance}) * \sin(\alpha) \quad (12.80)$$

$$y_{los} = y_k + (s(t) + \text{lookahead_distance}) * \cos(\alpha) \quad (12.81)$$

$$\text{cone_angle_ref} = \text{atan2}(y_{los} - y(t), x_{los} - x(t)) + \frac{\pi}{2} \quad (12.82)$$

cone_angle_ref: *Desired cone_angle*

Bytte mellom waypoints:

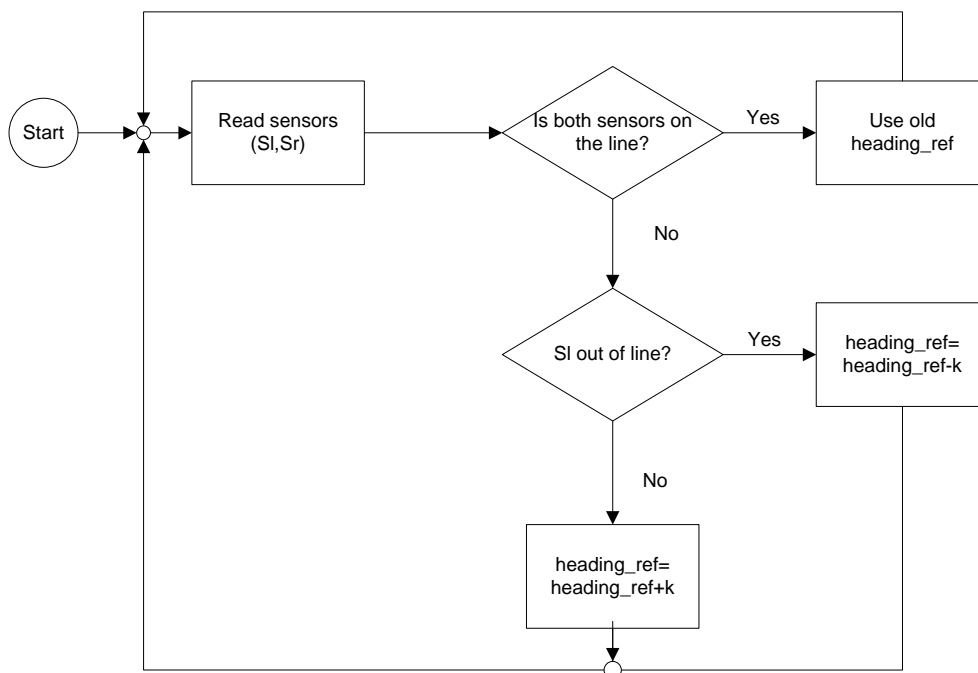
Bytte mellom waypoints gjøres på samme måte som for `SteeringLawCylinder()`.

Avvik

`SteeringLawBottom()` baserer seg på at tankbunnen er en tenkt flat bunn. I praksis er ikke dette tilfellet. Også tilnærminger med at området mellom waypoints kan trekkes ut som et rektangel gir betydelige avvik. Dette er ikke testet i praksis, men det forventes ingen problemer forbundet med dette så lenge estimatene av *radius* og *angle* er presise.

LineFollowing()

`LineFollowing()` gir referansesignal til `Controller()` når roboten skal følge en linje på tanken. Linjefølgingsystemet vil takle rette eller lett krummede linjer. Dette skjer ved hjelp av to sensorer og en linjefølgingsalgoritme [25]. Dersom systemet skal takle kjøring etter en vinklet rute, kreves mer enn to linjefølgingsensorer [25]. Figur 166 viser flytskjema for en enkel linjefølgingsalgoritme [25].



Figur 166: Enkel linjefølgingsalgoritme [25]

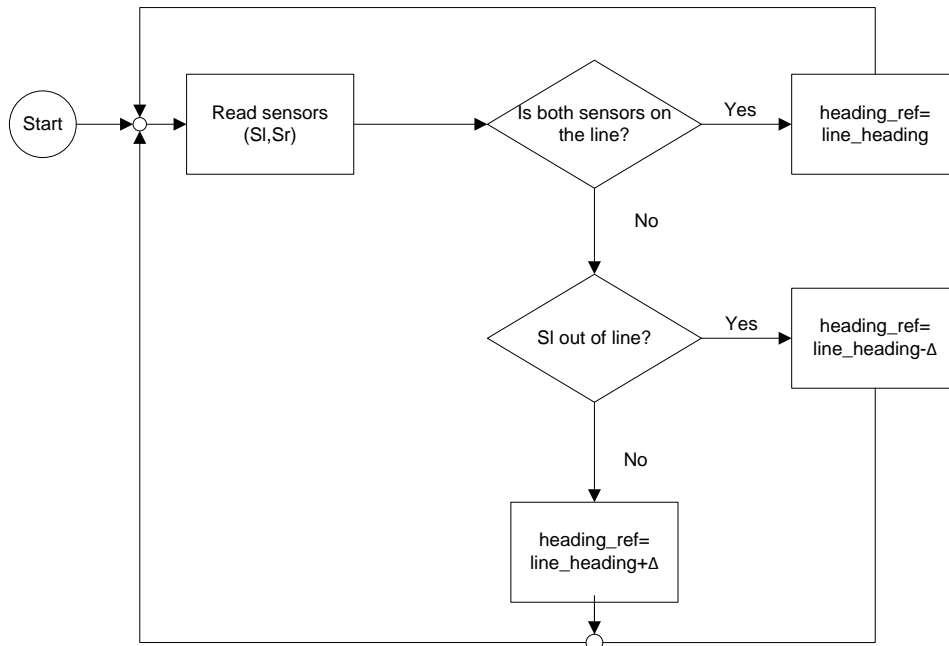
k: *Line following gain*
S_l: *Line following sensor left*
S_r: *Line following sensor right*
heading_ref: *Robot desired direction*

Denne algoritmen vil få roboten til å følge en rett eller kurvet linje, uansett hvilken retning linjen har. Roboten vil typisk svinge omkring linjens ytterpunkter, da linjefølgeren i praksis fungerer som en I-regulator avhengig av parameteren *k*. Dersom *k* gjøres tidsavhengig, kan en bedre respons trolig

oppnås. For eksempel kan k settes lik null for alle beregninger unntatt første sample etter at roboten mister track på en sensor.

På tanken

Dersom linjens retning på tanken er kjent, kan en forbedret strategi brukes. Hvis begge sensorene følger linjen, bør robotens retning settes lik linjens retning. Dersom en av sensorene kommer utenfor linjen, korrigeres referansen med en gitt korreksjonsvinkel Δ . Algoritmen vil da fungere slik:



Figur 167: Forbedret linjefølgingsalgoritme

line heading: *Direction of line angle*
 Δ : *Correction angle*

Forsterkningen i linjefølgingsreguleringen bestemmes nå av korreksjonsvinkelen Δ . Denne sammen med controllerens respons vil da bestemme oppførselen til roboten. For stor Δ vil kunne gi ustabilitet.

SteeringLawBridge()

Denne funksjonen styrer robotens retning ved kjøring på brosystemet. Dersom roboten kjører i horisontal retning på en bro med vertikalt plan, vil retningen velges som *heading ref* = 0 eller *heading ref* = π , avhengig av kjøreretningen. Når roboten skal kjøre i et veikryss på broen, benyttes avstandssensorene i tillegg. Ved behov kan også linjefølgning implementeres på broen. SteeringLawBridge() har ikke blitt implementert på systemet.

SpeedLaw()

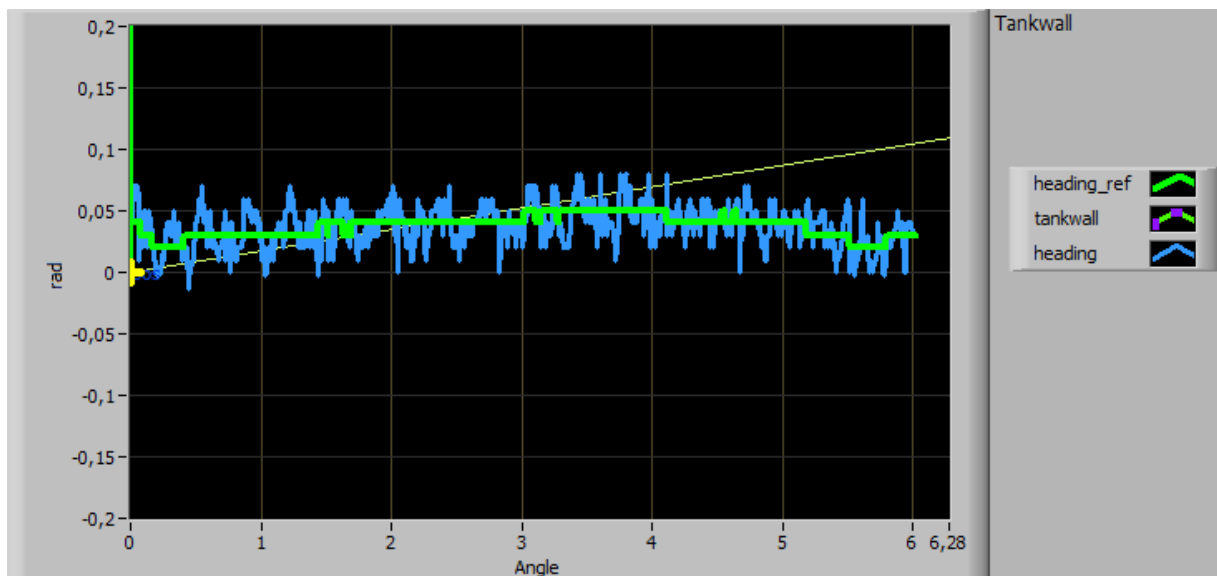
SpeedLaw() gir hastighetsreferanse til Controller(). Hastighetsreferansen velges ut fra en gitt tabell og holdes konstant. Parameteren *mode* bestemmer hvilken hastighetsreferanse som velges. Det er ikke behov for å endre hastighet ofte på roboten, ettersom den skal gå relativt sakte.

CleaningLaw()

CleaningLaw() styrer hvilken retning rensen skal rotere og hvor stor rotasjonshastigheten skal være. Også dette spesifiseres i enkle tabeller.

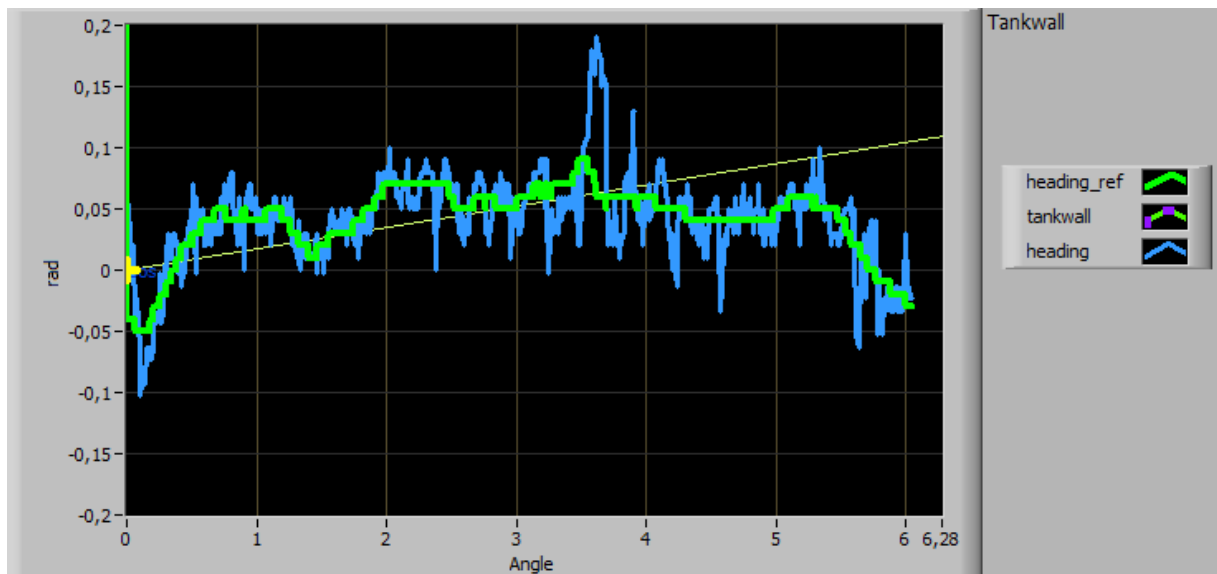
12.5.1.1 Diskusjon

Guidance-systemet ble justert inn ved kjøring i sirkler med en kjent konstant høyde på tankveggen. Ønsket respons er rolige bevegelser og minst mulig avvik i høyde. En konstant hastighet på 6 mm/s ble satt under forsøkene. Figur 168 viser et plott av *heading* og *heading_ref* ved høyden 40 cm under kjøring av en komplett sirkel. Figuren er hentet fra et sanntidsplott i det grafiske brukergrensesnittet. *Lookahead distance* ble her satt til 150 mm.



Figur 168: Guidance ved height=400 mm

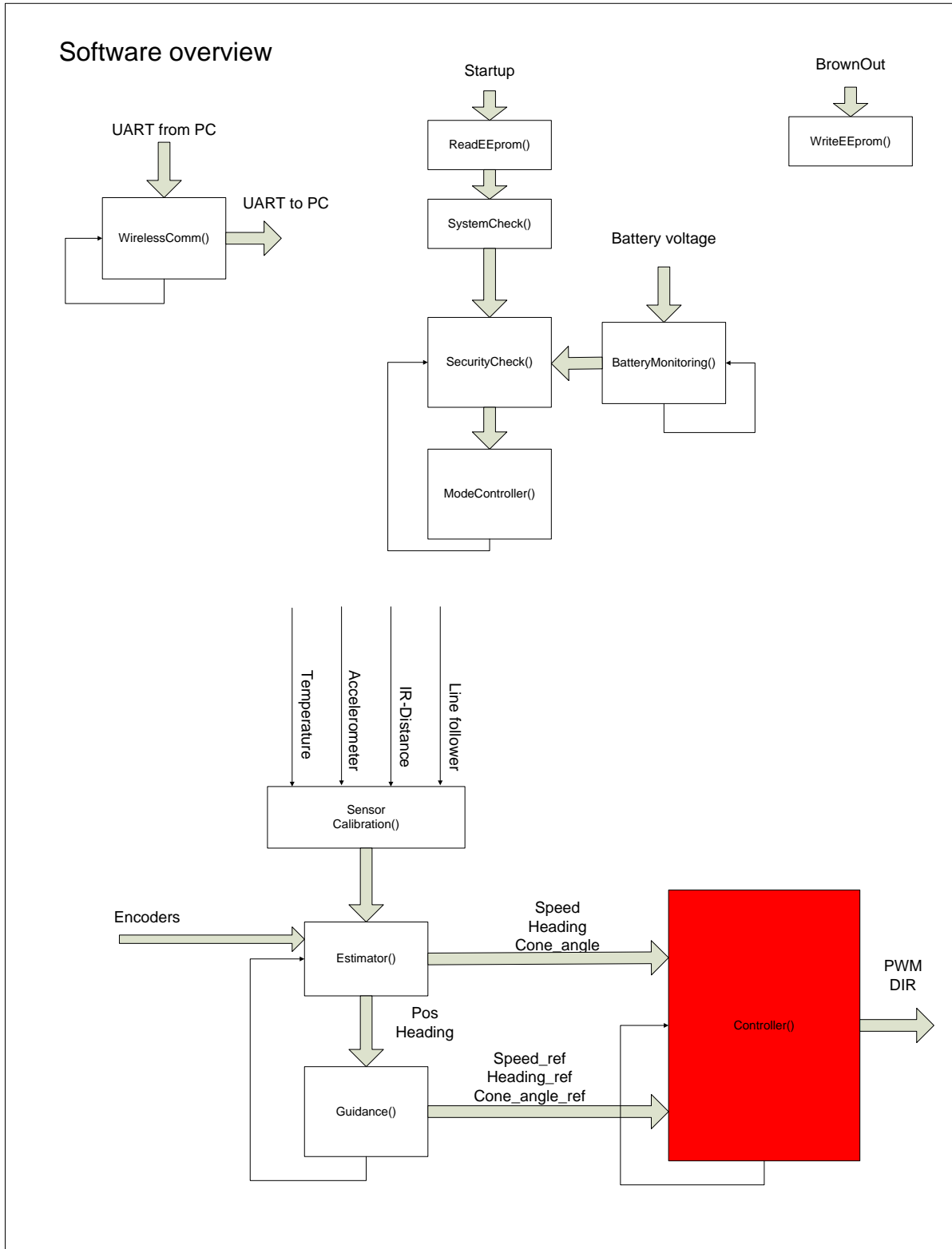
Figuren viser maksimale utslag i *heading* på kun 0,08 rad. Vi kan også legge merke til et konstant avvik i *heading_ref* på opp mot 0,05 rad. Dette kommer i hovedsak av feil i akselerometeret. Den samme testen ble også gjennomført for høyden 10 cm med de samme innstillingene. Figur 169 viser resultatet. Avvik på opptil 0,18 rad i *heading* ble målt. Den store spissen kommer av en ujevnhet i tanken. Det samme konstante avviket i *heading_ref* ble også observert her.



Figur 169: Guidance ved height=400 mm

Den samme testen ble gjennomført flere ganger for å observere repeterbarhet. Systemet viser god stabilitet, da de forskjellige kjøringene kun viste små forskjeller. Gjennomførte tester viser at Guidance() fungerer bra i praksis.

12.5.2 Controller



Figur 170: Controller()-blokken i programvaren

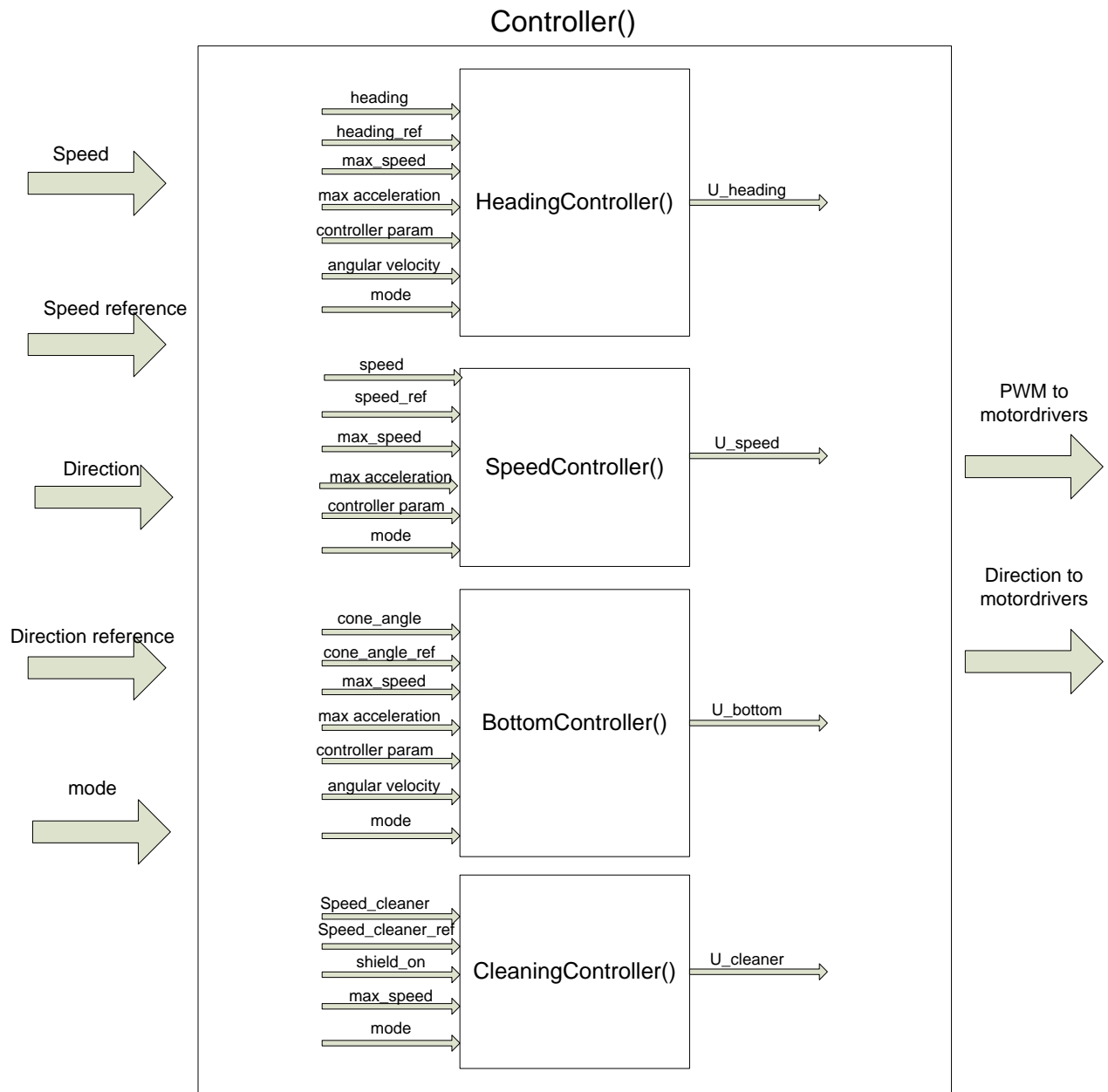
Bakgrunn

For rolig manøvrering av roboten trengs regulering av robotens motorer. Uten regulatorer er nøyaktig posisjonering vanskelig, og rykkvise pådrag og unødig slitasje på motorene ikke til å unngå.

Valgt løsning

Det benyttes hastighet- og retningsregulering på roboten. Dette er tilstrekkelig for å kjøre ønsket rute. Alternativt kunne man valgt posisjonsregulering med varierende hastighet. Dette er vurdert som en dårligere løsning, ettersom man ønsker å holde en konstant hastighet langs hele ruten i praksis.

Figur 171 viser prinsippet for oppbygningen av Controller(). De ulike regulatorene er: HeadingController(), BottomController(), SpeedController() og CleaningController().

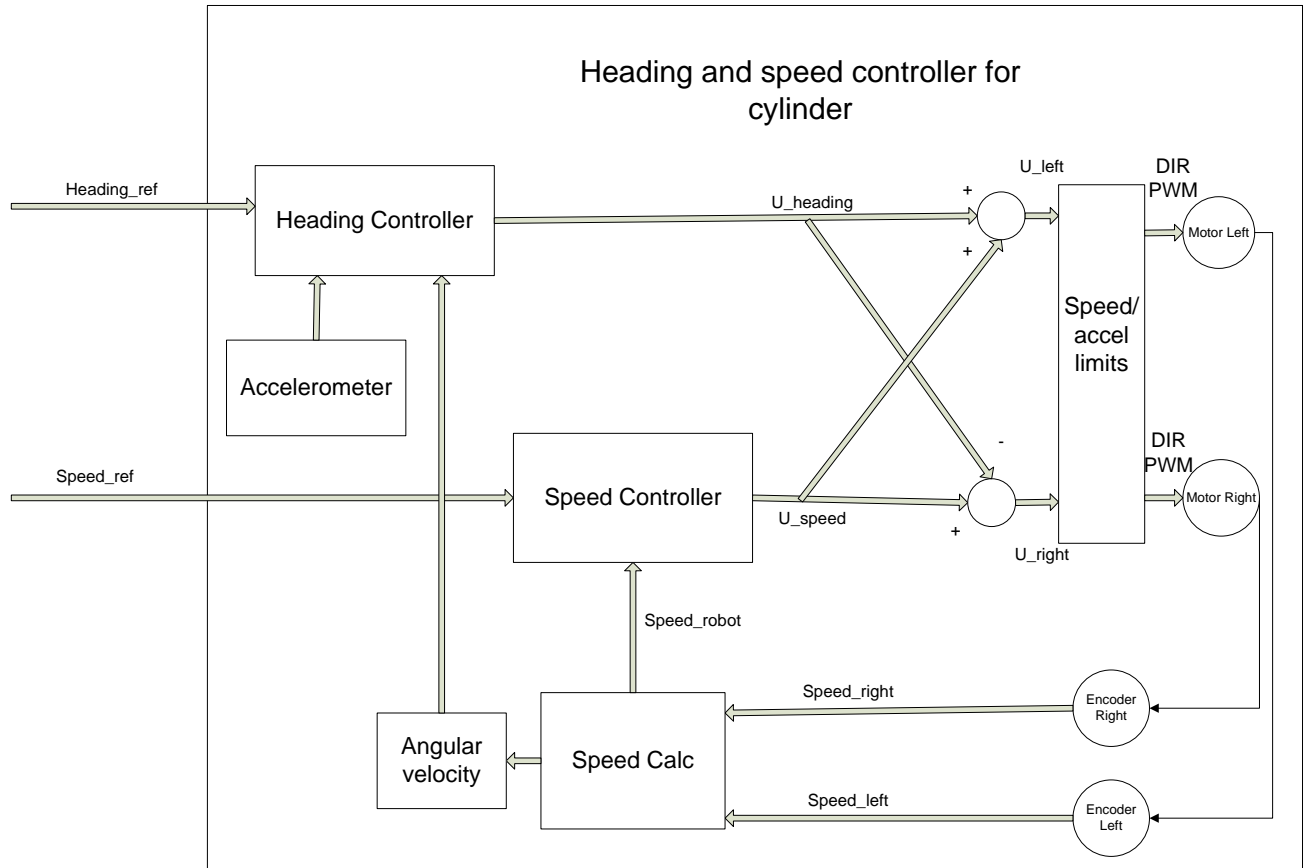


Figur 171: Oppbygning av Controller()

Heading- og BottomController() er i prinsippet to like regulatorer for å regulere robotens retning på henholdsvis tankvegg og tankbunn. SpeedController() kontrollerer robotens hastighet etter en gitt referanse, mens CleaningController() regulerer rotasjons hastigheten til rensen.

12.5.2.1 Kjøring på Tankvegg

Figur 172 viser prinsippet for sammenkobling av HeadingController() og SpeedController(). Pådragene fra de to regulatorene summeres eller subtraheres til henholdsvis høyre og venstre motorpådrag. I prinsippet er dette to separate regulatorer, en PID-regulator for hastighet og en multivariabel regulator for heading.



Figur 172: Retning- og hastighetsregulator på tankvegg

Dekoblede regulatorer

Regulatorene kan ses på som to dekkoblede systemer, da i prinsippet HeadingControlleren() ikke påvirker hastigheten og omvendt. Dette kan man se ut fra blokkskjemaet (Figur 172) eller matematisk. Pådragene til motorene beregnes som:

$$U_{left} = U_{speed} + U_{heading} \quad (12.83)$$

$$U_{right} = U_{speed} - U_{heading} \quad (12.84)$$

Målt hastighet beregnes slik i Speed_Calc (kapittel 12.3.4):

$$speed_{robot} = speed_{left} + speed_{right} \quad (12.85)$$

Vi antar at sammenhengen mellom pådragene og hastighetene for hver motor er lineær og lik:

$$speed_{left} = k * U_{left} \quad (12.86)$$

$$speed_{right} = k * U_{right} \quad (12.87)$$

k : Konstant som beskriver lineær sammenheng mellom motorpådrag og motorhastighet

Hastigheten $speed_{robot}$ påvirkes kun av hastighetsregulatoren U_{speed} :

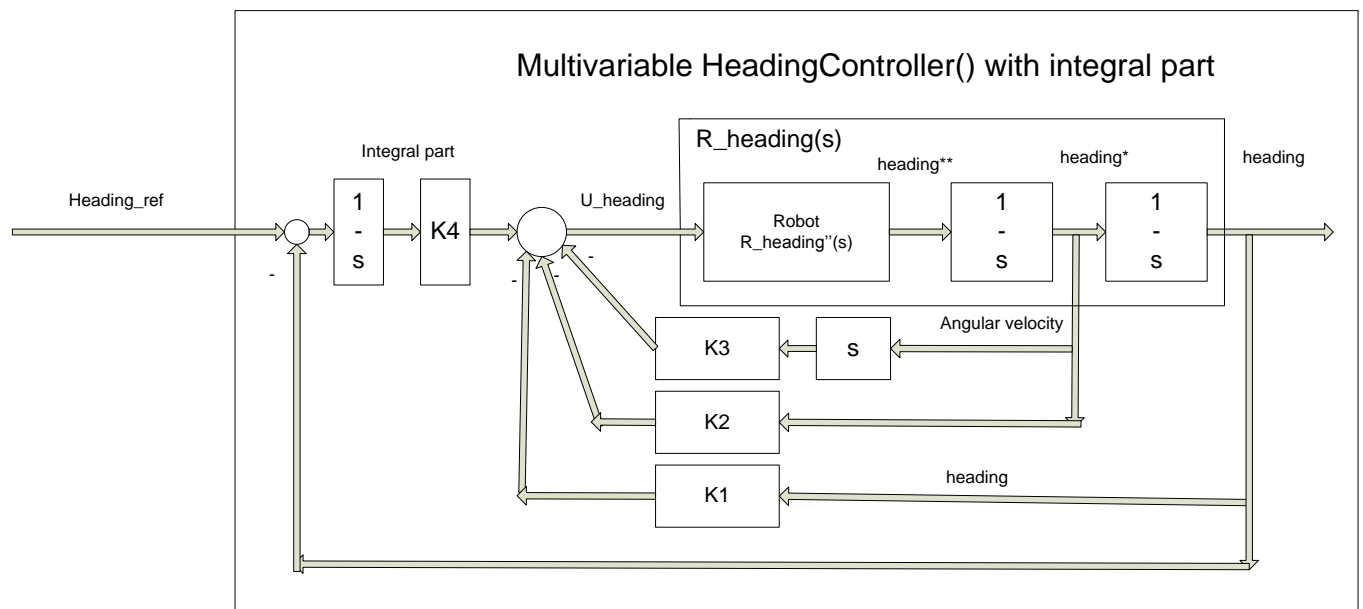
$$speed_{robot} = speed_{left} + speed_{right} = k * U_{left} + k * U_{right} \quad (12.88)$$

$$speed_{robot} = k * (U_{speed} + U_{heading}) + k * (U_{speed} - U_{heading}) = 2 * k * U_{speed} \quad (12.89)$$

Det samme gjelder for *heading*, der den er uavhengig av hastigheten. I prinsippet betyr dette at hver enkelt regulator kan stilles inn hver for seg, da de er uavhengige. I praksis er påvirkningen av betydning, da motorenes hastighet ikke er like og lineære som funksjon av pådraget. Dersom pådragene går i metning vil også regulatorene motarbeide hverandre betydelig.

12.5.2.2 HeadingController()

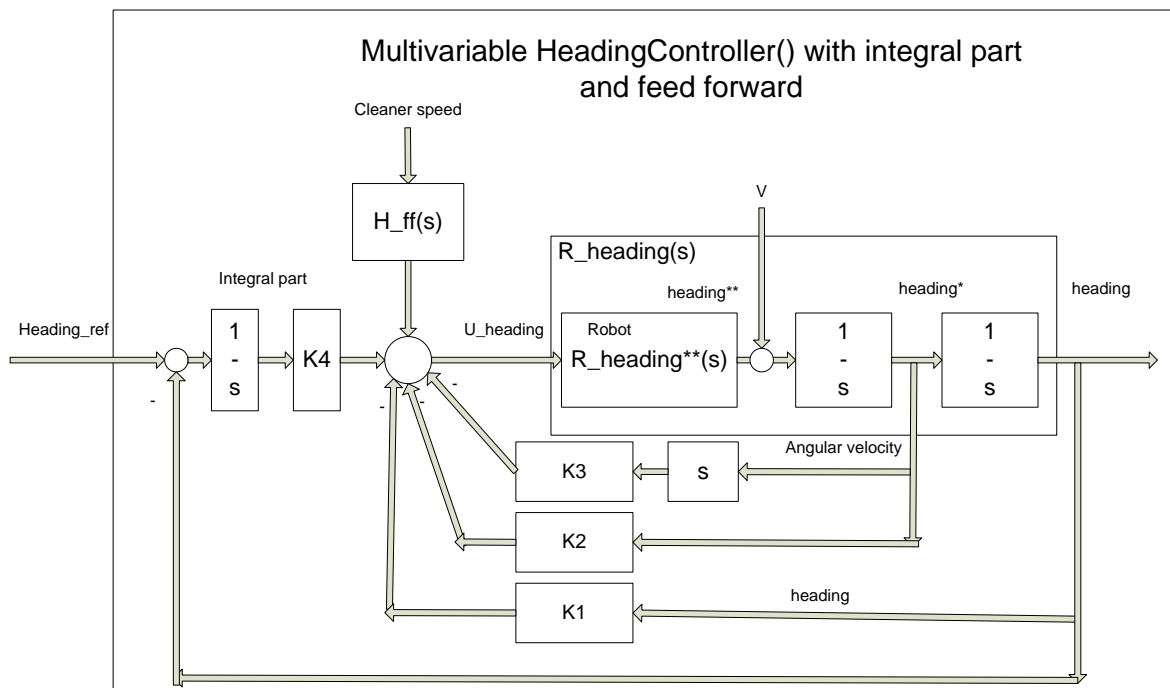
HeadingController() benytter tilbakekobling fra både estimert *heading* og vinkelhastighet. Dette gi mulighet for en robust regulator med god respons. Estimert *heading* beregnes på grunnlag av informasjon fra akselerometeret, mens vinkelhastigheten er basert på enkoderne. Figur 173 viser prinsippet for en multivariabel HeadingController() med integralvirkning.



Figur 173: Multivariabel regulator for heading

Foroverkobling

Ved oppstart av den roterende rensen, oppstår en uønsket forstyrrelse i robotens *heading* (kapittel 5.7.1). HeadingController() trenger en betydelig tid på å integrere bort dette, så et merkbart avvik oppstår. For å begrense denne påvirkningen, implementes en foroverkobling fra pådraget til den roterende rensen. Friksjonen mellom rensen og tanken bestemmer forstyrrelsens størrelse (kapittel 5.7.1). Figur 174 viser hvordan dette kan løses ved å benytte funksjonen $H_{ff}(s)$ som forstyrrelsesfunksjon i foroverkoblingen.



Figur 174: Multivariabel regulator med foroverkobling

Ettersom renserens påvirkning på roboten, V er et konstant moment M_{yaw} (kapittel 5.7.1), kan en konstant funksjon $H_{ff}(s)$ benyttes:

$$H_{ff}(s) = K * \text{sign}(\text{cleaner_speed}) \quad (12.90)$$

- K : Konstant som bestemmer foroverkoblingens størrelse
- V : Forstyrrelsesmoment fra renseren på robotens heading
- $H_{ff}(s)$: Forstyrrelsesfunksjon i foroverkoblingen
- cleaner_speed : Rensers rotasjonshastighet

Dersom renseren er avslått, settes $H_{ff}(s) = 0$. K justeres enklest inn ved prøving og feiling sammen med et plott av aktuell heading. En perfekt foroverkobling kan ikke oppnås, da ujevnheter på tanken, begroing eller robotens hastighet vil påvirke V .

Identifikasjon av robotens parametre

Overføringsfunksjonen $R_{heading}(s)$ beskriver sammenhengen mellom pådraget og aktuell heading:

$$R_{heading}(s) = \frac{\text{heading}(s)}{U_{heading}(s)} \quad (12.91)$$

Denne kan finnes både ved matematisk- og eksperimentell modellering. Matematisk modellering krever kjennskap til mange ukjente faktorer som friksjon, motorkonstanter osv. Eksperimentell modellering er derfor den enkleste metoden i dette tilfellet. Sprangrespons er vurdert som en god eksperimentell metode for dette systemet.

Sprangrespons med den målte vinkelhastigheten og regulatorens pådrag plottes i samme graf i det grafiske brukergrensesnittet. Dermed kan parametre til en overføringsfunksjon leses av og tilnærmes en funksjon av lav orden. En 2.ordens funksjon med en tidsforsinkelse vil trolig gi en god nok modell.

I praksis vil $R_{heading}(s)$ være avhengig av flere parametre enn de konstante: motorer, hjul og treghetsmoment. På grunn av gravitasjonsfeltets påvirkning på roboten (kapittel 5.7.2), vil *heading* være en varierende parameter. Andre viktige parametre vil være batterispenningen og robotens hastighet. Hastigheten bidrar med en varierende tidsforsinkelse på grunn av hastighetsmålingen (kapittel 12.3.4.5) og endrede friksjonskrefter. Dette krever en modell på formen:

$$R_{heading}(s, heading, battery_voltage, Speed_{robot}) \quad (12.92)$$

En optimal HeadingController() vil derfor være adaptiv, dersom optimale innstillinger skal oppnås ved alle forhold.

Adaptive controller

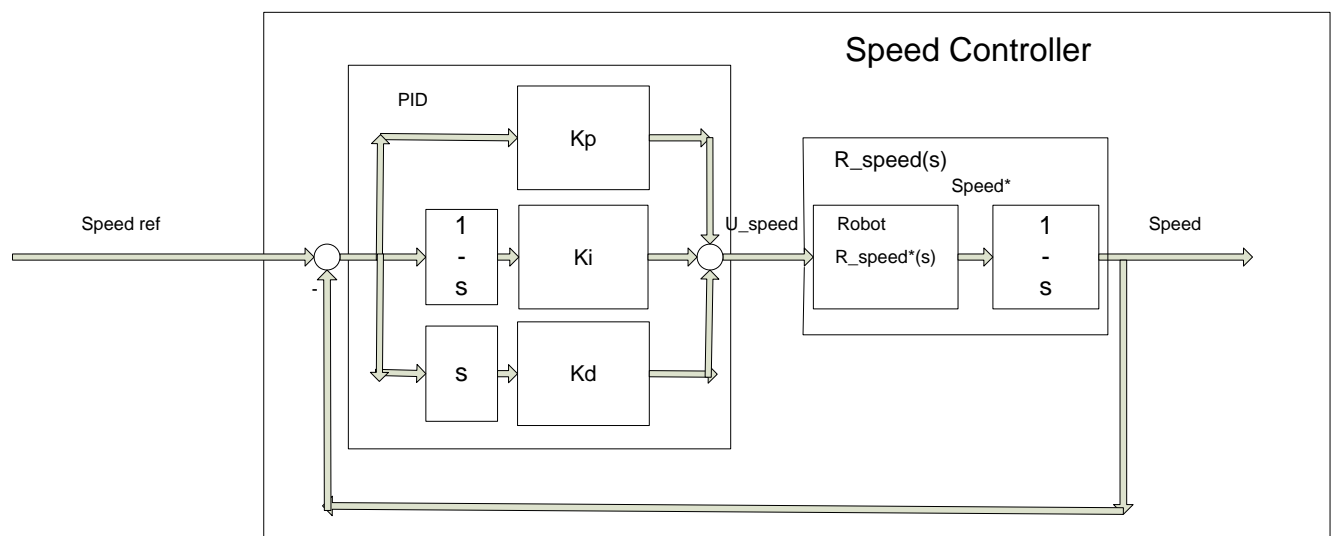
I en adaptiv HeadingController() blir hver av parametrene:

$$K_i = K_i(heading, battery_voltage, Speed_{robot}, F_{cleaner}) \quad i = 1,2,3,4 \quad (12.93)$$

Dimensjonering av konstanter K_i kan gjøres på grunnlag av for eksempel polplassering eller LQR.

12.5.2.3 SpeedController()

Som hastighetsregulator benyttes en PID-regulator. Det er ønskelig med en rolig respons i hastighetsreguleringen uten oversving. Figur 175 viser prinsippet for SpeedController().



Figur 175: SpeedController()

Diskret PID-regulator

I programmet implementeres en diskret PID-regulator [46]. En regulator med derivasjon av hastigheten benyttes for å unngå forstyrrelser ved endring av hastighetsreferansen:

$$e_{(k)} = speed\ ref_{(k)} - speed_{(k)} \quad (12.94)$$

$$y_{(k)} = speed_{(k)} \quad (12.95)$$

$$u_{speed(k)} = u_{speed(k-1)} + K_p * \left(\left(1 + \frac{h}{T_i} \right) e_{(k)} - e_{(k-1)} \right) + K_p * \frac{T_d}{h} (y_{(k)} - 2y_{(k-1)} + y_{(k-2)}) \quad (12.96)$$

$$T_i = \frac{K_p}{K_i} \quad (12.97)$$

$$T_d = \frac{K_d}{K_p} \quad (12.98)$$

e :	Avvik
y :	Prosessverdi
u_{speed} :	Pådrag
h :	Samplingstid
K_p :	Proporsjonalforsterkning
K_i :	Integralforsterkning
K_d :	Derivatforsterkning
T_i :	Integrasjonstid
T_d :	Derivasjonstid

Identifikasjon av robotens parametre

Robotens overføringsfunksjon $R_{speed}(s)$ beskriver sammenhengen mellom hastigheten og pådraget:

$$R_{speed}(s) = \frac{speed(s)}{U_{speed}(s)} \quad (12.99)$$

Overføringsfunksjonen kan finnes på samme måte som for HeadingController(), gjennom sprangrespons eller frekvensrespons.

Adaptive controller

$R_{speed}(s)$ er avhengig av flere faktorer. De varierende parametrene er i hovedsak *heading* på grunn av gravitasjonsfeltet (kapittel 5.5), friksjonskraften $F_{cleaner}$ (kapittel 5.7.1) og hastigheten. Tilsvarende som HeadingController(), bør også SpeedController() være adaptiv for best mulig respons:

$$K_p(heading, F_{cleaner}, Speed_{robot}) \quad (12.100)$$

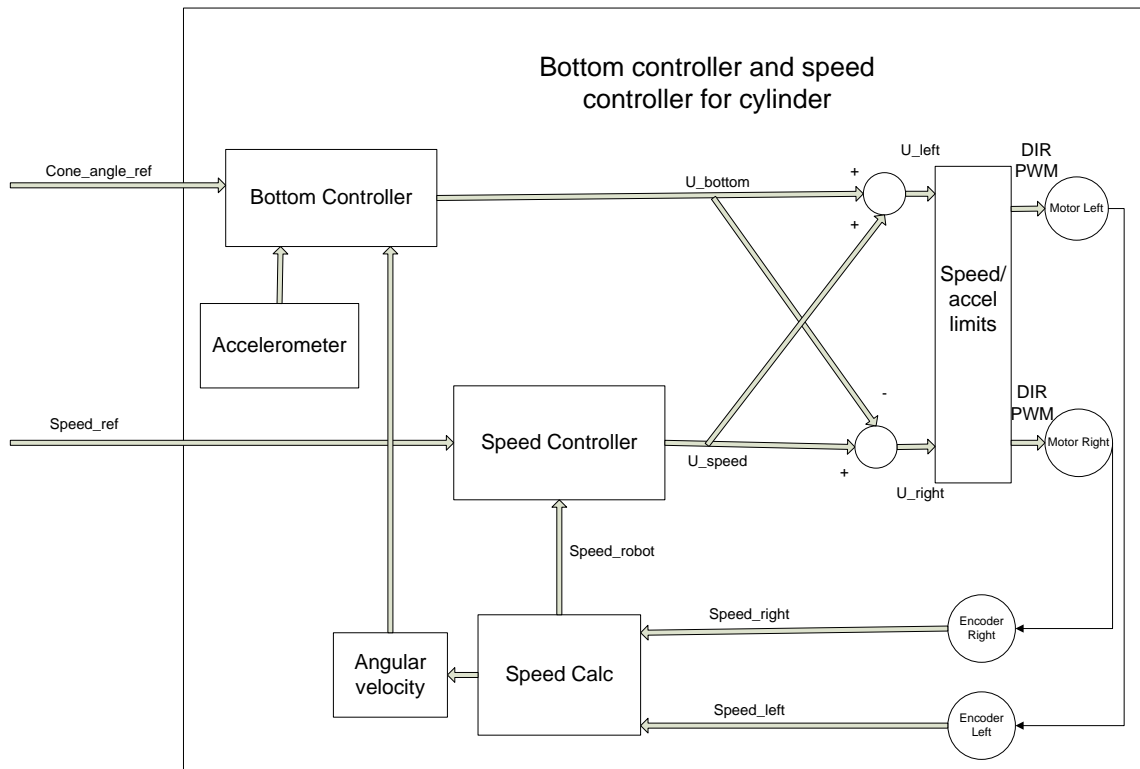
$$T_i(heading, F_{cleaner}, Speed_{robot}) \quad (12.101)$$

$$T_d(heading, F_{cleaner}, Speed_{robot}) \quad (12.102)$$

På dagens prototype er PID-regulatoren implementert uten adaptiv kompensasjon.

12.5.2.4 Kjøring på tankbunn

Kjøring på tankbunnen skjer i prinsippet som på tankveggen. På bunnen sørger BottomController() for regulering av robotens retning sammen med den samme SpeedController() som benyttes på tankveggen.



Figur 176: Retning- og hastighetsregulator på tankbunn

12.5.2.5 BottomController()

BottomController() fungerer på samme måte som HeadingController(). Ønsket retning spesifiseres av parameteren *cone_angle_ref*. Tilsvarende foroverkobling fra rensere bør også implementeres her.

BottomController() justeres for å gi minimalt med avvik fra *cone_angle_ref*. Det er viktig at *cone_angle* holdes tilnærmet konstant, da for store avvik fører til at IR-sensoren mister avstandsmåling mot utløpsrøret.

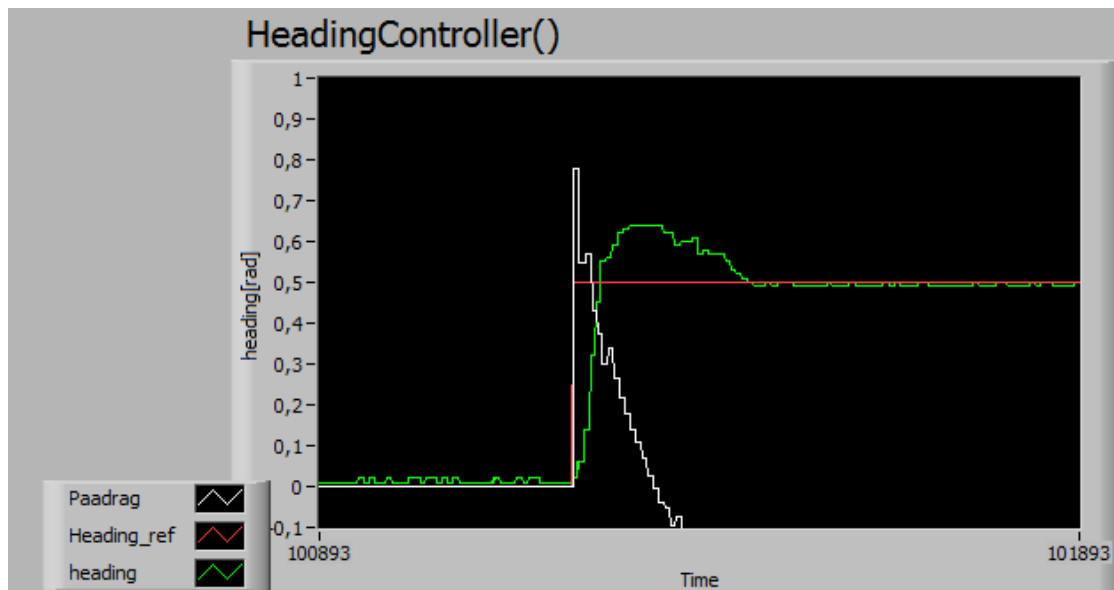
Diskusjon

I en utviklingsfase må etterjustering av regulatorer forventes. Dette fordi endring av parametre som robotens masse eller friksjon vil påvirke regulatorene. Beregninger av regulatorparametre basert på systemidentifikasjon og ønsket respons er viktige temaer som ikke er utdypet i denne rapporten. Dette begrunnes med at dette først blir viktig når den endelige mekanikken er klar. Små endringer i friksjon eller motorer vil endre alle modell- og regulatorparametrene betydelig.

En del av de planlagte strukturene er ikke implementert på roboten p.g.a. begrenset tid. Dette gjelder spesielt HeadingController(), der en vanlig PID-regulator har blitt brukt i stedet for den planlagte adaptive multivariable regulatoren med foroverkobling.

HeadingController()

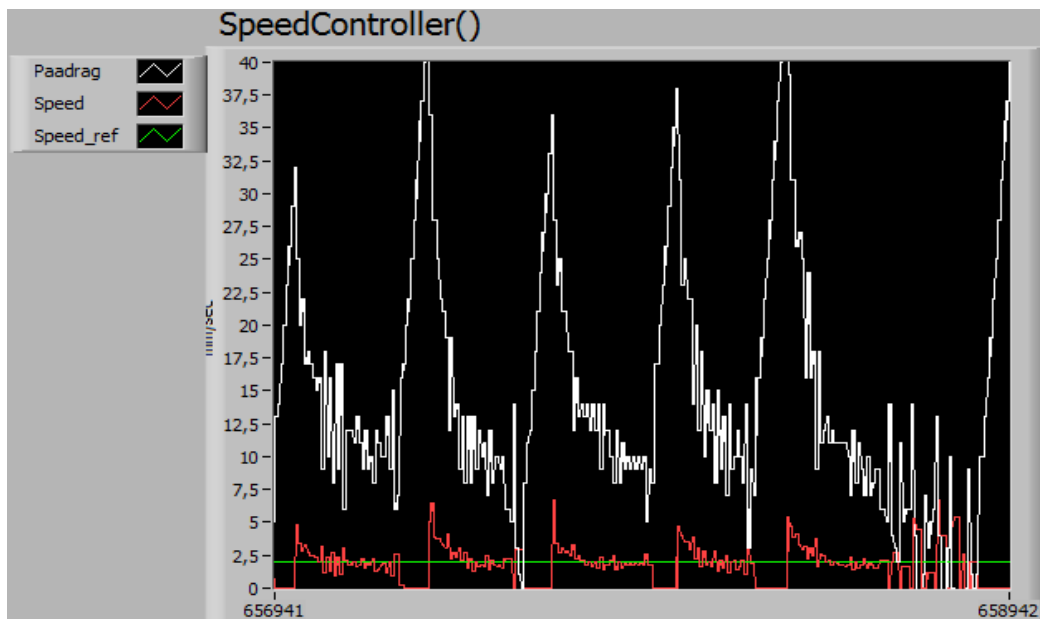
Figur 177 viser en sprangrespons i den implementerte HeadingControlleren() ved et sprang i *heading_ref* fra 0 til 0,5 rad. Vi får et uønsket oversving ved ønsket innstillingstid, da kun akselerometeret benyttes som tilbakekobling. I den planlagte multivariable HeadingControlleren() er det forventet at en respons uten oversving kan oppnås med den samme innstillingstiden.



Figur 177: Sprangrespons for implementert PID-HeadingController()

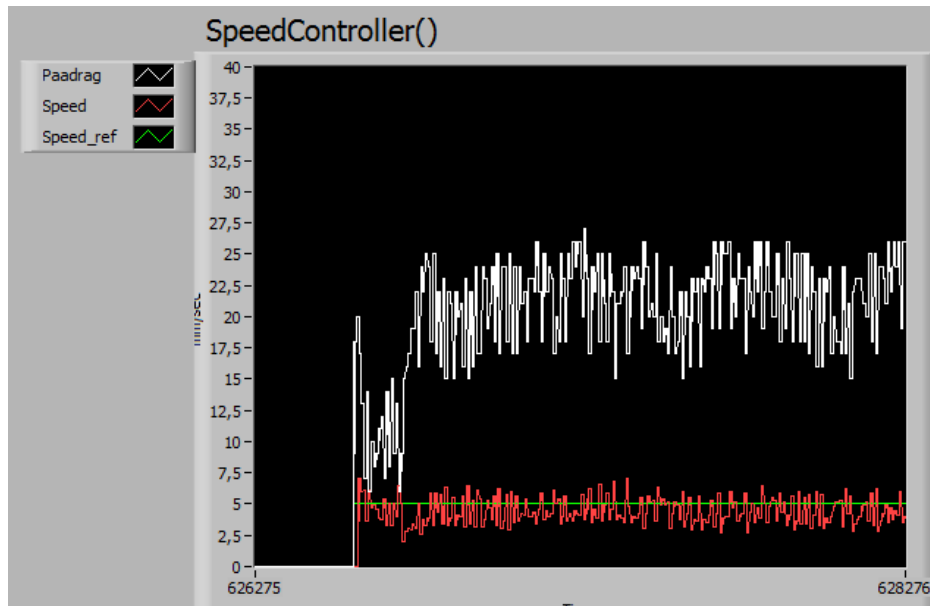
SpeedController()

Motorene er vanskelig å hastighetsregulere ved lave turtall. En kombinasjon av friksjon og stiksjon i girhuset, og enkoderens lave oppløsning gjør det vanskelig å regulere hastigheten. Figur 178 viser dette i form av ustabilitet. Her er ønsket hastighet satt til 2mm/s.



Figur 178: Ustabilitet ved hastighetsreferanse 2 mm/s

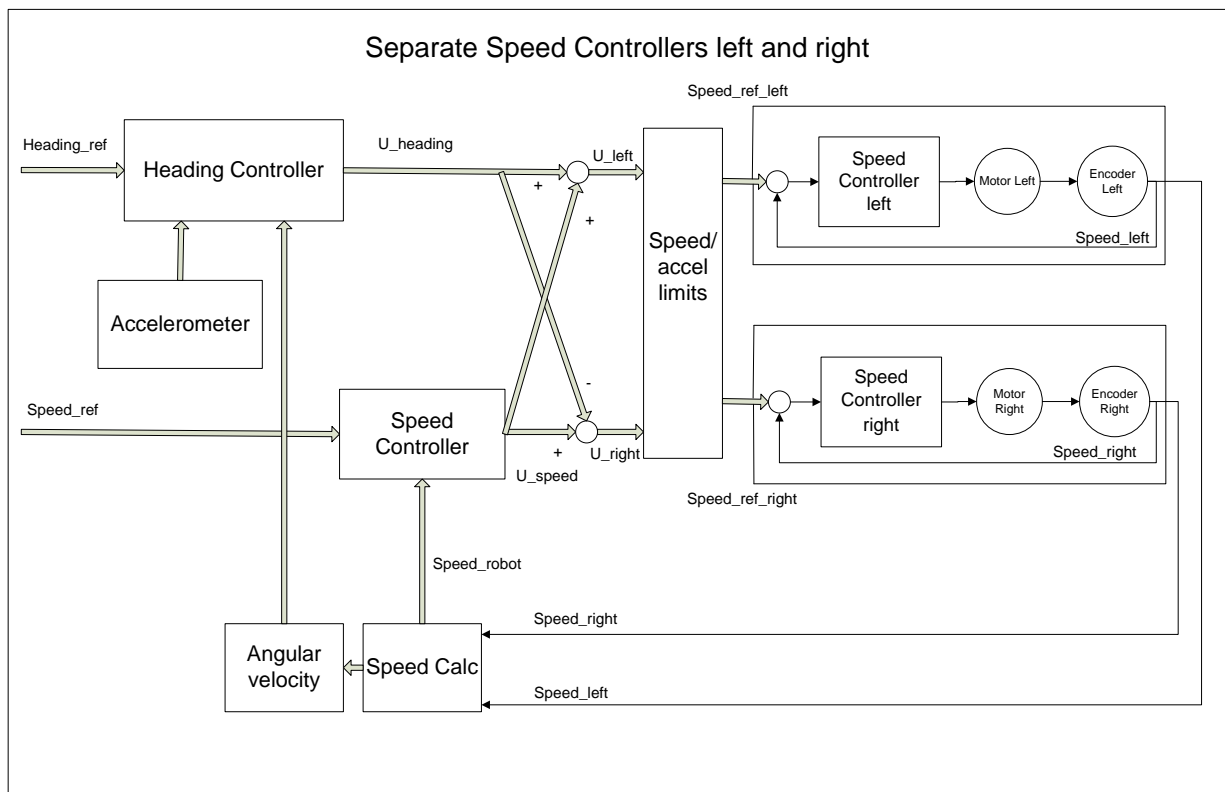
Figur 179 viser hastighetsregulatoren ved en referanse satt til 5 mm/s. Hastigheten er også her noe varierende.



Figur 179: Speedcontroller() ved hastighetsreferanse 5 mm/s

Alternative strukturer for Controller()

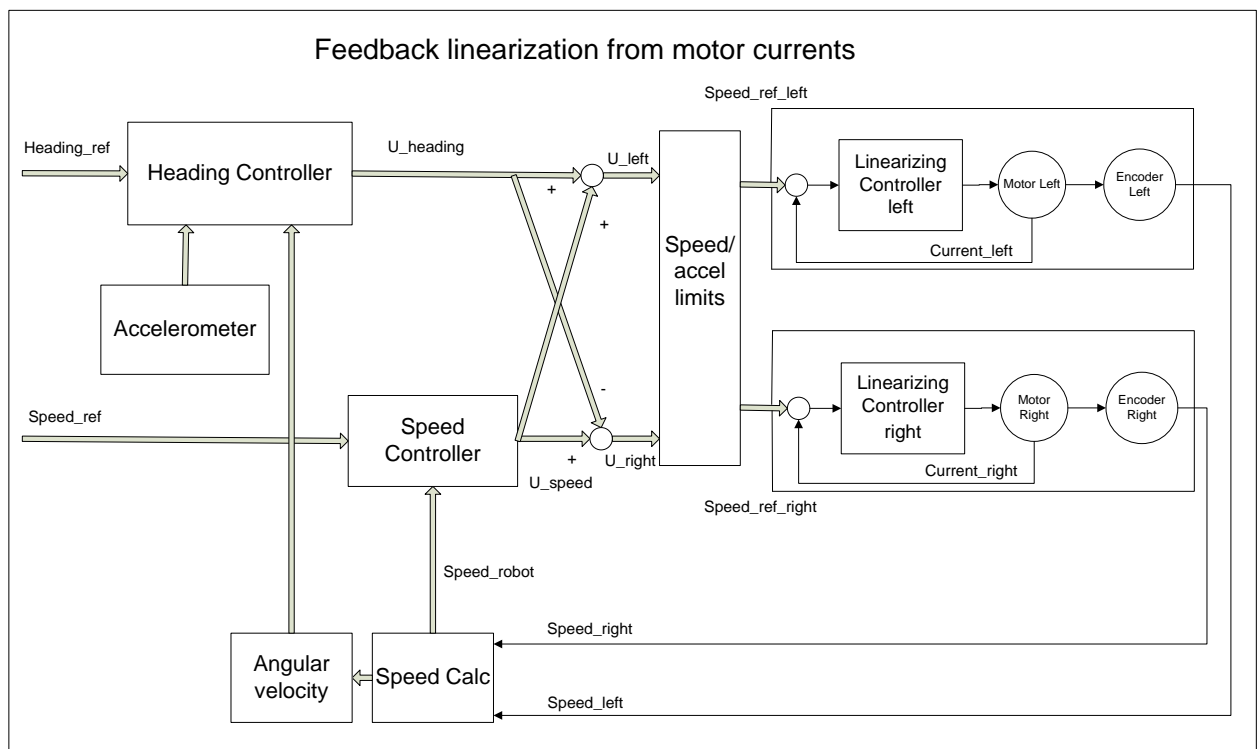
I en mulig oppgradering av Controller(), kan en hastighetsregulator benyttes for hver motor. Figur 180 viser hvordan dette gjøres. De indre hastighetsregulatorene for venstre og høyre motor bør operere med en høyere oppdateringsfrekvens enn resten av regulatorene. Heading Controller() og SpeedController() kjører typisk ved faste, lengre tidsintervaller. Forskjellen mellom motorene fjernes på denne måten fra reguleringsløyfen. Separate hastighetsregulatorer bør testes på roboten.



Figur 180: En hastighetsregulator på hver motor

For å minske regulatorenens påvirkning av hverandre, kan det utvikles en lineariserende funksjon som beskriver forholdet mellom pådrag og hastighet for hver motor. Alternativt kan et dekoblingsnettverk kobles mellom pådragene. Da en lineariserende funksjon eller et dekoblingsnettverk vil være avhengig av robotens friksjon, temperatur, batterispennning og gravitasjon, er det vanskelig å få dette til i praksis.

Dersom en feedback linearizing controller benyttes for hver motor, kan en linearisering av motorens moment oppnås. Dette er ønskelig for å minske Speed Controller() og Heading Controller() sin påvirkning på hverandre, og gjøre regulatorinnstillingene enklere. Figur 181 viser prinsippet hvordan dette fungerer, med en tilbakekobling fra strømmålerne (kapittel 11.3.1).



Figur 181: Feedback linearization controller for hver motor

Det er av interesse å teste det praktiske forbedringspotensialet med bruk av feedback fra strømmålerne som vist. Prinsippet kan også kombineres med en hastighetsregulator for hver motor som vist på Figur 180.

12.6 Energieffektiv programvare

I programmet kan en rekke enkle tiltak implmenteres for å begrense robotens energiforbruk. Følgende tiltak kan gjøres uten å redusere robotens funksjonalitet:

- Bare slå på IR-avstandssensorer som har forventet deteksjon, og kun i korte tidsintervaller.
- Slå på linjefølgingsensorer kun ved behov og i korte tidsintervaller
- Ved normal drift bør den trådløse kommunikasjonen begrenses til det nødvendigste.

12.7 Diskusjon

Programvaren er i dag ikke ferdig utviklet. Dette fordi posisjonering på en heltankrigg ikke er implementert. En del oppgraderinger av regulatorer, og estimatorer bør også gjøres. Enkelte av de viste løsningene er ikke testet i praksis, men bør ses på som en del av det videre arbeidet på rensesystemet.

12.8 Konklusjon

I løpet av prosjektet er det utviklet en god programplattform for roboten. Dette gjennom en oversiktlig og naturlig oppdelt programstruktur. Det gjenstår noe testing, justering og videreutvikling før man får implementert alle de planlagte funksjonene. Tester i form av kjøring på tanken viser at prinsippene fungerer. En plan for det gjenstående arbeidet er gitt i kapittel 17.

13 Grafisk brukergrensesnitt på PC

Det er ønskelig at det komplette tankrensesystemet skal igangsettes og overvåkes fra et brukergrensesnitt. Den beste løsningen til dette er gjennom et grafisk grensesnitt på en datamaskin. Under utvikling av programvaren på roboten behøves kontinuerlig testing av endringene som blir gjort. For å gjøre testingen mer nøyaktig og pålitelig, var det behov for å utvikle en egnet software til PC for å visualisere robotens parametre. Brukergrensesnittets hovedfunksjoner blir vist i dette kapitlet. Nøyaktig beskrivelse av alle knapper, funksjoner og kildekode vil ikke bli gjort, da dette ikke anses som viktig for leseren.

13.1.1 Krav

Følgende spesifikasjoner ble satt for det grafiske brukergrensesnittet:

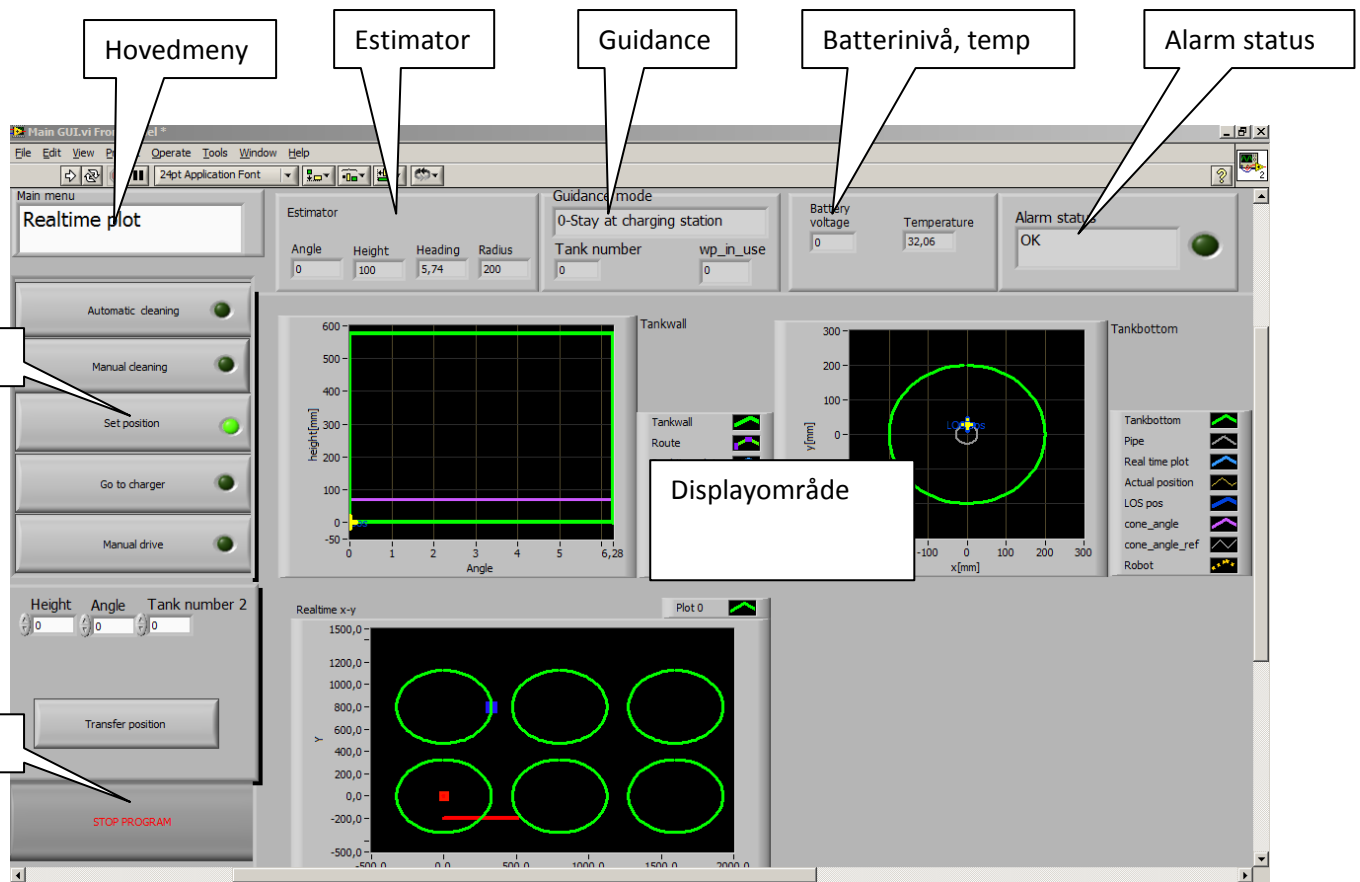
- Sanntidsplott av robotens posisjon og og retning på tanken
- Mulighet for valg av tidspunkt for rens av tanker, og hvilke tanker som skal renses
- Spesifikasjon av tankenes størrelse
- Plott av robotens sensordata, estimer og regulatorparametre
- Overvåkning av alarmer

13.1.2 Program

Det finnes mange leverandører av programvare for utvikling av grafisk brukergrensesnitt på markedet. De fleste av disse programmene kan benyttes til utvikling av robotens brukergrensesnitt med bra resultat. Programmet NI Labview ble valgt til formålet. Dette er et utviklingsverktøy som NTNU har lisenser til. Labview benyttes også til en del andre prosjekter ved NTNU Sealab. Fordelen med Labview er at det har mange ferdige funksjoner og et bra grafisk utvalg. En annen viktig faktor er god erfaring med programmet fra tidligere prosjekter [33]. Det sikrer en enkel og hurtig utviklingsprosess.

13.1.3 Resultat

Figur 182 viser et bilde fra det utviklede grafiske brukergrensesnittet med forklaring av de viktigste delene.



Figur 182: Hovedfunksjonene i programmet

Hovedmeny

Brukergransesnittet er bygd opp rundt en hovedmeny, plassert øverst i venstre hjørne. Menyen spesifiserer hvilke hovedfunksjoner som skal vises på skjermens displayområde. Her har brukeren valgene:

- Realtime plot
- Cleaning setup
- Time planner
- Tank setup
- Sensordata
- Estimator
- Guidance system
- Controller
- Alarm
- Setup

Hvert enkelt valg blir bedre beskrevet i kap 13.1.3.1.

Rensemeny

Rensemenyen angir start av renseprosessen. Dette er knapper som alltid vises for brukeren.

Følgende valg kan gjøres:

- Automatic cleaning
Automatisk start av renseprosessen med angitte tanker til et ønsket tidspunkt.
- Manual cleaning
Oppstart av en renseprosess umiddelbart.

- Set position
Robotens posisjon kan spesifiseres. Dette gjøres dersom roboten blir flyttet manuelt.
- Go to charger
Roboten kjører tilbake til ladestasjonen.
- Manual drive
Roboten kan kjøres manuelt fra en spillkontroller. Dette er spesielt praktisk under uttesting.

Estimator

Estimatorens viktigste parametre vises for brukeren. Disse er: *angle*, *height*, *heading*, *radius* og *cone_angle*.

Guidance

Guidance-systemets viktigste parametre er visualisert. Dette er parametre som *mode*, hvilken tank som renses og hvilke waypoints som er i bruk. *Mode* vises i form av en forklarende tekst, se Tabell 4.

Batterinivå

Batterispenningen overvåkes. I tillegg vises temperaturen på et display.

Alarm status

Et display og en lampe indikerer dersom feil har oppstått. Dette er feilmeldinger fra roboten eller manglende kommunikasjon mellom robot og PC.

Displayområde

Her vises alle grafer og plott, avhengig av hva som er valgt i hovedmenyen.

Stoppknapp

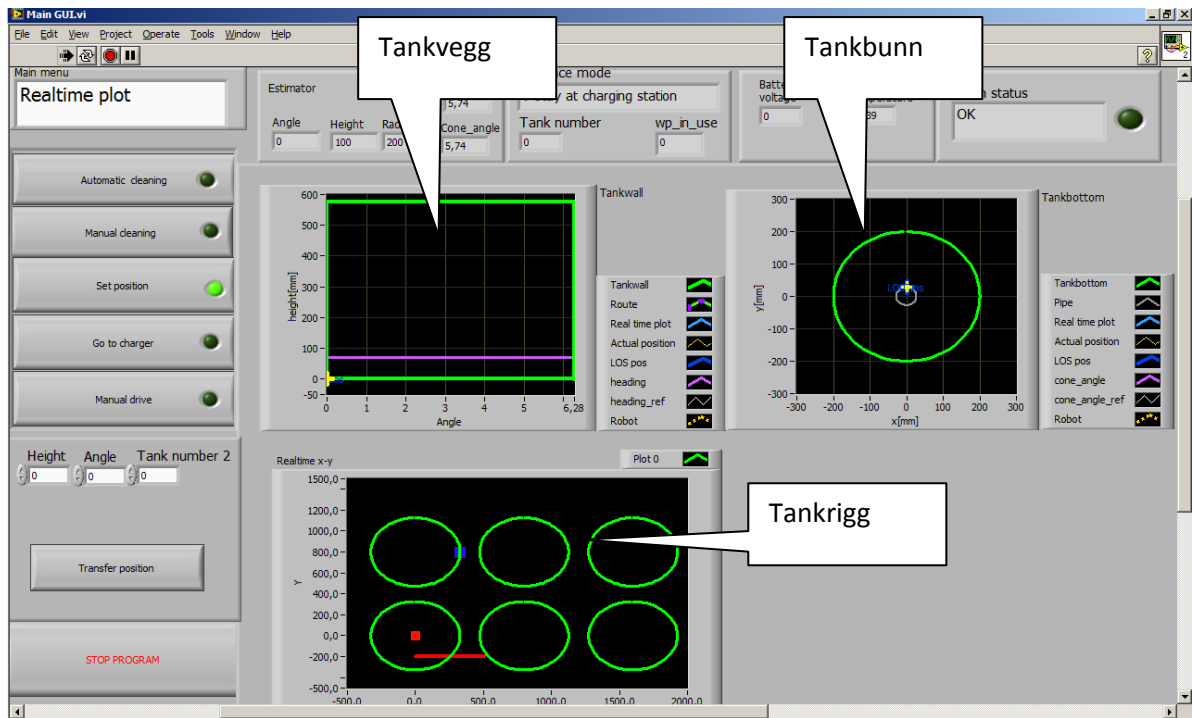
Denne funksjonen stopper programmet.

13.1.3.1 Hovedmeny

I denne delen beskrives de ulike valgene som kan gjøres i hovedmenyen.

Realtime plot

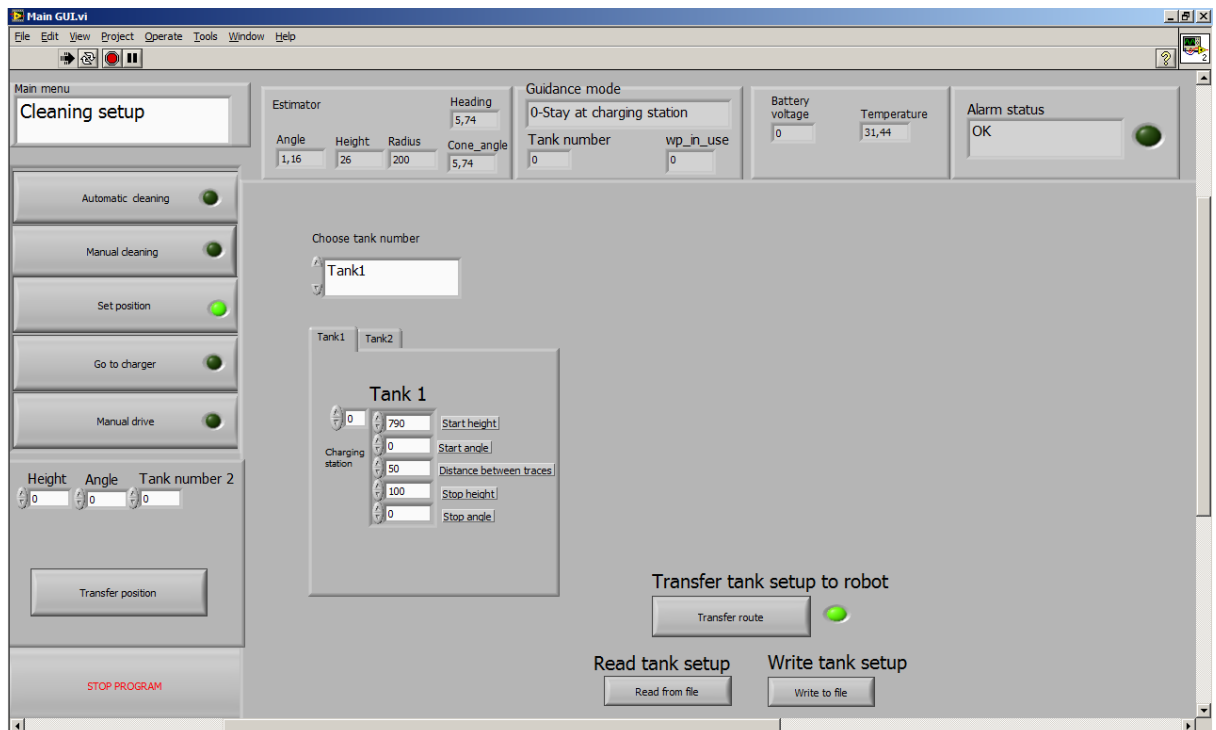
Sanntidsplott av robotens plassering på riggen og tankvegg eller tankbunn blir vist på skjermen. Kjørt rute ses som en strek i koordinatsystemet. Posisjoneringens nøyaktighet og stabilitet kan på denne måtes vurderes ut fra forskjellen mellom reell og ønsket posisjon. Figur 183 viser et bilde fra *Realtime plot*.



Figur 183: Realtime plot

Cleaning setup

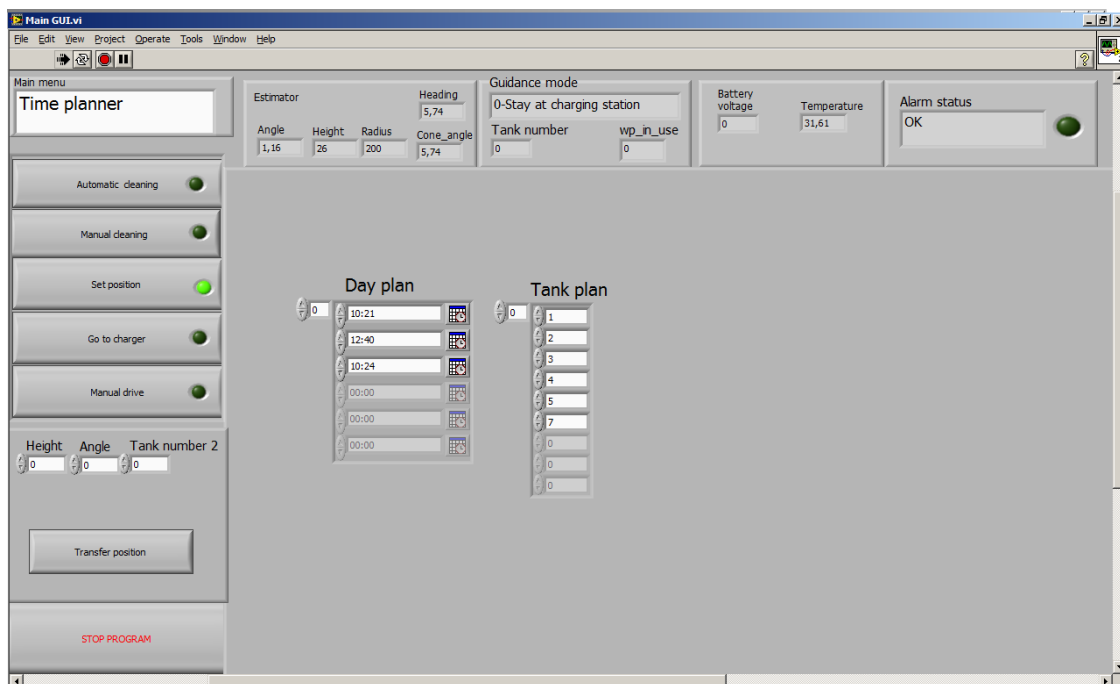
Her spesifiseres kjøreruten for rensing av hver tank. Waypoints på tankene genereres ut fra den spesifiserte kjøreruten. Siden er ikke ferdig utviklet.



Figur 184: Cleaning setup

Time planner

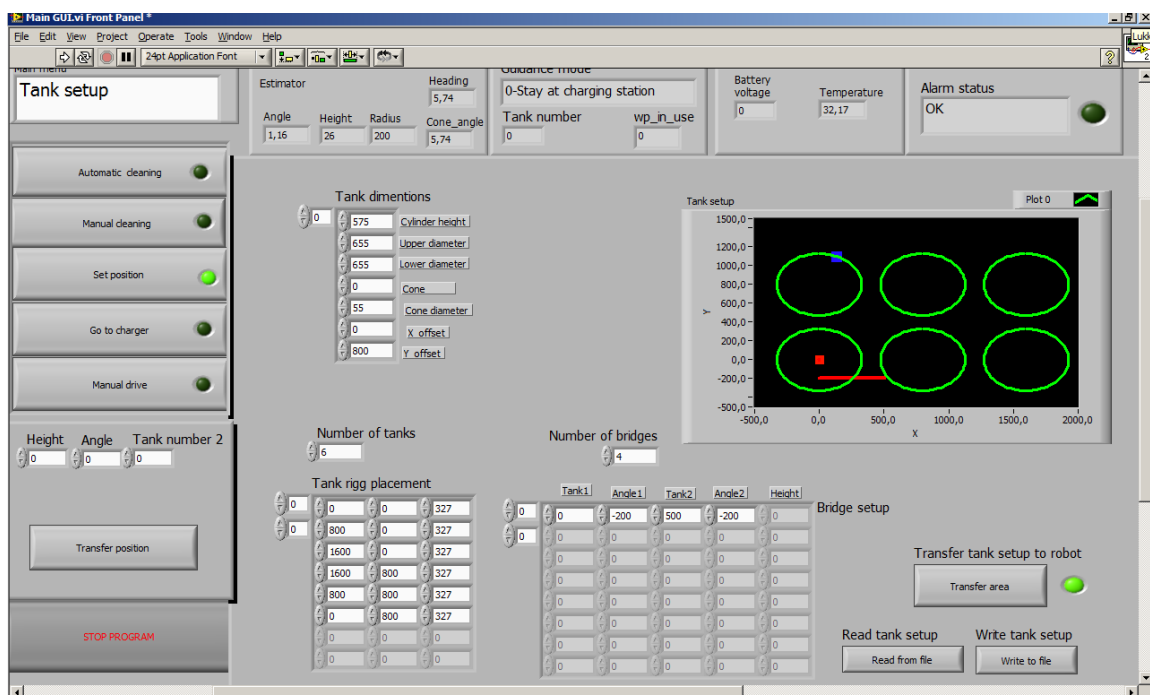
I tidsplanleggeren spesifiseres ønsket klokkeslett og dato for rensing av spesifiserte tanker. Dette muliggjør rens av forskjellige tanker til forskjellige tidspunkt.



Figur 185: Time planner

Tank setup

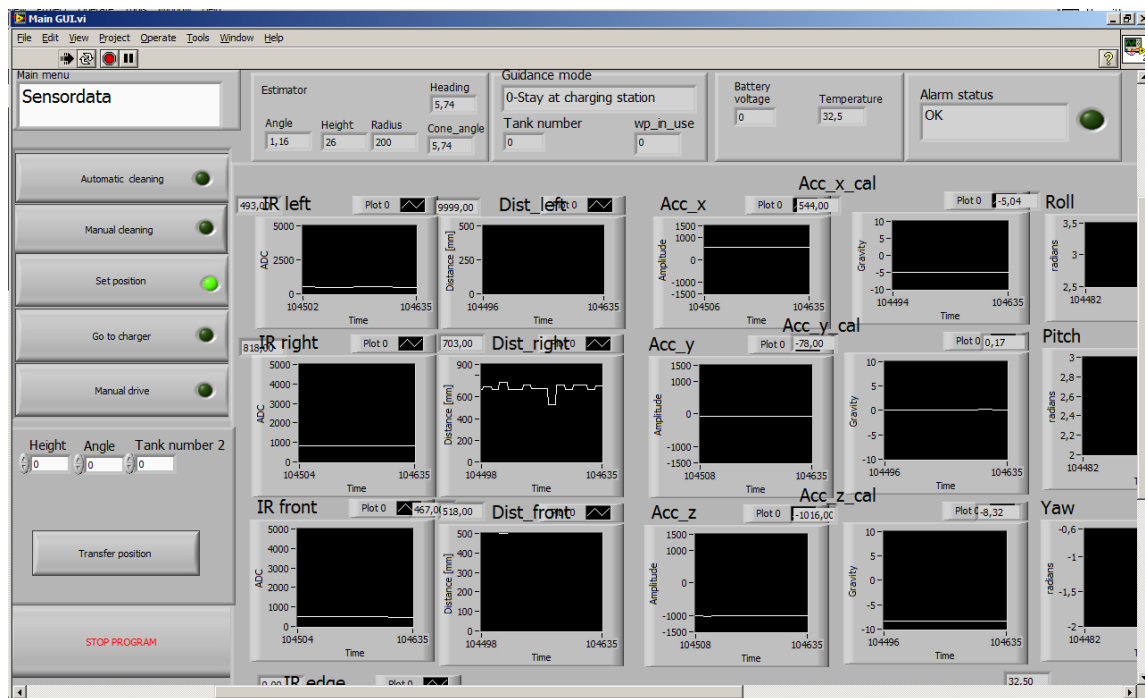
I *Tank setup* spesifiseres dimensjonene til hver av tankene. Her oppgis også plassering av hver tank og brosystemet i koordinatsystemet Area. Dette er nødvendig for å få en riktig posisjonering av roboten både på hver tank og på tankriggen.



Figur 186: Tank setup

Sensordata

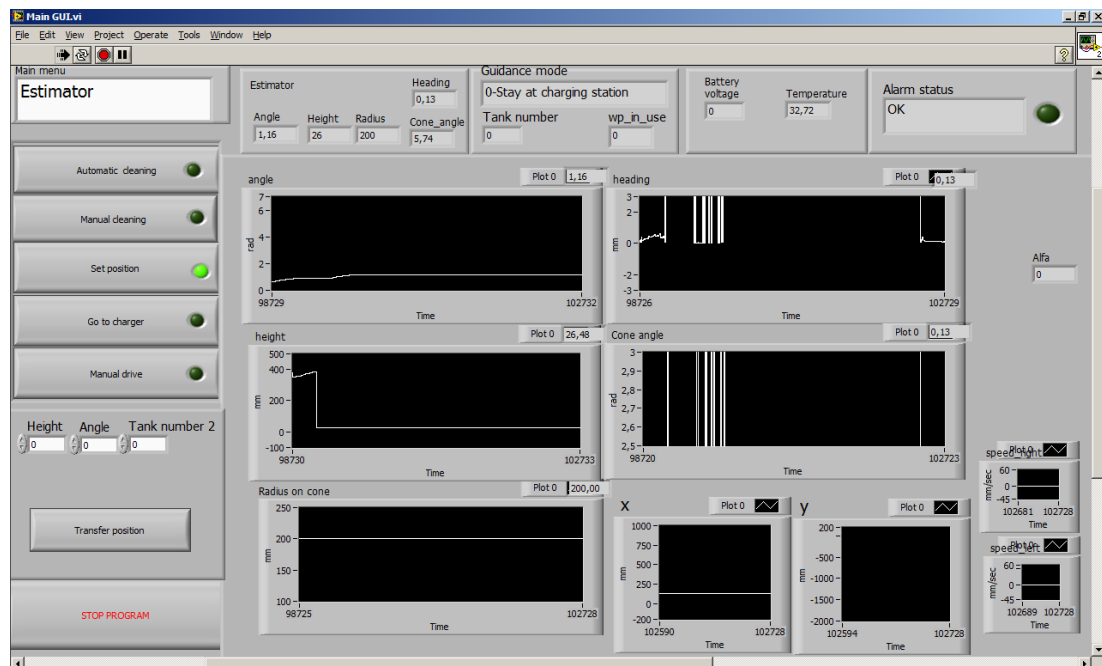
På siden *Sensordata* plottes både sensor rådata og kalibrerte data. Dette er data fra avstandssensorer, linjefølgingssensorer, temperatursensor og akselerometer.



Figur 187: Sensordata

Estimator

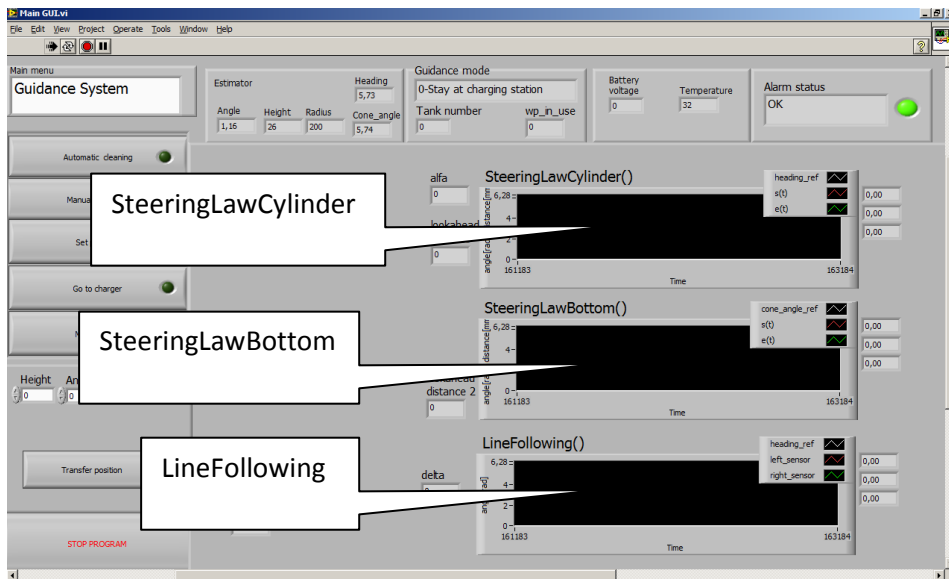
Estimatorens viktigste parametre plottes i forskjellige grafer i sanntid. Dette er parametrene *angle*, *height*, *radius*, *heading*, *cone_angle*, *speed*, *x_area* og *y_area*.



Figur 188: Estimator

Guidance system

Denne siden visualiserer Guidance-systemets viktigste parametre. Slik kan referansesignaler og *cross – track error* plottes ved innstilling av parameteren *lookahead distance*. Dette gjelder både for tankvegg og tankbunn. Også linjefølgingsalgoritmens oppførsel kan overvåkes i en egen graf.

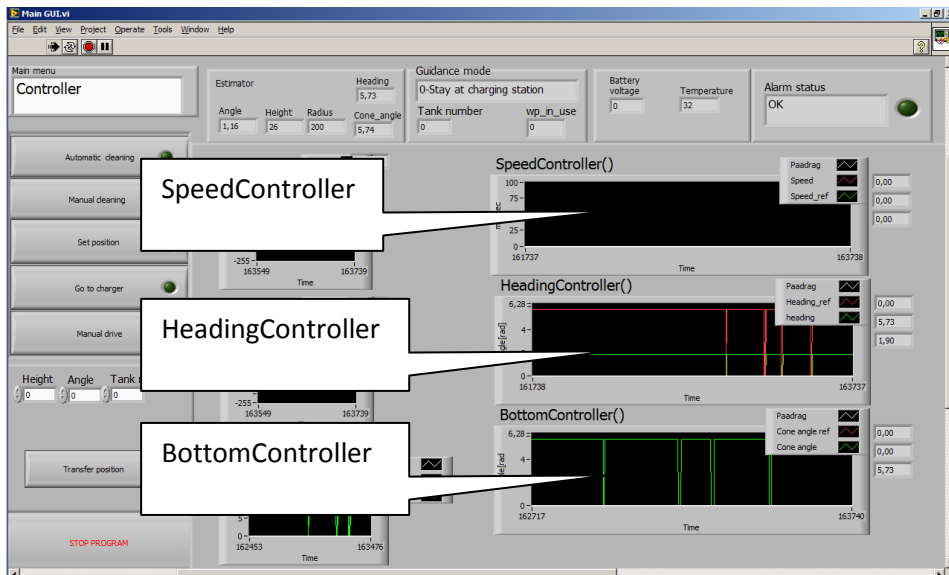


Figur 189. Guidance system

Controller

Controller er et nyttig verktøy ved tuning av robotens regulatorer. Grafer med både referanse, pådrag og prosessverdi ses i samme vindu. Dette gir god informasjon om systemets oppførsel.

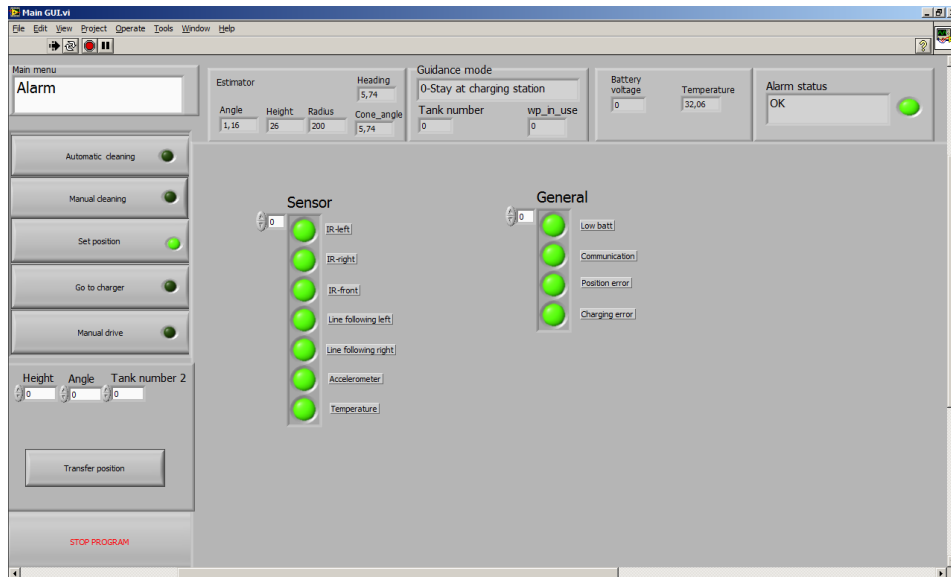
Fra kurvene kan systemets sprangrespons observeres. Dette er nyttig for å finne robotens parametre ved eksperimentell modellering.



Figur 190: Controller

Alarm

Et enkelt alarmvindu gir informasjon om status. Dette i form av grønne eller røde lysdioder som indikerer alarmer. Feilmeldinger vil typisk være defekte sensorer, lavt batterinivå, feil i posisjoneringen eller den trådløse kommunikasjonen.

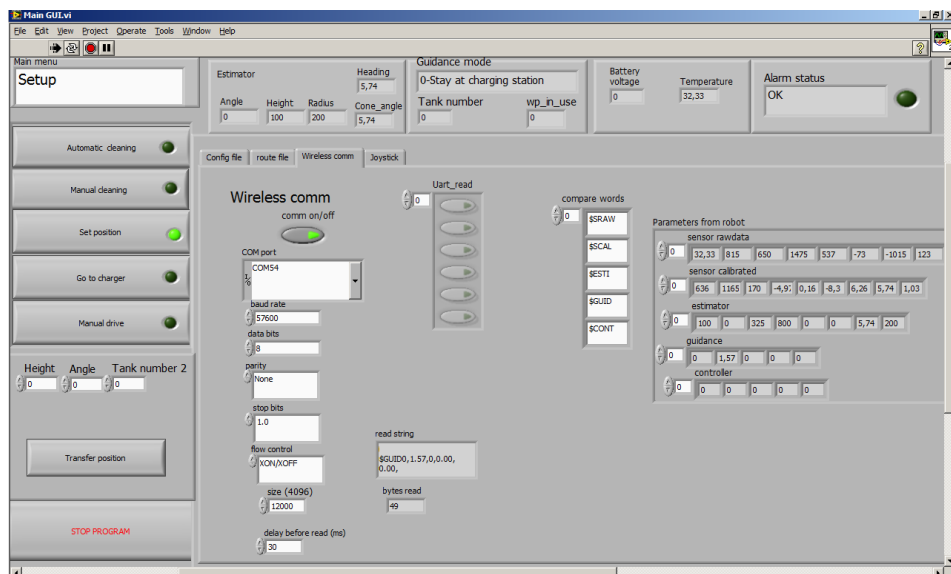


Figur 191: Alarm

Setup

I Setup gjøres alle generelle innstillinger. Dette er blant annet innstillinger for den trådløse kommunikasjonen. For eksempel baudrate og kodeord (Tabell 6) kan spesifiseres.

Andre innstillinger er kommunikasjon med joystick og skrivning til/lesing fra fil. Da de viktigste parametrene kan lagres til fil, muliggjør dette enkelt endring av oppsett. Filbehandlingen er ikke implementert.

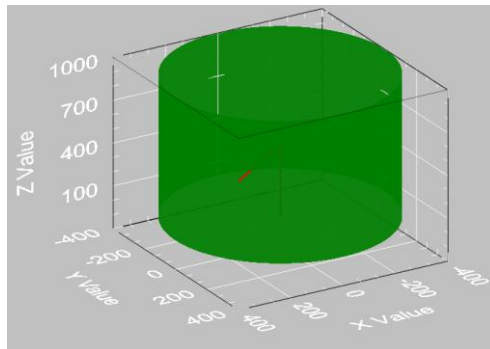


Figur 192: Setup

13.2 Diskusjon

Brukergrensesnittet er under kontinuerlig utvikling, og en del av funksjonene er derfor ikke implementert. Dette gjelder spesielt overføring av parametre fra brukergrensesnittet til robotens EEPROM. Muligheten for å styre flere roboter fra samme grensesnitt er det ikke tatt hensyn til. Dette bør implementeres for å styre begge tankriggene på det aktuelle området.

Det ble utviklet en 3D modell i Labview for visualisering av robotens plassering på tanken. Denne ble ikke tatt i bruk på grunn av programmets økende behov for prosessorkraft. I et forenklet brukergrensesnitt kan en 3D-modell vurderes som et alternativ for visualisering av robotens plassering.



Figur 193: 3D-modell av tank

13.3 Konklusjon

Det grafiske brukergrensesnittet ble utviklet med tanke på visualisering av store mengder data i en utviklingsfase. Ulempen med et avansert program, er at det er for komplekst for den vanlige brukeren i et ferdig produkt. Bruk av dagens program krever en del kjennskap til den tekniske oppbygningen av programvaren. I tillegg vises mange parametre som er unyttige. Utvikling av et forenklet brukergrensesnitt bør derfor gjøres i en videreutviklingsfase.

Det utviklede grafiske brukergrensesnittet har vært til stor nytte underveis i hele prosjektet. Selv om en del funksjonalitet gjenstår i forhold til et ferdig produkt, er dagens versjon et godt utviklingsverktøy.

14 Test av konsept

Underveis i prosjektets utvikling har flere praktiske tester blitt gjennomført på tankriggen. Praktisk testing er nødvendig for å vurdere om konseptet er en løsning på den gitte oppgaven. I dette kapitlet blir de gjennomførte testene forklart. Resultatene av hver test vurderes opp mot den virkelige arbeidsoppgaven. For video av de forskjellige testene, se vedlegg D.

14.1 Tørr tank

De første testene ble gjennomført i en ren, tørr tank. Dette i sammenheng med dimensjonering av magneter. I den tørre tanken er friksjonen på innsiden størst, noe som gir stor motstand mot robotens bevegelse. Testene gav gode resultater, og viser at konseptet med bevegelse er mulig.

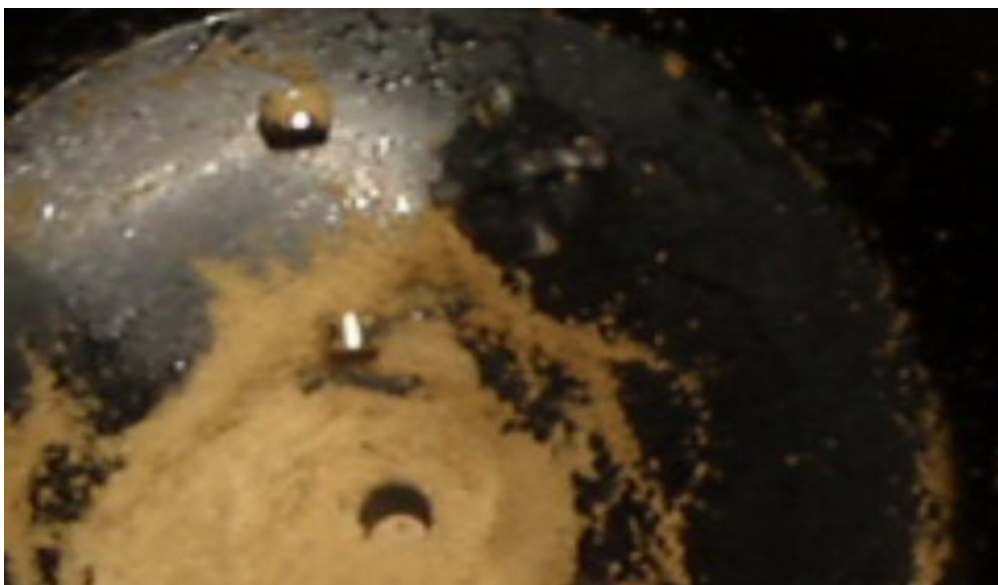
14.2 Sagflis og vann

For å teste den roterende renserens funksjonalitet og effektivitet, ble tankens vegger fuktet med vann og dekt med sagflis. Dette gir god visualisering av robotens bevegelse og renseegenskaper.



Figur 194: Rensing av tankvegg med sagflis og vann

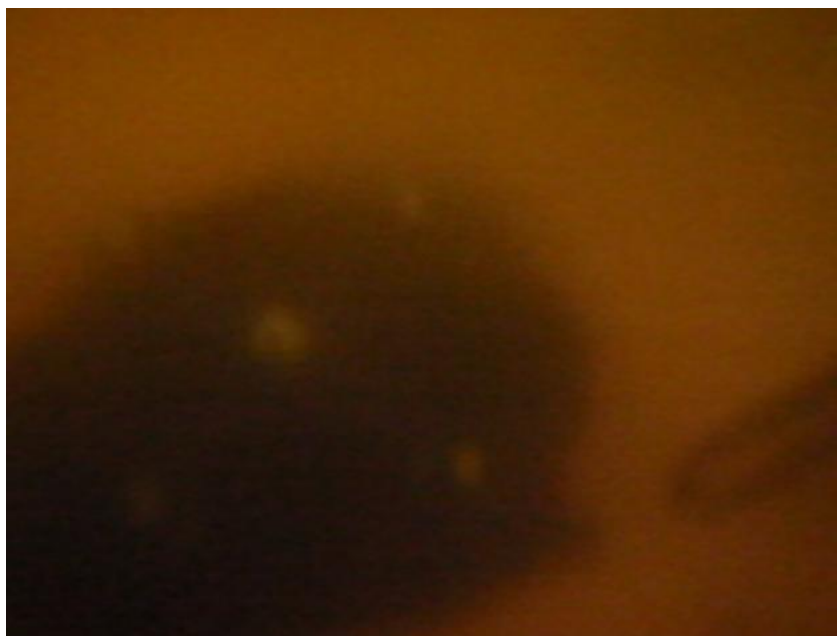
Resultatet viste at konseptet har gode egenskaper med å løsne avfallet fra tankveggen. Gjennom den implementerte ruten, er roboten i stand til å samle avfallet ved senter av tankens bunn.



Figur 195: Rensing av tankbunn med sagflis og vann

14.3 Fylt tank med tørrfor

En test med tanken fylt med vann og tørrfor ble gjennomført. Tørrfor av samme type som benyttes på Qodtech-riggen under forsøk ble benyttet. Målet med denne testen var å undersøke forets egenskaper ved forskjellige renseshastigheter for roboten. En viktig observasjon var om tørrforet løser seg opp i vannet eller om det kan samles opp på bunnen. Testen ble utført etter at foret hadde ligget på bunnen i ett døgn.



Figur 196: Test med tørrfor og vann på tankens bunn

Resultat

Det viste seg at renseren løser foret fra bunnen ganske lett. Foret løser seg opp i vannet selv med lave hastigheter på renseren. Dette viser at en oppsamling av avfallet er vanskelig med dagens rensesystem.

14.4 Alternative konsepter for utviklet teknologi

Det utviklede robotsystemet kan også benyttes til andre oppgaver. Dette er mulige bruksområder basert på egne ideer.

Vask av vinduer

Med hjelp av rensesystemet kan roboten vaske vindusruter i store glassbygninger. Fordelen med konseptet er at begge sider av glasset kan renses i den samme prosessen.

Vask av stålkonstruksjoner

Roboten kan benyttes til å vaske vegger eller andre konstruksjoner av stål. Dersom roboten dimensjoneres riktig, kan den alternativt slippe eller polere den aktuelle overflaten.

Rens av rør

Stålrør kan renses enten utvendig eller innvendig, ved at roboten kjører på rørveggen. Typisk bruksområde kan være rens av ventilasjonsrør, eller feiling av en pipe i et forbrenningsanlegg.

Inspeksjon av rør og stålkonstruksjoner

Dersom roboten utstyres med et kamera, kan den benyttes for inspeksjon av stålkonstruksjoner. Dette kan for eksempel være innvendig i et rør der mennesker ikke kommer til. Hvis roboten lages vanntett kan også dette skje under vann. En kan se for seg inspeksjon av et fundament til en stålkonstruksjon på havets bunn som et forenklet alternativ til en ROV.

Rens av kraftforsilo innvendig

Kraftforsiloer til landbruket er vanligvis av stål. Disse må rengjøres innvendig med jevne mellomrom for å hindre muggdannelse. Arbeidet som i dag gjøres manuelt kan forenkles ved hjelp av en robot.

Rengjøring av skips-skrog

Skrogrengjøring på skip gir besparelser i bunkersforbruk på opptil 5-10 % [47]. Det er ikke uvanlig å se 15-20 % hastighetsreduksjon fra nymalt skip til det må i dokk etter to til tre år [48]. Rens av skrog utgjør store besparelser for et rederi. En annen viktig faktor med rengjøring av skipenes skrog er å begrense spredning av skadelige uønskede arter. Dette skjer i dag både gjennom ballastvann og begroing på skipenes skrog [49].

En kan se for seg en forstørret utgave av roboten som både rens og inspiserer skipets skrog enten automatisk eller ved manuell styring. Til dette kan enten børster eller høytrykkspyler benyttes. Dette kan skje når skipet ligger til kai. Dersom den magnetiske koblingen dimensjoneres riktig kan det også gjennomføres når skipet er i bevegelse. I dag benyttes stort sett dykkere eller ROVER til denne jobben, selv om det finnes robotiserte alternativer.

14.5 Diskusjon

Tester viser at det utviklede konseptet vil løsne forrester fra tankens bunn, ved at det løser seg i vannet. Dette viste seg å være tilfellet også ved lave rotasjonshastigheter. Hvordan avfallet oppfører seg etter lengre tid med en blanding av avføring fra yngelen ble ikke testet.

En mulig løsning for oppsamling er dersom sirkulasjonen av sjøvann i tanken økes under rensing. Dette kan mulig styres automatisk fra brukergrensesnittet gjennom en ekstra magnetventil på vanntilførselen i tanken. På denne måten begrenses vannets forurensning under rensing, og en større del av avfallet vil feste seg på tankens filtre.

Ved testing i vannfylt tank ble lyden i tanken registrert med et undervannskamera med mikrofon. Det viste seg at støyen fra den benyttede rensere var betydelig. Dette bør det tas hensyn til ved valg av materialer mot tankveggen.

Yngelens påvirkning av magnetfeltet ble ikke testet under dette prosjektet. En studie for å finne fiskens påvirkning av magnetfelt ble gjort uten entydig resultat. Dette bør undersøkes nærmere.

14.6 Konklusjon

Tester tyder på at rensesystemet vil fjerne avfallet fra tankens overflate, ved at det løses opp i vannet. Hvordan dette vil påvirke miljøet i tanken har man ikke funnet svar på. En testing av konseptet under forsøk med yngel bør derfor gjennomføres. Resultatet vil vise om utvikling av en oppsamler bør gjøres.

15 Posisjonsnøyaktighet

15.1 Bakgrunn

For å kartlegge systemets egenskaper, ble en test av posisjonsnøyaktigheten gjennomført på tanken. Dette ble gjort sammen med innstilling av viktige parametre for optimalisering av systemets nøyaktighet og respons. I dette kapitlet blir posisjonsnøyaktighetens påvirkning av de forskjellige parametrene vist gjennom plott fra kjøring. Det hele oppsummeres med en beregning av den forventede posisjonsnøyaktigheten.

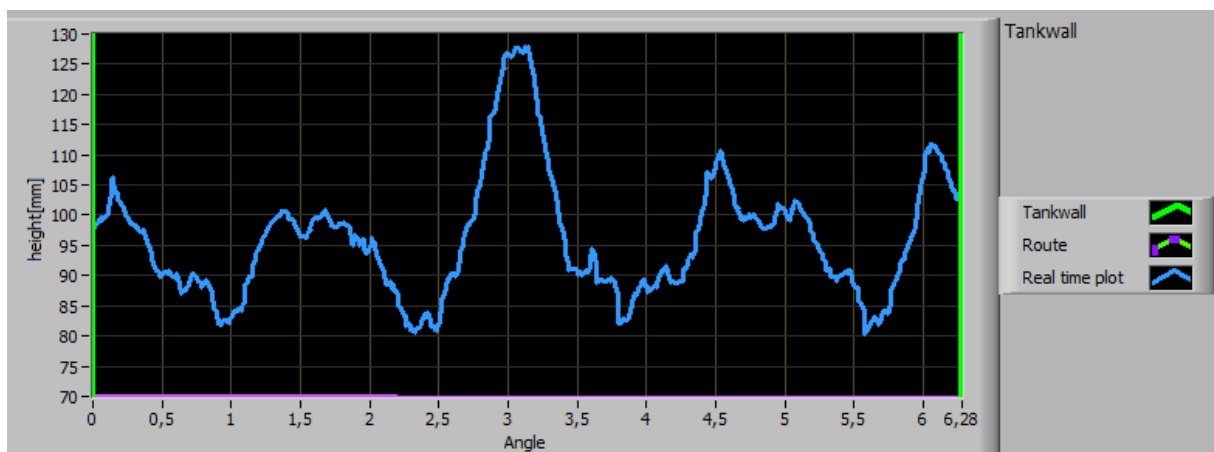
15.2 Høyden

Høyden et mål på robotens posisjonsnøyaktighet på tankveggen. Parameteren *angle*, er i praksis ikke kritisk, da roboten kjører i en spiralform og en oppdatering skjer hver runde. *Angle* kan enkelt optimaliseres ved å endre på den angitte hjuldiameteren.

Test av nøyaktighet i *height* ble gjennomført ved å kjøre roboten i sirkler med en konstant høyde. Et sanntidsplott av estimert *height* for en hel sirkel ble visualisert i brukergrensesnittet. Ved å se på avvik i estimert høyde sammen med avstandssensorenes nøyaktighet, kan man vurdere hele posisjoneringssystemets nøyaktighet. Kontroll av høydeavviket ble også gjort visuelt, ved å fylle tanken med vann til robotens høyde og observere magnethjulenes høyde i vannet under kjøring.

Høyde 10 cm

Innstilling og test ble i første omgang gjennomført ved høyden 10 cm. Det fordi størst avvik forekommer nederst på tanken (kapittel 12.3.3.3). Figur 197 viser høydeestimatet ved kjøring med en grunninnstilling i PI-Controller i HeightEstimator (12.3.4.1). *Lookahead distance* ble satt til 150 mm.

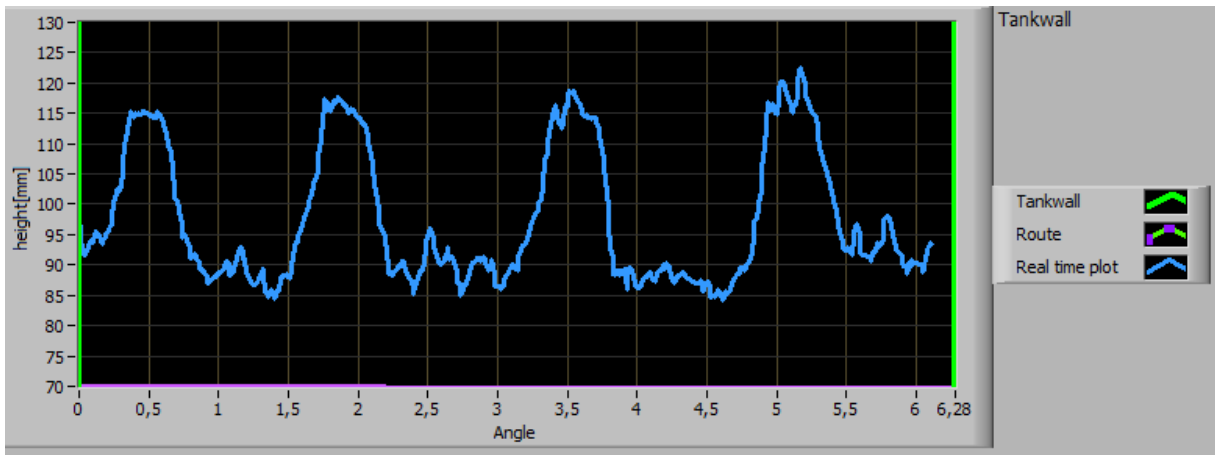


Figur 197: Høydeestimat ved height 100 mm

Figuren viser et maksimalt avvik i *height* på ca 27 mm. Store periodiske svingninger i robotens høyde observeres. I praksis kjører roboten med betydelige utslag i *heading* med disse innstillingene.

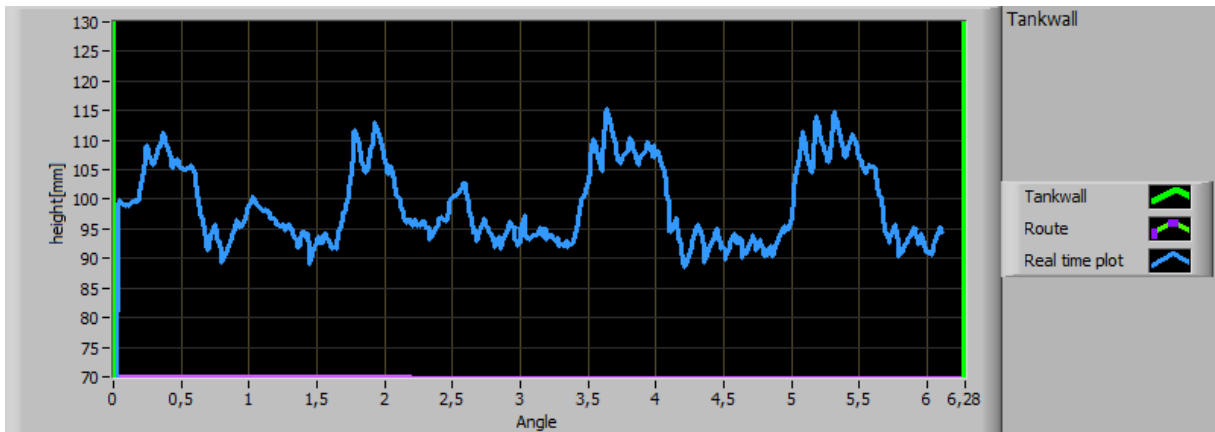
Redusert lookahead distance

For å minke avviket, ble *lookahead distance* redusert til 80 mm. Dette gir en høyere forsterkning i reguleringsløyfen, da større vinkelkorreksjoner foretas. Figur 198 viser resultatet. Det maksimale avviket ble redusert til ca 22 mm. Figuren viser tydelig periodiske svingninger.



Figur 198: Lookahead distance 80 mm

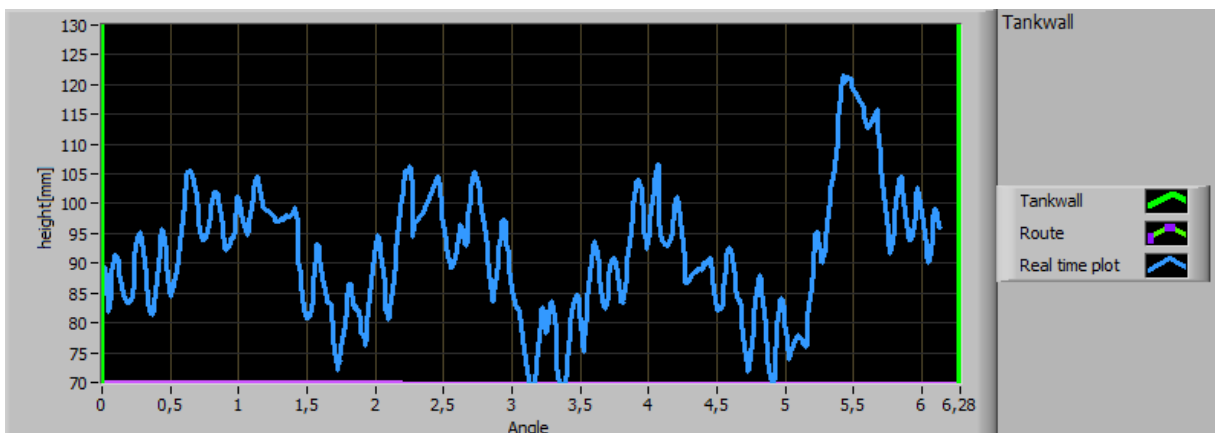
En test med *lookahead distance* halvert til 40mm ble også gjennomført for å bekrefte de observerte egenskapene. Figur 199 viser resultatet, der det maksimale avviket minkes på bekostning av økte uønskede rykninger i *heading*.



Figur 199: Lookahead distance 40 mm

Økt lookahead distance

Tilsvarende ble en økning av *lookahead distance* til 250 mm testet for å se responsen.



Figur 200: Lookahead distance 250 mm

Figur 200 viser et maksimalt avvik på over 30 mm, og større høyfrekvente svingninger. Konklusjonen er at en tuning av PI-controller i HeightEstimator() er nødvendig, da presis posisjonering og rolige bevegelser ikke kan oppnås med de valgte innstillingene. Av de gjennomførte målingene ble *lookahead distance* på 150 mm videreført med tanke på rolig oppførsel.

Økt gain

Under de foregående testene var PI-Controllerens parametre satt til:

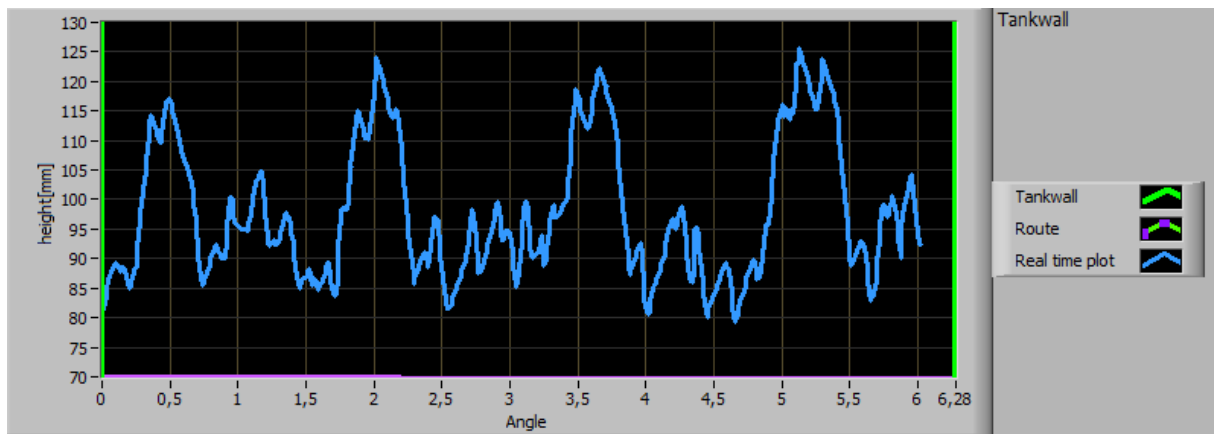
P_HEIGHT_CORRECTION 0.05
I_HEIGHT_CORRECTION 0.01

I praksis er det integraldelen som bidrar til korleksjon under kjøring. Proporsjonalforsterkningens hensikt er å senke innstillingstiden ved oppstart, da avviket er størst.

En test med økning av integralforsterkningen i Controller ble gjort til verdiene:

P_HEIGHT_CORRECTION 0.05
I_HEIGHT_CORRECTION 0.1

Figur 201 viser en mer rykkvis oppførsel og større ustabilitet enn før (Figur 197). Dette tyder på at forsterkningen bør senkes, slik at avstandsmålerens påvirkning reduseres. På den måten reduseres påvirkningen fra avstandsmålerens høyfrekvente støy.



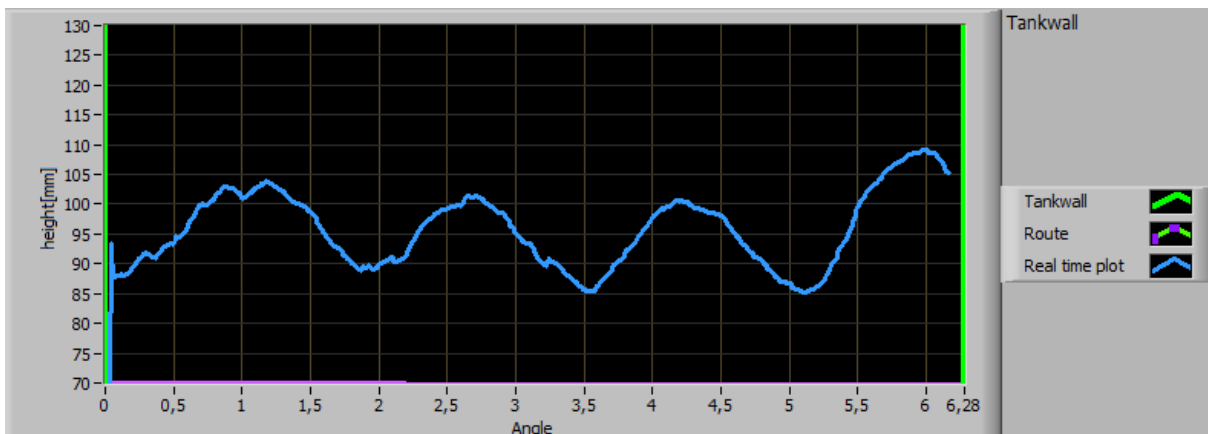
Figur 201: Økt gain i HeightEstimator()

Redusert gain

Forsterkningen ble redusert til følgende verdier:

P_HEIGHT_CORRECTION 0.02
I_HEIGHT_CORRECTION 0.005

Figur 202 viser en stor forbering med rolig respons og mindre avvik. Maksimalt avvik er redusert til ca 15 mm.

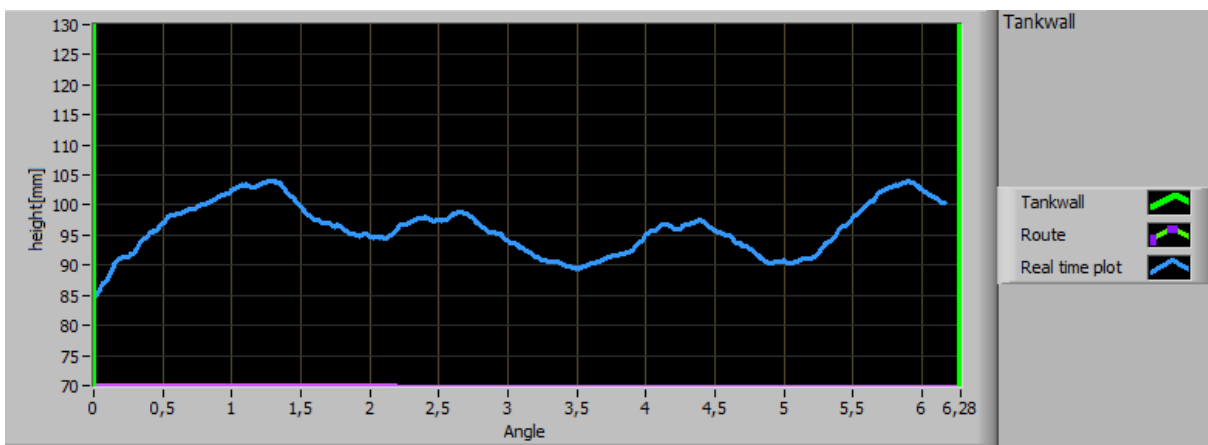


Figur 202: Redusert gain i HeightEstimator()

Gain ble senket ytterligere for å se påvirkningen. Følgende verdier ble satt:

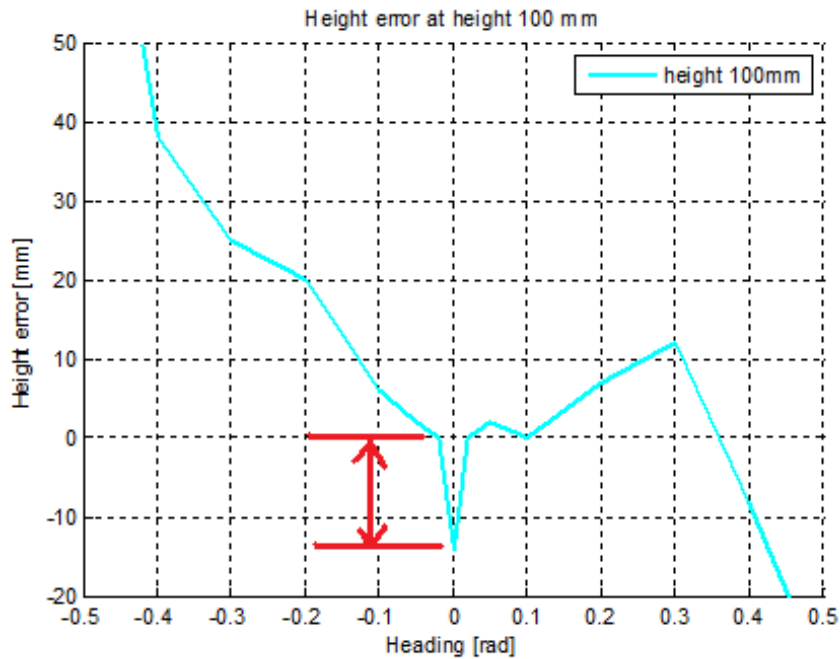
P_HEIGHT_CORRECTION 0.01
I_HEIGHT_CORRECTION 0.003

Figur 203 viser en forbedret respons med et maksimalt avvik på kun 10 mm. Dette ser meget bra ut.



Figur 203: Ytterligere redusert gain i HeightEstimator()

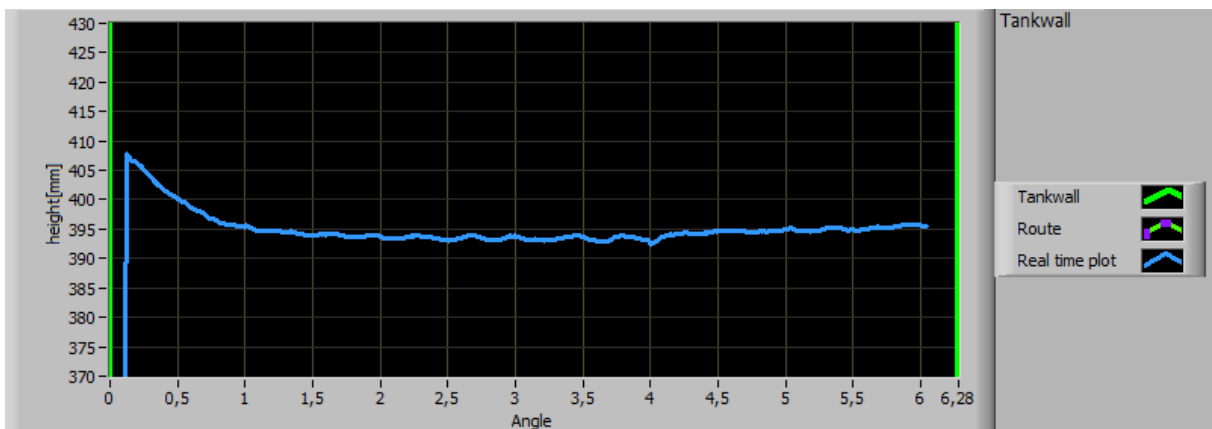
Dersom forsterkningen senkes for mye, oppnås et stabilt estimat på bekostning av avvik i forhold til den virkelige høyden. Dette er ikke ønskelig. De periodiske svingningene ved høyden 10 cm kommer trolig av en unøyaktighet i høydeestimatets funksjon av *headingen*. Figur 204 viser problemet bedre, der en høydeforskjell på opptil 13 mm er forventet ved kun små endringer i *heading* (kapittel 12.3.4.1). I praksis betyr dette at små periodiske svingninger må aksepteres ved denne høyden. Rolige avvik på maksimalt 10 mm er akseptabelt i denne sammenhengen.



Figur 204: Unøyaktighet i høydeestimatets funksjon av headingen

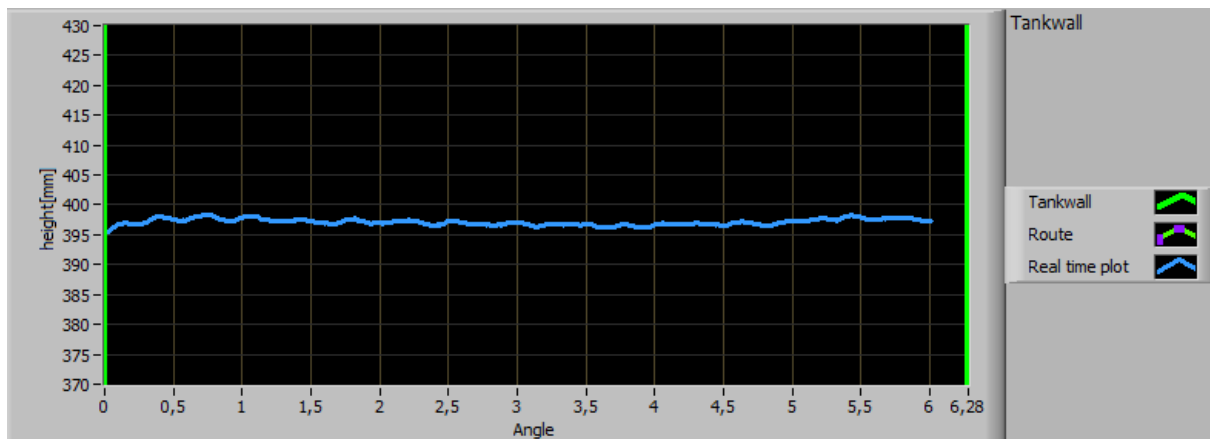
Høyde 40 cm

For å finne posisjonsnøyaktigheten ved toppen av tanken, ble den samme testen gjennomført for høyden 40 cm. Figur 205 viser et maksimalt avvik på ca 7 mm etter at roboten har stilt seg inn. Vi observerer et konstant avvik på ca 6 mm. Dette kommer av en biasfeil i estimert heading (kapittel 15.4).



Figur 205: Test ved height 400 mm

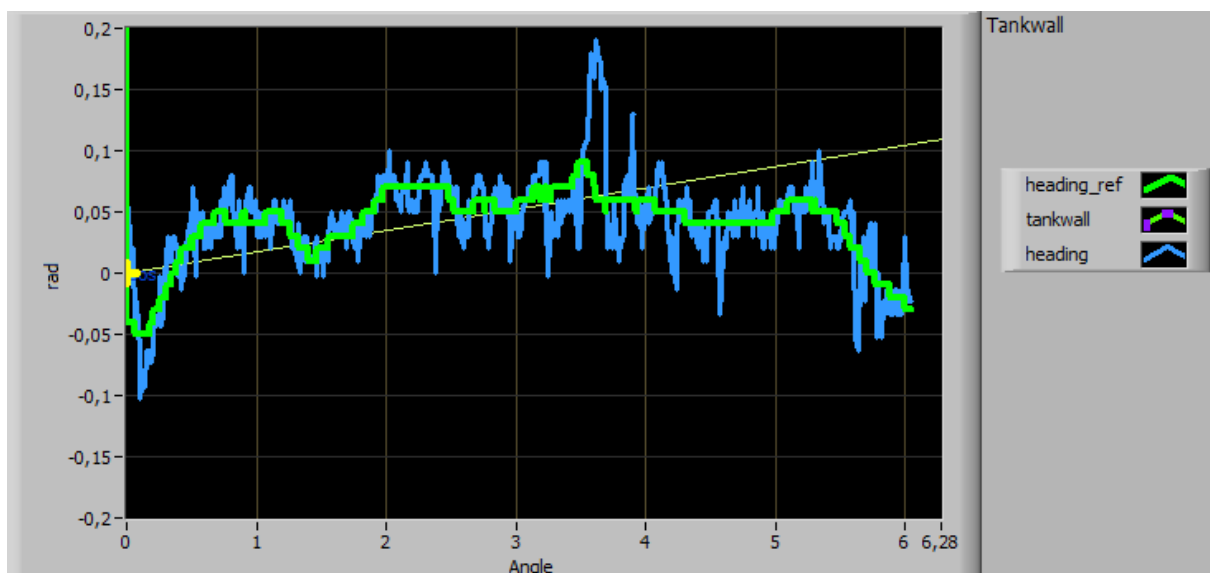
For å bekrefte denne observasjonen, ble *lookahead distance* senket til 80 mm. Figur 206 bekrefter at høydefeilen kommer fra feil i akselerometeret, ettersom avviket i *height* blir senket fra ca 6 mm til ca 4 mm. En begrunnelse og løsning på dette gis i kapittel 15.4.



Figur 206: Kontroll av konstant avvik med lookahead distance senket

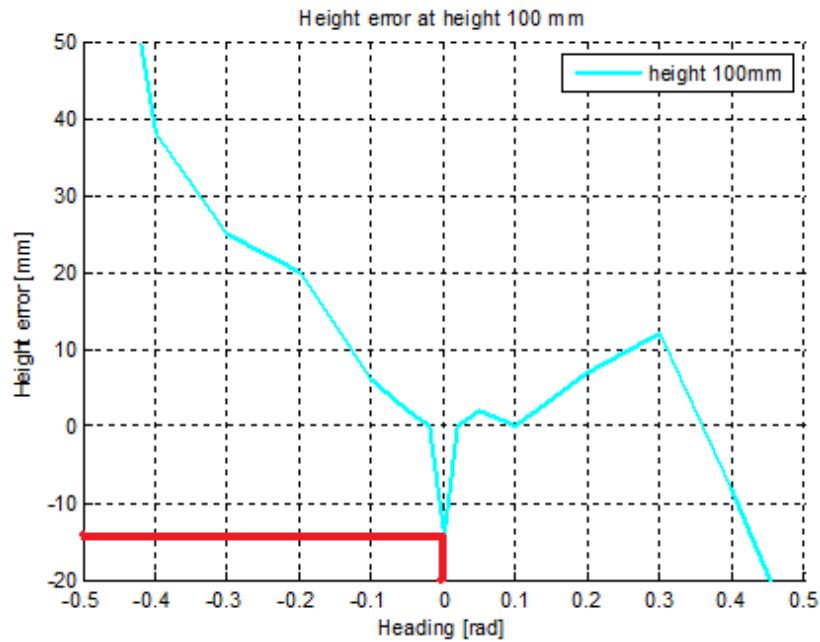
15.3 Nøyaktighet

For å vurdere nøyaktigheten for posisjoneringssystemet på tankveggen, kan en analyse av data ved høyden 10 cm gjøres, der avvikene er størst. Figur 203 viser det estimatet for høyden. Et plott av aktuell heading under den aktuelle kjøringen er vist på Figur 207.



Figur 207: Aktuell heading under kjøring ved høyden 10 cm

Vi ser at utslaget i heading er normalt 0,1 rad under kjøring. Den største peaken ved angle 3,6 rad er utelatt, da denne er ekstraordinær på grunn av avvik på tanken. Ved å se på aktuell heading opp mot avstandssensorens nøyaktighet som vist på Figur 208 (hentet fra Figur 144), kan en total nøyaktighet beregnes. Det største avviket i avstandsmåleren er ca 13 mm for aktuelt område $\pm 0,1$ rad, og forekommer ved $heading=0$ (Figur 208, rød strek).



Figur 208: Avstandssensorens nøyaktighet ved height 100mm

Det maksimale avviket i *height*-estimatet er 10 mm (Figur 203). Da odometriens feil reguleres bort på grunnlag av avstandsmålerne, kan maksimalt avvik tilnærmes summen av feilbidragene fra avstandsmåleren og høydeestimatet:

$$\text{max error} = \text{error height estimate} + \text{error IR hight estimate} \quad (15.1)$$

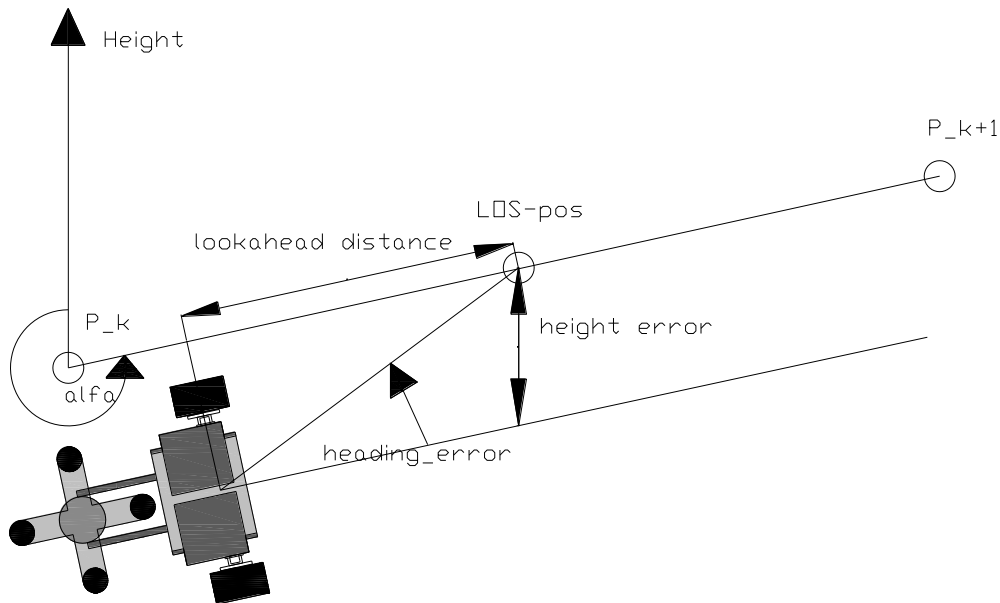
$$\text{max error} = 10\text{mm} + 13\text{mm} = 23\text{mm} \quad (15.2)$$

error height estimate: Største avvik i målt høydeestimat
error IR hight estimate: Største avvik i estimat fra avstandssensorer

Beregningene viser at det maksimale posisjonsavviket på tanken er ca 2,3 cm ved tankveggen nedre kant. Dette er innenfor kravet på 3 cm. Høyere opp på tanken er avviket betydelig mindre. Avvik på grunn av temperaturendringer er det ikke tatt hensyn til i disse beregningene. Det forventes at en god temperaturkalibrering blir gjennomført.

15.4 Akselerometerets påvirkning

Sammenhengen mellom *bias* i akselerometeret (*heading error*) og bias i høyde (*height error*) kan enkelt vises med en figur:



Figur 209: Sammenheng mellom akselerometerets feil og høydefeil

$$height\ error = -lookahead\ distance * \tan(heading\ error) * \sin(alfa) \quad (15.3)$$

Feil i *heading* gitt av bias ved høyden 40 cm(Figur 205) kan da beregnes ved å snu på formel 15.3:

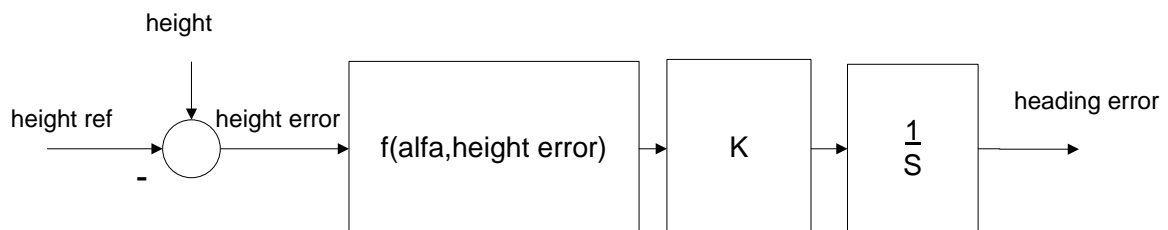
$$heading\ error = -atan\left(\frac{height\ error}{lookahead\ distance * \sin(alfa)}\right) = -atan\left(\frac{6mm}{150mm * \sin\left(\frac{3 * \pi}{2}\right)}\right) \quad (15.4)$$

$$heading\ error = 0,040\ rad = 2,3^\circ$$

Vi ser at avviket i heading er 2,3 °. Dette bør kalibreres bort i programvaren.

Integralvirkning

For å fjerne det konstante høydeavviket, kan en integralvirkning implementeres i Guidance-systemet. Basert på den viste sammenhengen mellom *heading error*, *height error*, *lookahead distance* og *alfa*, kan *heading error* estimeres kontinuerlig under kjøring. Figur 210 viser en on-line parameter Estimator for *heading error*.



Figur 210: Estimator for heading error

$$height\ ref = y_k + s(t) * \cos(alfa) \quad (15.5)$$

$$height\ error = height - height\ ref \quad (15.6)$$

$$f(alfa, height\ error) = \text{atan}\left(\frac{height\ error}{lookahead\ distance * \sin(alfa)}\right) \quad (15.7)$$

$$heading\ error = \int K * f \quad (15.8)$$

$s(t)$:	<i>Along – track error</i>
$height_ref$:	<i>Desired height</i>
$heading\ error$:	<i>Estimated heading error</i>
$height_error$:	<i>Height error</i>
y_k :	<i>Height at waypoint kx_{k+1}:</i>
K :	<i>Integral gain</i>
$alfa$:	<i>Angle between y – axis and line between waypoints</i>
$lookahead\ distance$:	<i>Distance to LOS – position along the line between waypoints</i>

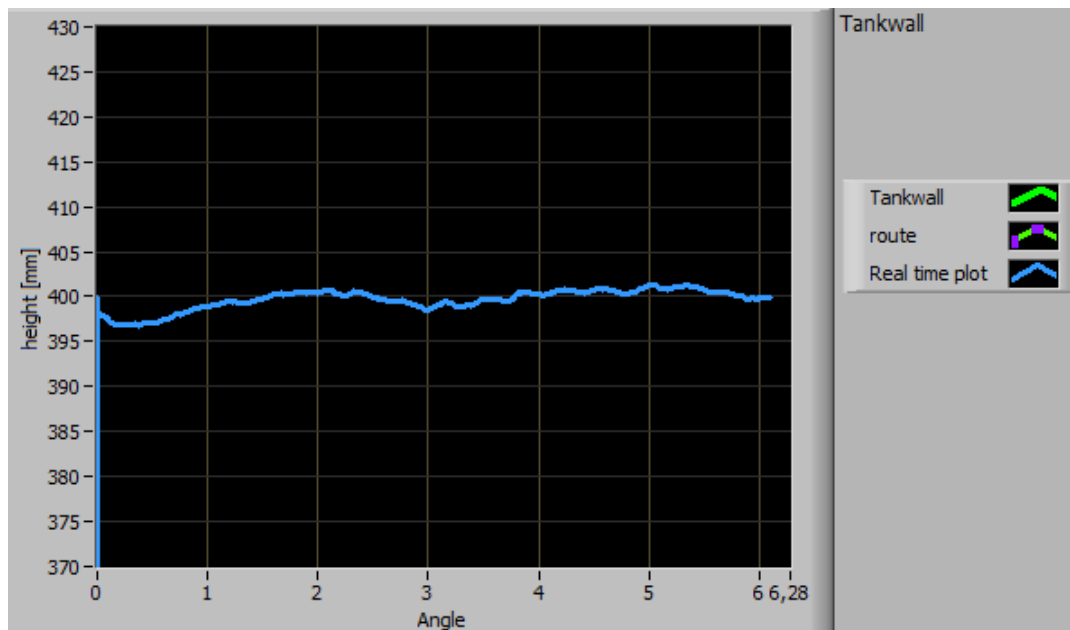
Da *height error* ikke er observerbar når roboten kjører vertikalt ($alfa=heading=0$ eller $alfa=heading=\pi$), benyttes logikk for å slå av eller på integralvirkningen ved gitte vinkler *alfa* og *heading*. Integralvirkningen benyttes kun ved kjøring horisontalt på tankveggen. Dette er i praksis under hele rensingen av tankveggen.

Adaptiv gain K justeres for å gi et rolig innsvingningsforløp i *heading error*. Dermed minimeres uønsket støy, på bekostning av noe tregere innstillingstid. Den estimerte *heading error* brukes som en korleksjon til HeadingEstimator():

$$heading = pitch - heading\ error \quad (15.9)$$

Resultat

Figur 211 viser kjøring med integralvirkningen ved høyden 40 cm. Det konstante avviket som før var på ca 6 mm (Figur 205) er nå borte. Løsningen fungerer dermed godt. Gjennom en integralvirkning i Guidance() med en tilbakekobling til HeadingEstimator(), fjernes biasfeil i både *heading* og *height*. I praksis vil dette bidra til å forbedre den kalkulerte posisjonsnøyaktigheten betydelig.



Figur 211: Integralvirkning på avviket

15.5 Diskusjon

Ideelt sett burde systemets nøyaktighet blitt testet med en ekstern avstandssensor med en høyere nøyaktighet. Av praktiske og økonomiske hensyn var ikke dette mulig. De gjennomførte beregningene sammen med en visuell kontroll av resultatene bekrefter at den oppnådde posisjonsnøyaktigheten er god nok.

Målinger av posisjonsnøyaktighet på tankens bunn ble ikke gjennomført. Det er forventet at en like god nøyaktighet som på tankveggen er oppnåelig på tankbunnen. Dette begrunnes med at avstandsmålerens område her er mindre.

Nøyaktighet til aktuell linjefølgingsalgoritme ble ikke testet under prosjektet. Det forventes at et avvik på mindre enn 5 mm kan oppnås ved linjefølgning.

15.6 Konklusjon:

Det maksimale avviket i høyde er 2 cm. Vi kan konkludere med at ønsket posisjonsnøyaktighet på tankveggen er oppnådd.

16 Konklusjon

Gjennom denne oppgaven er det utviklet et nytt konsept og en fungerende prototype for et automatisk tankrensesystem. Underveis i prosjektet har det blitt realisert egne løsninger for både mekanikk, elektronikk og programvare. Flere viktige mekaniske løsninger har blitt utviklet gjennom planlegging, skissering og praktisk testing. En av de største utfordringene var å oppnå riktig forhold mellom friksjon og masse slik at roboten både kan bevege på seg og henge fast på tanken. Ved bruk av permanentmagneter har dette latt seg løse. Med smarte løsninger og riktig dimensjonering av krefter, er det utviklet en farkost som kan bevege seg mellom tankens bunn og tankens vegger uten problemer.

En mekanisk utfordring var å finne en metode for å løsne avfallet fra den begrodde tanken. Dette ble løst med en roterende rensepute drevet av et roterende magnetfelt gjennom tankveggen. Metoden gir stor fleksibilitet, da renseputen på tankens innside enkelt kan tas av for desinfeksjon eller byttes til en annen dersom behovet for trykk mot tankveggen endres. En liten rensepute med lav rotasjonshastighet sikrer lite bevegelse i tanken, og dermed lite forstyrrelser for yngelen. Tester gjennomført i en tank med vann og tørrfor viser at avfallet løsner fra tankens overflate og løser seg i vannet under renseprosessen. Hvordan dette vil påvirke miljøet i tanken ble ikke studert. Gjennom en god sirkulasjon av vannet i tanken under rensing, vil det trolig være mulig å samle opp avfallet ved hjelp av tankens eksisterende filtre. Med økt sirkulasjon i tanken, reduseres avfallsstoffenes påvirkning av tankmiljøet. Det foreslås at dette blir testet i praksis.

Et konsept for utnyttelse av en enkelt robot for automatisert rens av flere tanker har blitt utviklet. Løsningen er et egenutviklet brosystem som roboten kjører på for bevegelse mellom alle tankene på en tankrigg. Brosystemet ble utviklet og testet på en enkelt tank, uten bruk av ekstra elektronikk, sensorer eller avansert mekanikk. Ved at renseutstyret holdes separat for hver tank, er man sikret mot smitte mellom tankene. Et krav for at robotsystemet skal fungere i daglig drift, er at roboten finner tilbake til ladestasjonen. Dette løses ved at ladestasjonen plasseres på brosystemet. Løsningen gjør oppladningen enkel og sikker. Brosystemet med ladestasjoner er planlagt, men ikke konstruert og testet i full skala. Testresultatene viser at konseptet kan videreutvikles til et automatisk tankrensesystem for en hel tankrigg.

Ønsket om at rensesystemet skal kunne installeres enkelt på tankriggen har blitt løst ved å utvikle et grafisk brukergrensesnitt til PC. Med trådløs dataoverføring til roboten kan man enkelt overføre det som trengs ved installasjonen. Under normal drift benyttes brukergrensesnittet for valg av ønsket tidspunkt for rens av spesifikke tanker. Operatøren kan også overvåke robotens posisjon og status.

Valg av sensorer på roboten har blitt gjort på grunnlag av flere kriterier. Det er vektlagt tilstrekkelig ytelse og lav kostnad. Gjennom kalibreringsrutiner og gjennomførte målinger har sensorenes nøyaktighet blitt verifisert mot ønskede egenskaper. Den valgte løsningen har god presisjon, liten fysisk utforming, stor fleksibilitet og en lav pris. En forenklet sensorløsning basert på kun et optisk linjefølgingsystem ble også vurdert. Ulempen med dette er at fleksibilitet i form av endrede kjøreruter ikke er tilstedet. Systemet er da også mer sårbart for skader på linjene. Med den valgte løsningen er en dobbel sikkerhet oppnådd gjennom både avstandsmåling og optisk linjefølgingsystem.

I løpet av prosjektet er det utviklet fungerende elektronikk. På dagens prototype er elektronikken basert på enkle utleggskort sammenkoblet med ledninger. Et design bestående av to kretskort er

planlagt med tanke på stor fleksibilitet for fremtidig bruk. Elektronikken ble testet kontinuerlig underveis i prosjektet. Resultatet viser at valgte løsninger er riktig dimensjonerte.

Et posisjonerings- og navigasjonssystem basert på koordinatsystemer, waypoints og en målfølgingsalgoritme er utviklet. Testkjøring med systemet har gitt gode resultater. En posisjonsnøyaktighet på ca 2 cm er oppnådd ved kjøring på tankveggen. Dette er tilstrekkelig nøyaktighet for praktisk bruk. På tankbunnen ble ikke nøyaktigheten testet, men den forventes å være like god. Sanntidsplott fra kjøring på tanken viser at den utviklede programvaren på roboten fungerer tilfredstillende.

Korrosjonsbestandighet og robusthet løses ved å benytte plastmateriale eller gummi på alle ytre deler. Dette er det viktig å ta hensyn til, da miljøet på tankkriegen er korrosivt på grunn av saltvannet. For brosystemets ferromagnetiske deler er galvanisering og lakkering en god løsning. Dette gir også et pent utseende.

Målet med oppgaven var å utvikle et fungerende konsept og en tilstrekkelig utviklet prototype for det valgte renskonseptet. Den utviklede prototypen har ikke de mekaniske egenskapene som trengs for å sikre stabilitet og robusthet i et ferdig produkt. Dette kommer i hovedsak av valg av materialer og den fysiske innkapslingen. Enkelte planlagte løsninger er ikke blitt implementert på grunn av begrensede ressurser. Det er derfor planlagt utvikling av en forbedret prototype i prosjektets neste fase. Dette innebærer blant annet oppgradering av motorene og en tett innkapsling av elektronikken. Selv om den fungerende prototypen ikke er ferdigstilt for daglig drift, er et godt grunnlag for et fungerende konsept og en produksjonsmodell er lagt. Ved å se på de valgte løsninger og oppnådd funksjonalitet mot den gitte oppgaven, kan det konkluderes med at de største utfordringene i oppgaven er løst.

17 Videre arbeid

Det finnes en rekke punkter det bør jobbes videre med i en videreutviklingsfase for prosjektet. Dette er utbedringer innen både programvare, elektronikk og mekanikk. Mange punkter må testes på veien mot et stabilt produkt. Det vil sannsynligvis også oppstå flere behov underveis. Følgende punkter bør det legges vekt på under videreutvikling av systemet:

Motorer

Motorene på dagens prototype er lite egnet til den saktegående roboten. En oppgradering til kraftigere motorer med lagere hastighet er derfor viktig.

Enkodere

Enkodere med høyere oppløsning er ønskelig. Da kan kvadraturtelleren benyttes til hastighetsberegning i stedet for dagens løsning. Denne oppgraderingen bør gjøres i sammenheng med oppgraderinger av motorene, da enkodere innebygd i motorene er den beste løsningen.

Innkapsling

Det er ønskelig at roboten er innkapslet, da det er nødvendig at den tåler de fuktige og korrosive omgivelsene i et oppdrettsmiljø.

Kretskortutlegg

I en neste prototype av roboten bør kretskort for mikrokontroller, motorstyringer og annen elektronikk designes. Dette er nødvendig for å minske robotens fysiske utforming og øke robustheten. Det er ønskelig at robotens høyde krympes noe i forhold til dagens versjon.

Mekaniske forbedringer

I første omgang er typisk valg av slitesterke dekk og optimalisering av roboten i forhold til vekt og fremkommelighet en oppgave. Også valg av materialer i renseputen bør det ses nærmere på. Etter lang tids bruk vil vi se hva robotsystemets svakeste punkter er. Ved å studere på korrosjon og mekanisk slitasje over tid, ser man mekaniske forbedringspotensialer i designet.

Oppsamler for avfallet

Det bør vurderes utvikling av et konsept for en oppsamler til rensesystemet. Ved å benytte et filtersystem i forbindelse med den roterende rensen, bør det være mulig å samle opp avfallet. Et studie av dette bør gjennomføres.

Plassering av sensorer

Avstandssensorene bør plasseres mot midten av roboten på neste design, på grunn av minimum måleavstand. Problemet er forklart i kapittel 8.5.3.

Batteri

Roboten må være utstyrt med batteri som energikilde. Dette må legges inn i det nye designet.

Videreutvikling av programvare på robot

En del utbedringer og implementasjon av planlagte løsninger bør gjøres. Dette gjelder både Controller(), Estimator() og bruk av mikrokontrollerens EEPROM. Løsningene er forklart i hver del i kapittel 12.

Lavt energiforbruk

En rekke utbedringer bør gjøres for å gjøre roboten energigjerrig. Dette gjelder både hardware og software. Typiske tiltak i programvaren er at aktuelle sensorer kun slås på ved behov og i korte tidsrom. Mekanisk er forbedringspotensialet størst i forhold til å holde friksjonskreftene så lave som mulig.

Videreutvikling av brukergrensesnittet

En del utbedringer bør gjøres på det utviklede grafiske brukergrensesnittet. Dette gjelder spesielt tidsplanlegging av rensruter og alarmfunksjoner. Det bør legges vekt på å utvikle et forenklet brukergrensesnitt som det er enkelt å styre for en operatør uten teknisk forkunnskap. Grensesnittet bør utvides med mulighet for å styre flere roboter.

Bibliografi

1. **Houxiang Zhang, Jianwei Zhang, Rong Liu, WeiWang, and Guanghua Zong.** *Pneumatic Climbing Robots*. s.l. : TAMS, Department of Informatics, University of Hamburg, Germany; Robotics.
2. **www.aquaenergy.com.** robot_climber. www.aquaenergy.com/literature/.../robot_climber.pdf. [Internett] www.aquaenergy.com.
3. **www.megapoolandspa.com.**
http://site.megapoolandspa.com/images/cleaners/NE3855_Scrubbing.jpg.
www.megapoolandspa.com. [Internett] Mega Pool & Spa, 2011.
4. **robots, Kuka.** http://www.kuka-robotics.com/en/products/industrial_robots/low/kr16_l6_2/start.htm. www.kuka-robotics.com. [Internett] kuka robotics, 2011.
5. 5.0 Permanent Magnet Stability. [magnetsales.com](http://www.magnetsales.com). [Internett] magnetsales.com, 2000. [Sisert: 23 mai 2011.] http://www.magnetsales.com/Design/DesignG_frames/DesignG_2.htm.
6. Design Guide. www.magnetsales.com. [Internett] Magnet Sales & Manufacturing Inc, 2000. [Sisert: 20 mai 2011.] <http://www.magnetsales.com/Design/DesignG.htm>.
7. **University of California, Berkeley.** Lecture Module 3.
<http://www.me.berkeley.edu/ME229/F05/EMlec03.pdf>. [Internett] 2011. [Sisert: 23 mai 2011.]
www.me.berkeley.edu/ME229/F05/EMlec03.pdf.
8. Magnet Materials - Overview. [Internett] Integrated magnetics, 2011. [Sisert: 23 mai 2011.]
http://www.intemag.com/magnet_materials.html.
9. **Clasohlson.** Neodym-magnet med krok. $\varnothing 40mm$. [Internett] Clasohlson, 2011. [Sisert: 13 2011.]
<http://www.clasohlson.no/Product/Product.aspx?id=162477815>.
10. **clasohlson.** Neodym-magnet. $32mm$. [Internett] Clasohlson, 2011. [Sisert: 13 2011.]
<http://www.clasohlson.no/Product/Product.aspx?id=160441719>.
11. **Wikipedia.** Magnet. [Internett] Wikipedia, 17 mai 2011. [Sisert: 23 mai 2011.]
<http://en.wikipedia.org/wiki/Magnet>.
12. **Australian Magnetic Solutions.** The on-line magnetic calculator from Australian Magnetic Solutions generates graphs of magnetic flux density (induction). *Flux Density Formulae*. [Internett] International Magnetic Solutions PTY LTD, 03 06 2010. [Sisert: 24 05 2011.]
<http://www.magneticsolutions.com.au/magnet-formula.html#sh>.
13. **Olav Egeland, Jan Tommy Gravdahl.** *Modeling and simulation for automatic control*. Trondheim : NTNU, 2003. 82-92356-01-0.
14. **Persson, B.N.J.** *Sliding friction*. Jilich, Germany : Institut fiir Festkiirpeflorschung, 1999.
15. *Rubber friction on wet and dry road surfaces: The sealing effect.* **B. N. J. Persson, U. Tartaglino, O. Albohr and E. Tosatti.** PHYSICAL REVIEW B 71, Jülich, Germany : B. N. J. Persson,1 U. Tartaglino,1,2,3 O. Albohr,4 and E. Tosatti2,3,5, 2005, Vol. 2005.

16. **Wikipedia**. Friction. [Internett] Wikipedia, 18 mai 2011. [Sitert: 20 mai 2011.] <http://en.wikipedia.org/wiki/Friction>.
17. **Remote Control Hobby Toy - Online Store** . RCS M4315 Metal Gear High Torque Standard Servo. [Internett] Remote Control Hobby Toy - Online Store , 2011. [Sitert: 10 6 2011.] <http://www.hobbyhot.com/rcs-m4315-metal-gear-high-torque-standard-servo-pr-2471.html>.
18. **Fossen, Thor I.** *Guidance and Control of Marine Craft*. Trondheim : Norwegian University of Science and Technology, 2010.
19. **Bourns pro audio**. EN - Rotary Optical Encoder. *Bourns ENJ1*. [Internett] 2 2011. [Sitert: 15 6 2011.] <http://www.bourns.com/pdfs/enc1j.pdf>.
20. Accelerometer product family spesification. *Sparkfun electronics*. [Internett] 2006. [Sitert: 31 mai 2011.] <http://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Accelerometer/SCA3000-Manual.pdf>. Doc.Nr. 8257300A.06.
21. **technologies, VTI**. SCA3000 Series datasheet. *SCA3000-DO1 3-AXIS LOW POWER ACCELEROMETER*. [Internett] 2001. [Sitert: 31 mai 2011.] http://www.vti.fi/en/support/obsolete_products/sca3000_series/. Doc. Nr. 8255700B.01.
22. **Analog Devices**. Using an Accelerometer for inclination sensing. *Application note AN-1057*. [Internett] 2010. [Sitert: 10 3 2011.] http://www.analog.com/static/imported-files/application_notes/AN-1057.pdf. AN08767-0-2/10(0).
23. **Acroname Robotics**. Sharp IR Rangers Information. *Acroname Robotics*. [Internett] Acroname, Inc., Boulder, Colorado, 06 03 2011. [Sitert: 2 6 2011.] <http://www.acroname.com/robotics/info/articles/sharp/sharp.html>.
24. **Sharp**. General purpose type distance measuring sensors. *Infrared Sensor Sharp GP2Y0A21*. [Internett] [Sitert: 2 6 2011.] <http://inmotion.pt/documentation/datasheets/components/GP2Y0A21YK.pdf>.
25. **M. Zafri Baharuddin¹, Izham Z. Abidin¹, S. Sulaiman Kaja Mohideen¹, Yap Keem Siah¹, Jeffrey Tan Too Chuan²**. Analysis of Line Sensor Configuration for the Advanced Line Follower Robot. [Internett] [Sitert: 1 6 2011.] http://www.robot.t.u-tokyo.ac.jp/members/jeffrey/files/SCORED_2005_ALF.pdf.
26. **Fairchild semiconductor**. QRE1113 Line Sensor Breakout - Analog. [Internett] 1 9 2009. [Sitert: 3 6 2011.] <http://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/QRE1113.GR.pdf>.
27. **Wikipedia**. Lithium-ion polymer battery. [Internett] Wikimedia Foundation, Inc., 22 5 2011. [Sitert: 4 6 2011.] http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion_polymer_battery.
28. **Fetisch**. Li-Ion Polymer Battery Testing. [Internett] Fetisch. [Sitert: 6 4 2011.] <http://www.feretich.com/rocketry/Resources/lipotests.html>.
29. **slkelectronics**. Lithium Polymer Cells . [Internett] slkelectronics, 2011. [Sitert: 4 6 2011.] <http://www.slkelectronics.com/ecalc/lithium.htm>.

30. **Wikipedia.** ISM band. [Internett] Wikimedia Foundation, 4 4 2011. [Sisert: 4 6 2011.] http://en.wikipedia.org/wiki/ISM_band.
31. **Bluetooth.** Low Energy. [Internett] Bluetooth, 2011. [Sisert: 1 6 2011.] <http://www.bluetooth.com/Pages/Low-Energy.aspx>.
32. **ZigBee alliance.** ZigBee Technology. [Internett] ZigBee alliance, 2011. [Sisert: 6 6 2011.] <http://www.zigbee.org/About/AboutTechnology/ZigBeeTechnology.aspx>.
33. **Braa, Nilsson.** *Konstruksjon og realisering av feierobot*. Trondheim : NTNU, 2010.
34. **NXP.** PMEG3050EP. *5 A low VF MEGA Schottky barrier rectifier*. [Internett] 10 12 2009. [Sisert: 14 6 2011.] http://www.nxp.com/documents/data_sheet/PMEG3050EP.pdf.
35. **ST microelectronics.** DUAL FULL-BRIDGE DRIVER. *DUAL FULL-BRIDGE DRIVER*. [Internett] 2000. [Sisert: 14 6 2011.] http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/DATASHEET/CD00000240.pdf.
36. **Texas Instruments.** Burr Brown. [Internett] [Sisert: 16 12 2010.] <http://www.farnell.com/datasheets/80143.pdf>.
37. **Atmel.** Atmel AVR. [Internett] [Sisert: 16 12 2010.] http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc8077.pdf.
38. **Traco electronic.** Traco power. *DC/DC converters*. [Internett] 6 2009. [Sisert: 15 6 2011.] <http://www.farnell.com/datasheets/574984.pdf>.
39. **Texas instruments.** 150-mA LOW-NOISE LOW-DROPOUT REGULATOR WITH SHUTDOWN. *LP2985*. [Internett] 7 2004. [Sisert: 14 6 2011.] <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/lp2985.pdf>. SLVS522N.
40. —. TPS79901. *200mA, Low Quiescent Current, Ultra-Low Noise, High PSRR*. [Internett] 1 2005. [Sisert: 14 6 2011.] <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/tps79901.pdf>. SBVS056J.
41. **Texas Instruments.** REG103. *500mA LDO regulator*. [Internett] 1 2000. [Sisert: 14 6 2011.] <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/reg103-33.pdf>.
42. **Analog Devices.** CMOS Single-Supply, Rail-to-Rail Input/Output. *AD8592*. [Internett] 1 2009. [Sisert: 1 4 2011.] http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8591_8592_8594.pdf. d01106-0-1/09(B).
43. **Vik, Bjørnar.** *Integrated Satellite and Inertial Navigation Systems*. Trondheim : Department of Engineering Cybernetics, NTNU, 2010.
44. **Lillevik, Ole.** *Eurobot 2010*. s.l. : NTNU, 2010.
45. **Robert Grower Brown, Patrick Hwang.** *Introduction to random signals and applied kalman filtering*. Canada : John wiley & sons, 1997. 0-471-12839-2.
46. **Atmel.** AVR221: Discrete PID controller. [Internett] 2006. [Sisert: 27 6 2011.] http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2558.pdf. 2558A-AVR-05/06.

47. **Jobb og næring.** Miljøvennlig rengjøring av skips-skrog. *Høytrykkspyling med ROV, fra CleanHull AS.* [Internett] [Sisert: 25 6 2011.] <http://www.jobbognaering.no/Bedriftsprofiler/Cleanhull.pdf>.

48. **Wikipedia.** Bunnstoff. [Internett] 14 2 2011. [Sisert: 15 6 2011.] <http://no.wikipedia.org/wiki/Bunnstoff>.

49. **Direktoratet for naturforvaltning.** Marine introduserte arter i Norge. [Internett] [Sisert: 25 6 2011.] <http://www.tekna.no/ikbViewer/Content/19553/%283%29%20Anne%20Britt%20Storeng.pdf>.

Vedlegg

- A. Konstruksjon av tankrigg
- B. Utviklingsfase robot
- C. Elektronikk design
- D. Digitale vedlegg

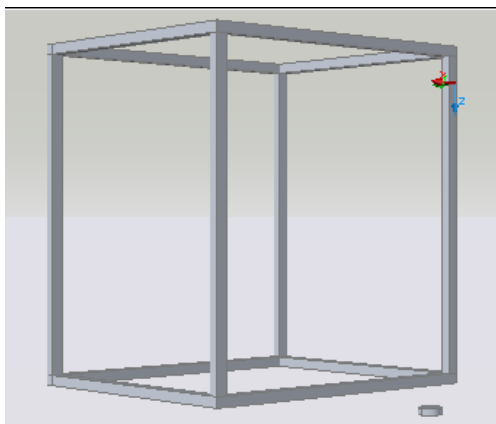
Vedlegg A: Konstruksjon av tankrigg

A. Konstruksjon av tankrigg

I prosjektets første fase oppstod behov for testing av prototyper på en tank i reell størrelse. Løsningen på dette ble å konstruere en rigg for montering av en testtank. Følgende spesifikasjoner ble satt for riggen:

- Bord for plassering av bærbar PC til logging
- Feste til ekstra touch-skjerm
- Svingbare hjul for enkel forflytning av riggen

En enkel ramme av firkanttrør i stål ble konstruert og sveist sammen. En plate på toppen ble montert for å holde tanken på plass. Figurene under viser rørrammen tegnet i Autocad og under produksjon.



Figur 212: Rørramme i Autocad 3D



Figur 213: S sammensveist rørramme

Rammen ble lakkert for økt korrosjonsbestandighet og pent utseendet. Fire svingbare hjul ble montert under. Figur 214 viser et bilde av den ferdige tankriggen med laptop-stativ og ekstra skjerm. Brosystemet for å simulere kjøring mellom flere tanker ble festet til rørrammen.



Figur 214: Ferdig tankrigg

Riggen har vært svært nyttig underveis i prosjektet. Sannsynligvis vil riggen også være til nytte ved videreføring av prosjektet.

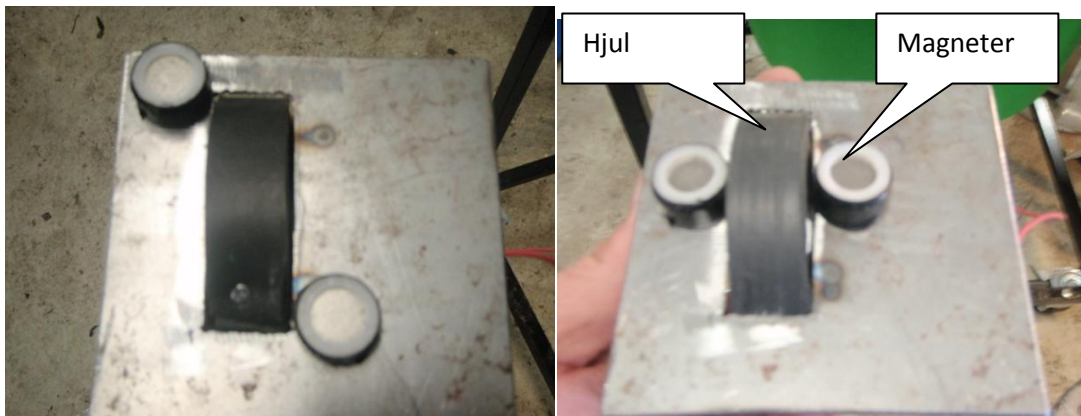
Vedlegg B: Utviklingsfase robot

B. Utviklingsfase robot

På veien frem til dagens prototype av roboten har mange versjoner blitt utviklet og testet. I hovedsak har dette blitt gjennomført ved hjelp av enkle skisser, magnetberegninger og utprøving på testtriggen. I dette vedlegget forklares de viktigste testede konseptene, med sine fordeler og ulemper. Dette er nyttig bakgrunnsinformasjon ved videreføring av prosjektet. En video med innslag av prototypene ligger i vedlegg D.

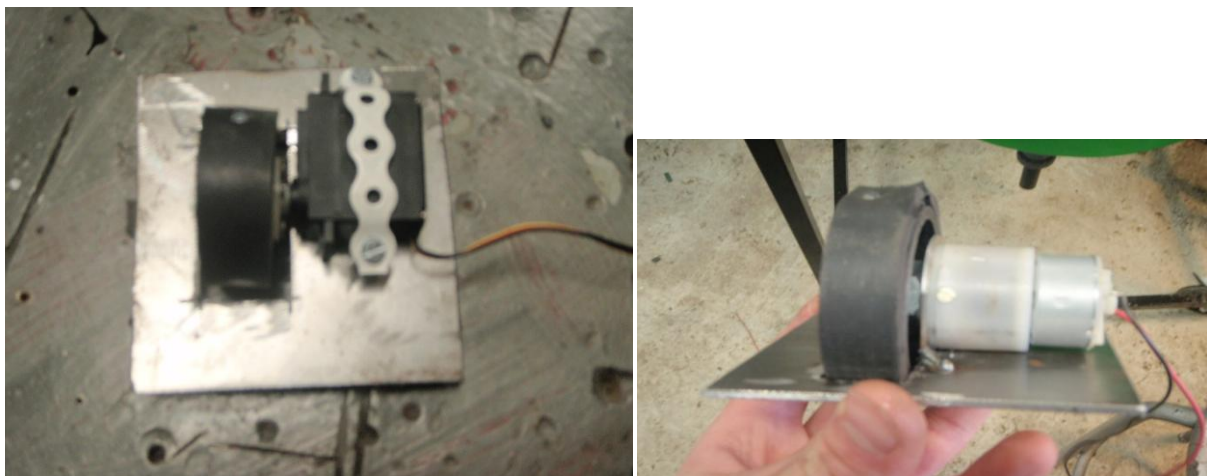
Hjul med magneter på begge sidene

Det første testede prinsippet var en magnet på hver side av et motorisert hjul. Det fungerer på en rett flate, dersom friksjonen er riktig dimensjonert. To tilsvarende magneter eller en metallplate på innsiden av tanken sørger for god magnetisk kobling. Utfordringen med metoden er å holde avstanden mellom begge magnetene og tankens utside jevn. Dersom de to avstandene blir litt forskjellig, har hjulet lett for trekkes skjevt mot tanken. Da klarer ikke hjulet å bevege seg på grunn av for stor friksjon.

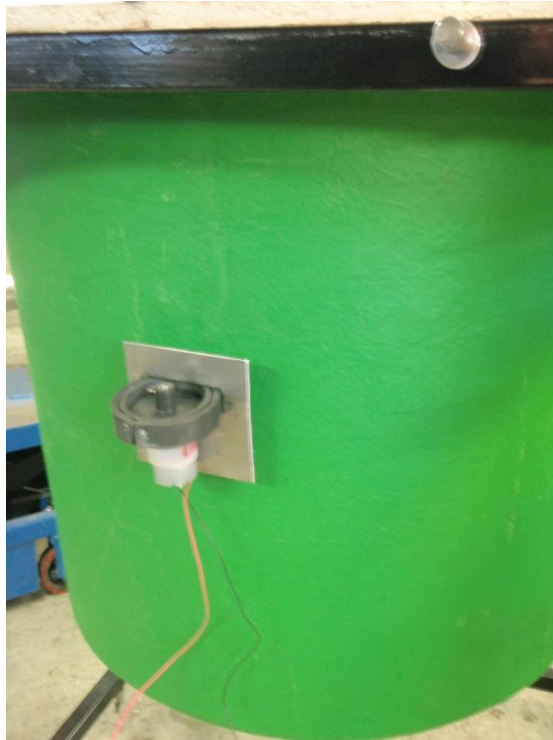


Figur 215: Magnetenes plassering

På tankens innside må friksjonen mellom magneter og tanken naturligvis være mindre enn mellom hjul og tank. Dersom gummi benyttes både på innsiden og utsiden, vil aldri hjulet kunne bevege på seg.



Figur 216: Tester med to typer hjul

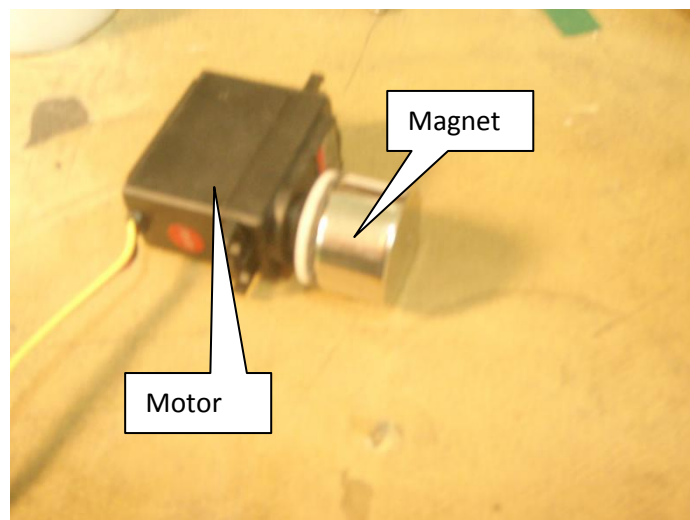


Figur 217: Hjul på testtanken

Ved bevegelse fra tankvegg til tankbunn, blir avstanden mellom magnetene på hver side av tanken for stor, og hjulet blir stående fast. Det kommer også av den skarpe overgangen mellom tankvegg og tankbunn. Å konstruere en autonom robot som kan bevege seg fra tankvegg til tankbunn med denne løsningen er i praksis vanskelig. Vi kan konkludere med at løsningen er dårlig. Løsningen krever sterke motorer, og gir stor slitasje på tankveggen.

Magnet som felg

En alternativ løsning er å benytte en sylindermagnet som hjul. Et dekk festes rundt magneten for å oppnå god friksjon mot underlaget. Dette kan gjøres dersom magneten er magnetisert med de magnetiske polene på hver flate side.



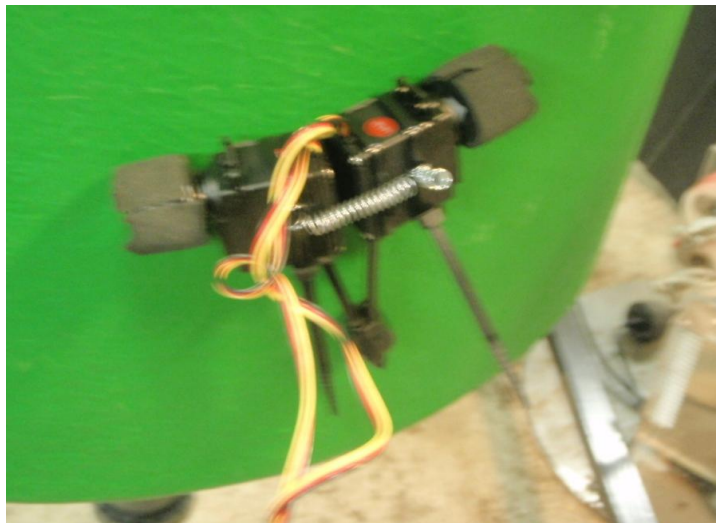
Figur 218: Magnet som hjul

Dersom en tilsvarende magnet også benyttes på tankens innside, oppnås god magnetisk kobling og en meget friksjon mot tankens innside, da behve magnetene ruller. En annen fordel med sylindermagnet på tankens innside er at overgang fra tankvegg til tankbunn skjer uten problemer.

Praktisk tester viser at dette prinsippet løser alle problemene forbundet med forrige metode. Vi kan konkludere med at magnet i felg må videreføres.

Robot med to hjul

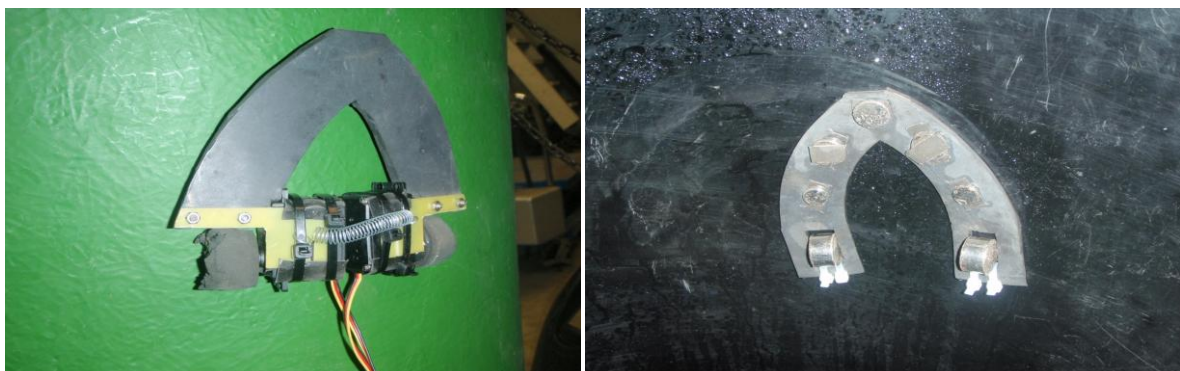
En enkel robot med to hjul ble konstruert for å testes på tanken. Løsningen ble her å gjøre robotens kropp fleksibel, da den ikke har nok bakkeklaring for vertikal kjøring på tanken. Et fjærbelastet ledd mellom robotens motorer gir god fleksibilitet. Dersom leddet ikke fjærbelastes, risikerer man at sporvidden minker og hjulene kommer sammen.



Figur 219. Robot med to hjul

Roboten gav gode resultater ved kjøring både på tankbunn og tankvegg. Fordelen er god styrbarhet og liten svingradius.

Et rensesystem konstruert som en V-formet oppsamler ble utviklet for å henges etter roboten. Rensesystemet gir stor motstand mot kjøreretningen, på grunn av materialets (gummi) høye friksjonskraft. For denne løsningen trengs derfor sterke motorer og kraftige magneter. Ved bevegelse mellom tankbunn og tankvegg gir også rensesystemet problemer, da det gir for stor friksjonskraft.



Figur 220: Robot med to hjul og oppsamler

Konklusjonen er at en robot med to hjul kan benyttes dersom motorene er sterke nok til å dra med seg rensesystemet. Ulempen er at et høyt effektforbruk behøves for å overvinne friksjonskreftene i det viste rensesystemet. Alternativt bør et rensesystem med mindre friksjon utvikles.

Robot med fire hjul

Mange roboter med fire hjul ble utviklet og testet. Fire hjul gir større trekraft. Ulempen er at svingradiusen øker og kjøring fra tankbunn til tankvegg er utfordrende. På grunn av magnetenes påvirkning av hverandre, må en viss avstand være mellom forhjul og bakhjul. Dette bidrar til at roboten blir unødvendig lang. Et rensesystem må i tillegg plasseres enten foran, bak eller mellom hjulene.



Figur 221: Flere prototyper med fire hjul

Bevegelse fra tankbunn til tankvegg lar seg gjøre også med fire hjul. Praktisk testing viser likevel at i prinsippet er dårligere enn to hjul på grunn av ekstra vekt og strømforbruk på grunn av flere motorer. Konklusjonen er derfor at roboten bør bestå av to drivende hjul, med et rensesystem som gir mindre friksjon.

Rensesystem

Utvikling av rensesystemet har pågått parallelt med utviklingen av roboten, ettersom komponentene har stor påvirkning på hverandre. Et rensesystem i form av en V-formet oppsamler som nevnt ble først testet. Denne gir stor friksjonskraft for roboten, da en stor kraft og overflate mot tankens innside kreves for god rensing.



Figur 222: Rensesystem som oppsamler

I praksis vil denne renseren gi dårlige resultater, da den har lett for å klemme avfallet inntil tankveggen istedet for å løsne det. Et bedre rensesystem bør utvikles.

Roterende renser

Dersom renseren roterer, gir dette større fleksibilitet enn om den bare dras etter roboten. Rotasjonshastigheten kan dermed reguleres uavhengig av robotens hastighet.



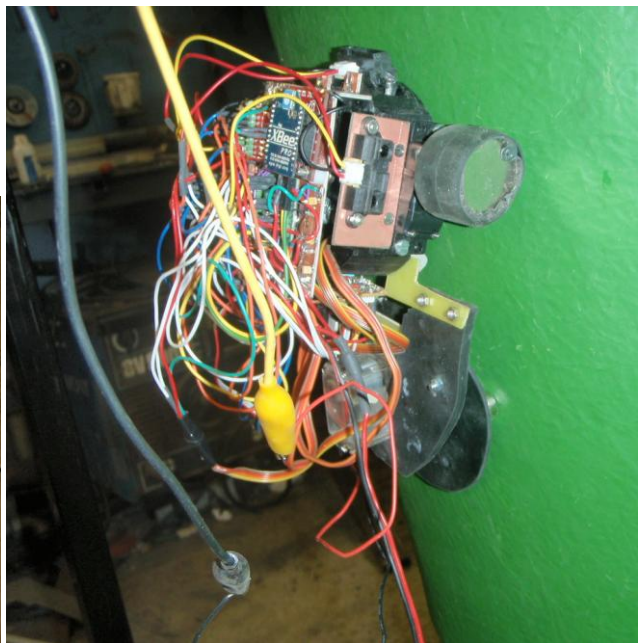
Figur 223: Forsøk med roterende renser, to kontaktpunkter

En roterende rensar med to kontaktpunkter ble testet på tanken. Ved å endre magnetenes størrelse, kan ønsket trykk mot tankens innside oppnås. For stort trykk gir unødvendig slitasje på tanken. Dette ble observert ved at belegget fikk betydelige striper.



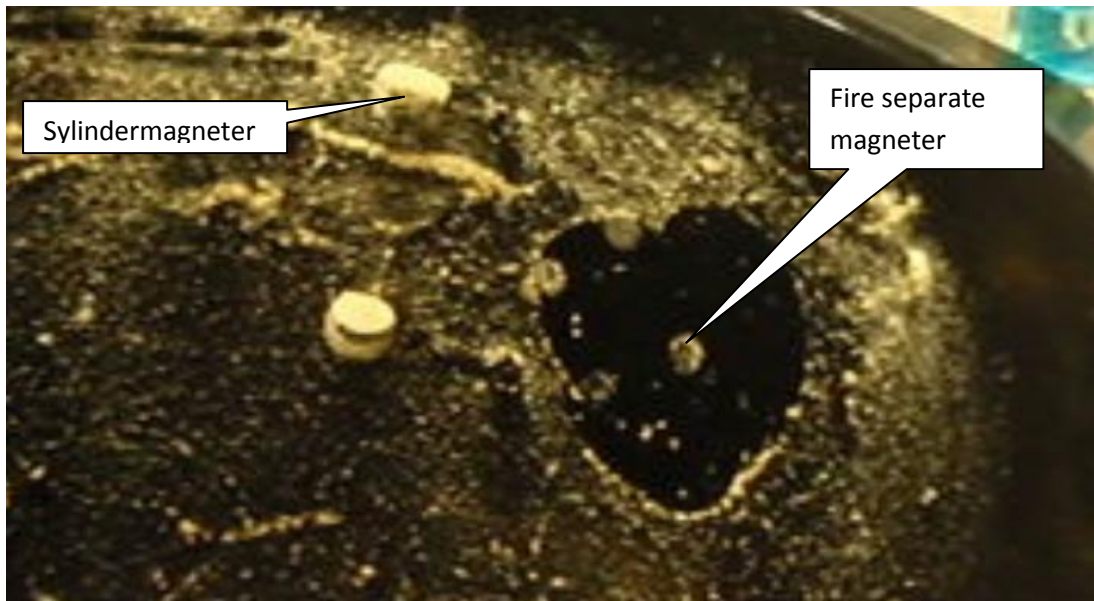
Figur 224: Roterende rensar med to kontaktpunkter sett fra tankens innside

For å minske den nødvendige rotasjonshastigheten, ble en rensar med fire kontaktpunkter utviklet. Denne ble påmontert roboten med to hjul.



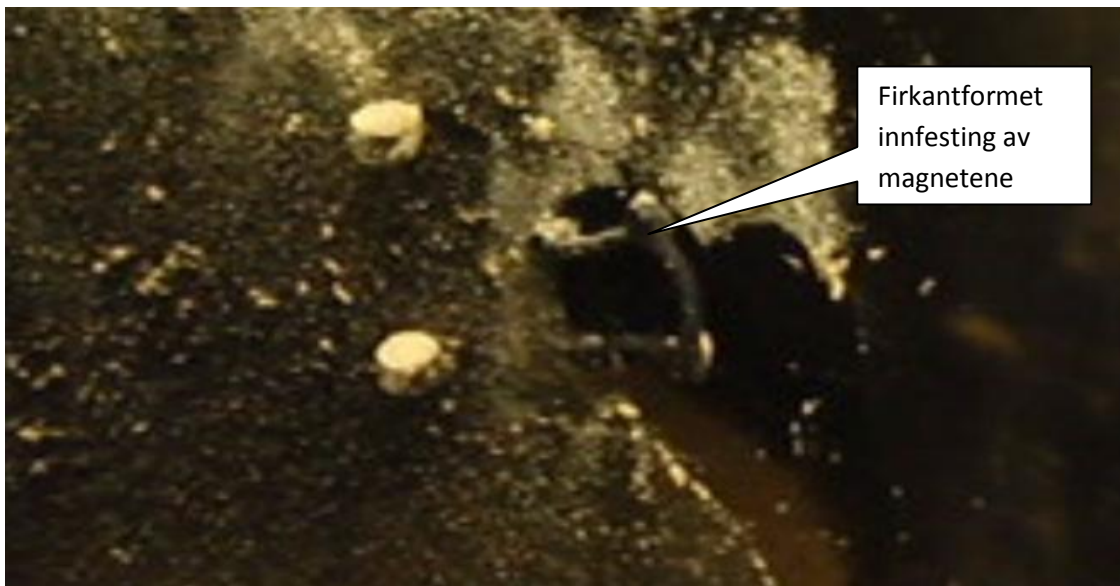
Figur 225: Rensar med fire kontaktpunkter påmontert robot med to hjul

Tester viste at rensaren fungerer bra på tankveggen. Praktiske forsøk ble gjort med sagflis og vann, for å simulere avfall på tankveggen. Ved bevegelse mellom tankvegg og tankbunn oppstår problemer, da de fire rensamagnetene på innsiden tiltrekkes av hverandre og sylindermagnetene foran.



Figur 226: Simulering av avfall på tankveggen

Løsningen på dette ble å utvikle en fleksibel sammenfesting av de fire kontaktpunktene. Her ble både en firkantet og en kryssformet løsning testet. Sammenfestingen formet som et kryss gav best resultat.

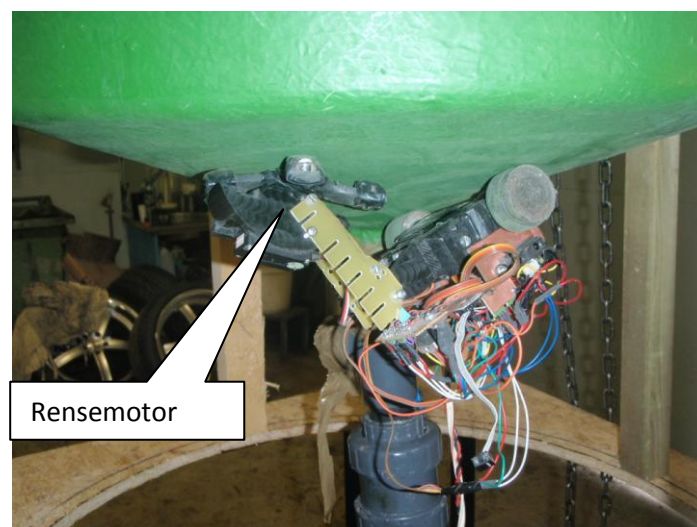
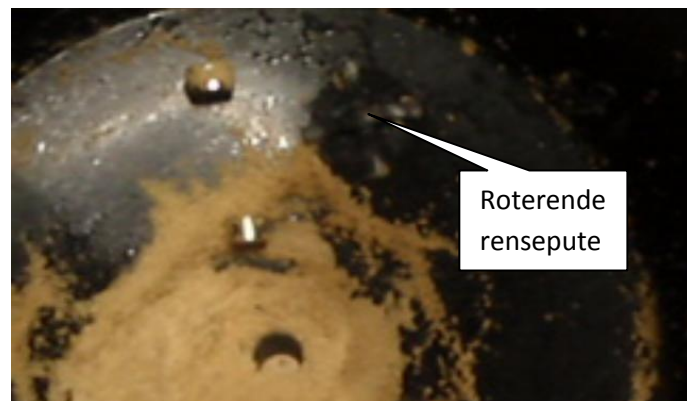


Figur 227: Fleksibel sammenfesting av de fire kontaktpunktene formet som en firkant



Figur 228: Fleksibel sammenfesting av de fire kontaktpunktene formet som et kryss

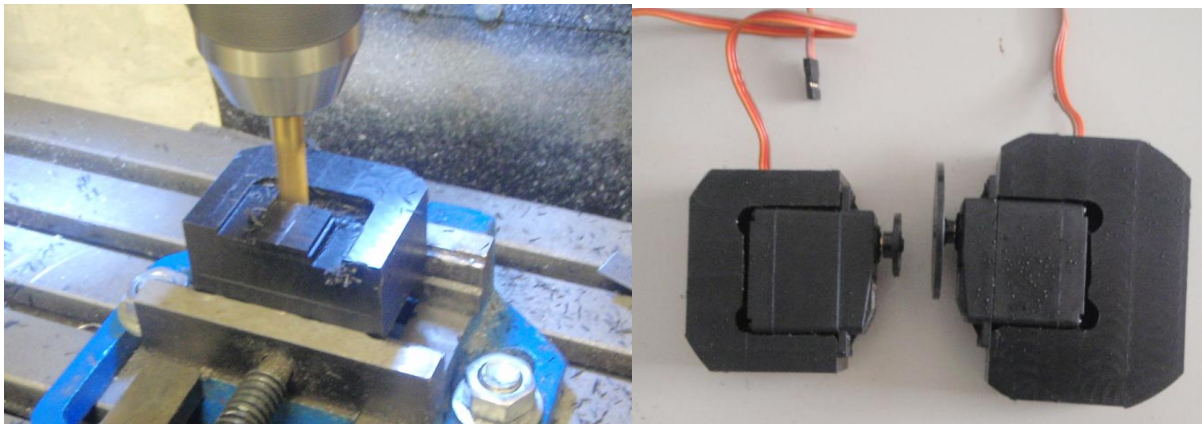
Også en fleksibel sammenfesting av de fire magnetene på tankens utside er nødvendig for å muliggjøre kjøring mellom tankbunn og tankvegg med rensen roterende. Løsningen gir et rensesystem som fungerer både for tankvegg og tankbunn. Figuren under viser roboten ved rens av tankbunn, sett både fra innsiden og utsiden.



Figur 229: Rens av tankbunn, sett fra innsiden og utsiden

Materialer

Dagens prototype har en kropp laget i materialet POM. Løsningen ble ikke optimalisert med tanke på vekt, da det er fornuftig å ha en sikkerhetsmargin i de dimensjonerte løsningene av krefter.



Figur 230: Tilvirkning av robotens kropp

Benyttet gummi for sammenfestning av renserens magneter er av type EPDM. Det er ikke tatt hensyn til gummiens påvirkning i form av giftstoffer i vannet. Endring til andre typer fleksibel gummi kan gjøres uten problemer dersom problemer oppstår.



Figur 231: Robotens kropp ferdigstilt

Brosystem

I denne delen beskrives utviklingen av brosystemet som muliggjør robotens rens av en komplett tankrigg. Denne prosessen har pågått parallellt med utviklingen av roboten. Brosystemets utforming må i praksis tilpasses robotens dimensjoner. Dette spesielt fordi magnetene på tankens innside skal henges fast mot broen i dagens løsning.

Første versjon av brosystemet var en bro laget av en stålplate med en fjærbelastet hengsling mot tanken. Hengslingen gjør det mulig for roboten å passere under broen ved rensing av tanken. I praksis snur roboten kjøreretning på tanken når den skal kjøre inn på brosystemet.



Figur 232: Metallbro

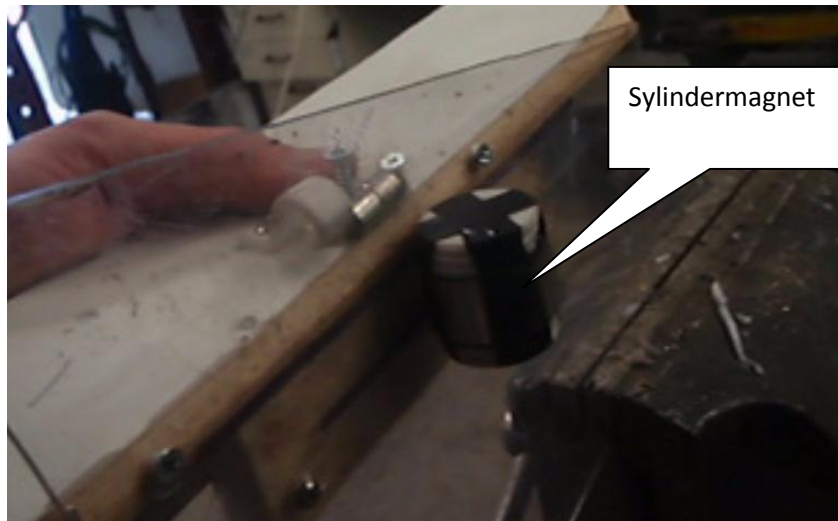
Broen fungerer bra dersom roboten kun har de to sylindermagnetene på innsiden, og ingen rens. Platen av ferromagnetisk materiale sørger for godt magnetisk feste mot robotens hjul. Ulempen med broens flate kant mot tanken, er at den gir stor motstand for robotens hjul når farkosten skal løsrive seg fra broen ved kjøring inn på tanken. Dette på grunn av at den magnetiske tiltrekningskraften mellom robotens hjul og broens metall er stor.

Løsningen på dette ble å utforme broens overgang mot tanken som to spisser i avstand lik robotens sporvidde. Spissene sørger for at den magnetiske kraften mellom robotens hjul og broen avtar gradvis. I praksis gir dette en glidende overgang, uten behov for ekstra motorkraft.

Den største utfordringen med brosystemet er i plassering av rensputen i tanken. Dette fordi roboten passerer broen kjørende i forskjellige retninger. Sylindermagnetene bak robotens hjul og rensputens fire kontaktpunkter kommer da i konflikt.

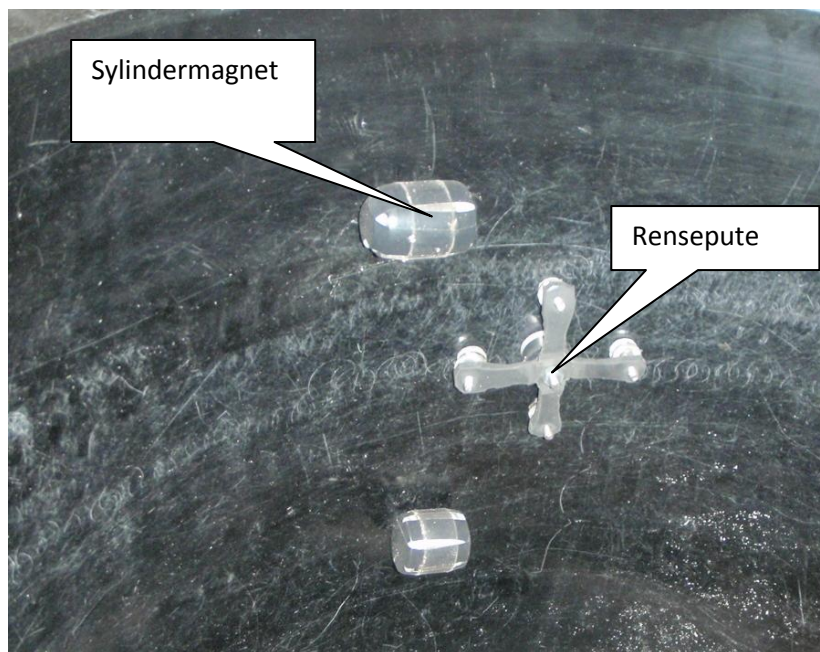
Å utvikle en løsning på dette problemet uten bruk av ekstra elektromagneter, servoer eller elektronikk på bro eller tank var svært tidkrevende. Et stort antall forskjellige alternativer ble skissert, vurdert og testet uten gode resultater.

Løsningen på problemet ble et magnetisk system som trekker sylindermagnetene i tanken til hver side når de ikke er i bruk. Dette gjør det mulig for renseputen å passere mellom. For å teste konseptet, ble en enkel testrigg bestående av en trekile, en treplate, plexiglass og noen magneter benyttet. En video av testriggen ligger vedlagt i vedlegg D.



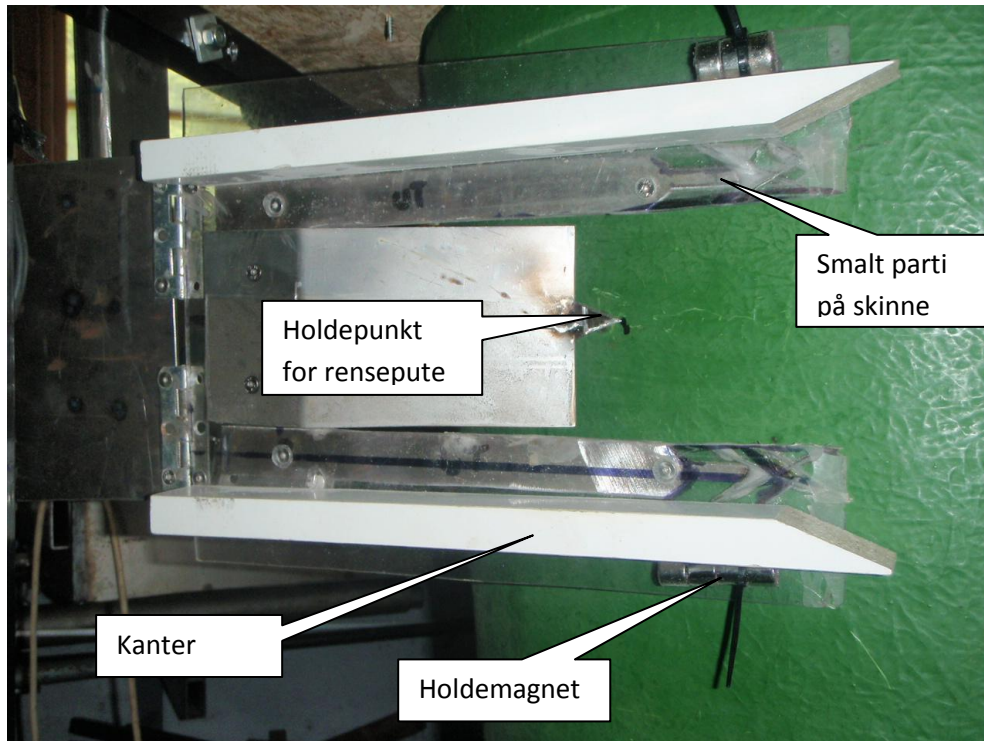
Figur 233: Enkel testrigg for å bevege sylindermagnetene til siden

Det magnetiske systemet ble konstruert for å gi sylindermagnetene en rotasjonsbevegelse 90° ut til sidene i en rullebevegelse. På den måten risikeres ingen slitasje på belegget på tankens innside. For å sikre sylindermagnetene mot velt under bevegelsen, kapsles de inn i et kindereggformet skall.



Figur 234: Sylindermagneter og rensere på tankens innside

Broen av metall byttes ut med en bro av plexiglass med metallskinner under robotens hjul. Plexiglasset sørger for at den magnetiske kraften og friksjonen mellom bro og robotens hjul blir passende. Dette kombinert med kanter sørger for at roboten kan bevege seg sikkert langs broen uten noe avansert posisjoneringssystem.



Figur 235: Dagens prototype av brosystem

En smart løsning er metallskinnenes utforming ved holdemagnetene. Et smalt parti på skinnene sørger for å gi sylindermagnetene på tankens innside ekstra hjelp i rotasjonsbevegelsen ut til sidene. Dette skjer da sylindermagnetenes magnetiske fluks gjennom det smale partiet skaper et vridningsmoment.

Utformingen av holdepunktet for renseputen er også viktig. Her benyttes ferromagnetisk materiale formet som en trekant. Trekantformen sørger for at puten fester seg til riktig sted. Når roboten skal kjøre inn på tanken igjen, kan renseputen enkelt løsnes fra broen, da den magnetiske tiltrekningskraften avtar gradvis.

Det er viktig at roboten ankommer broen i riktig høyde på tanken. Høydeestimatet fra estimatoren kan man risikere blir for unøyaktig her. Løsningen på dette blir bruk av avstandsmåling til begge kantene. Dersom kantene på begge sider rekker et stykke inn på tanken, oppnås en meget nøyaktig posisjonering.

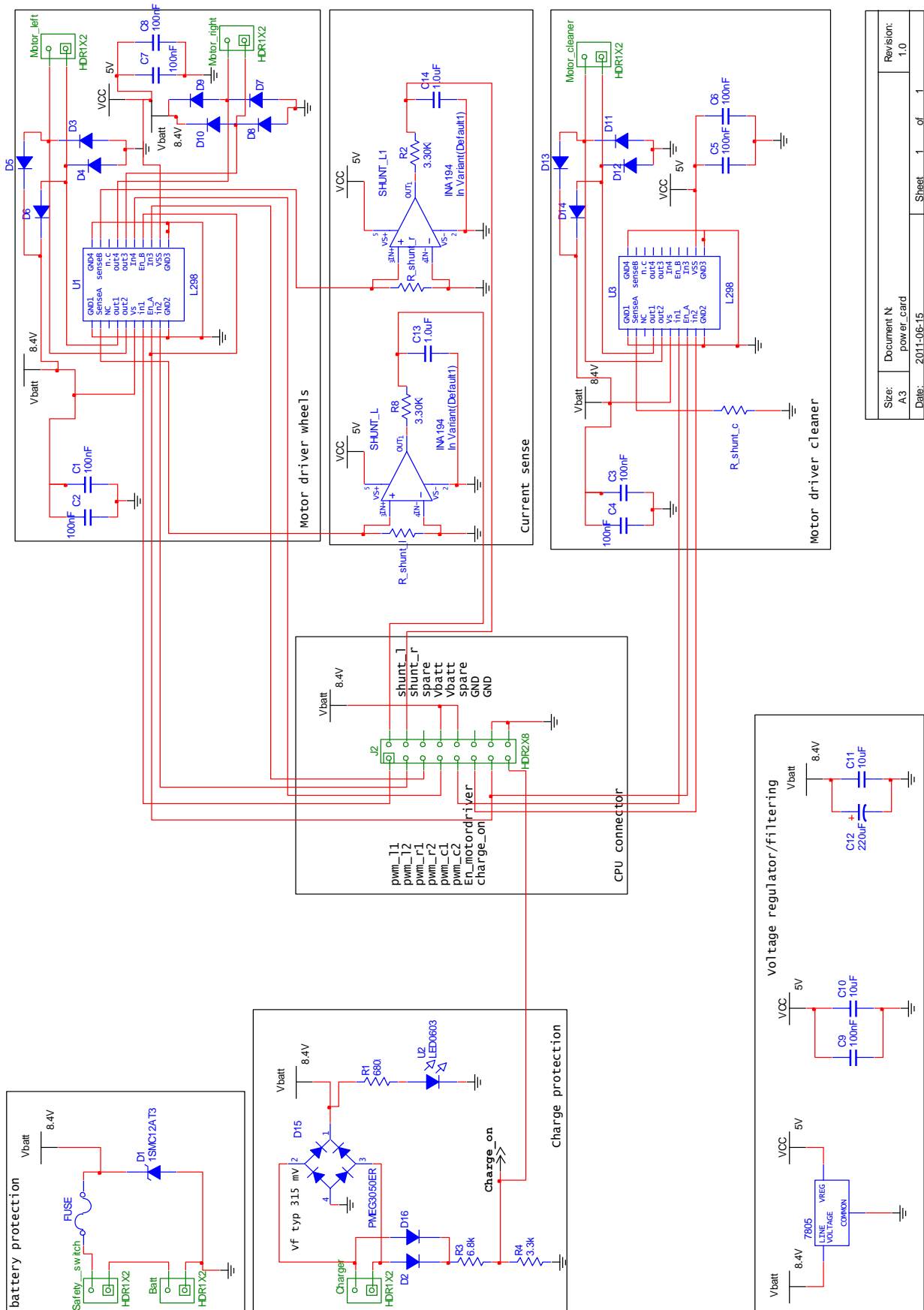
I en videreutviklingsfase må broen tilpasses endringer som gjøres på roboten. Broens prinsipp viser gode egenskaper, men for å sikre stabilitet behøves mer testing og flere tilpasninger. Dagens prototype er et godt utgangspunkt for videre utvikling.

Vedlegg C: Elektronikk design

C. Elektronikk design

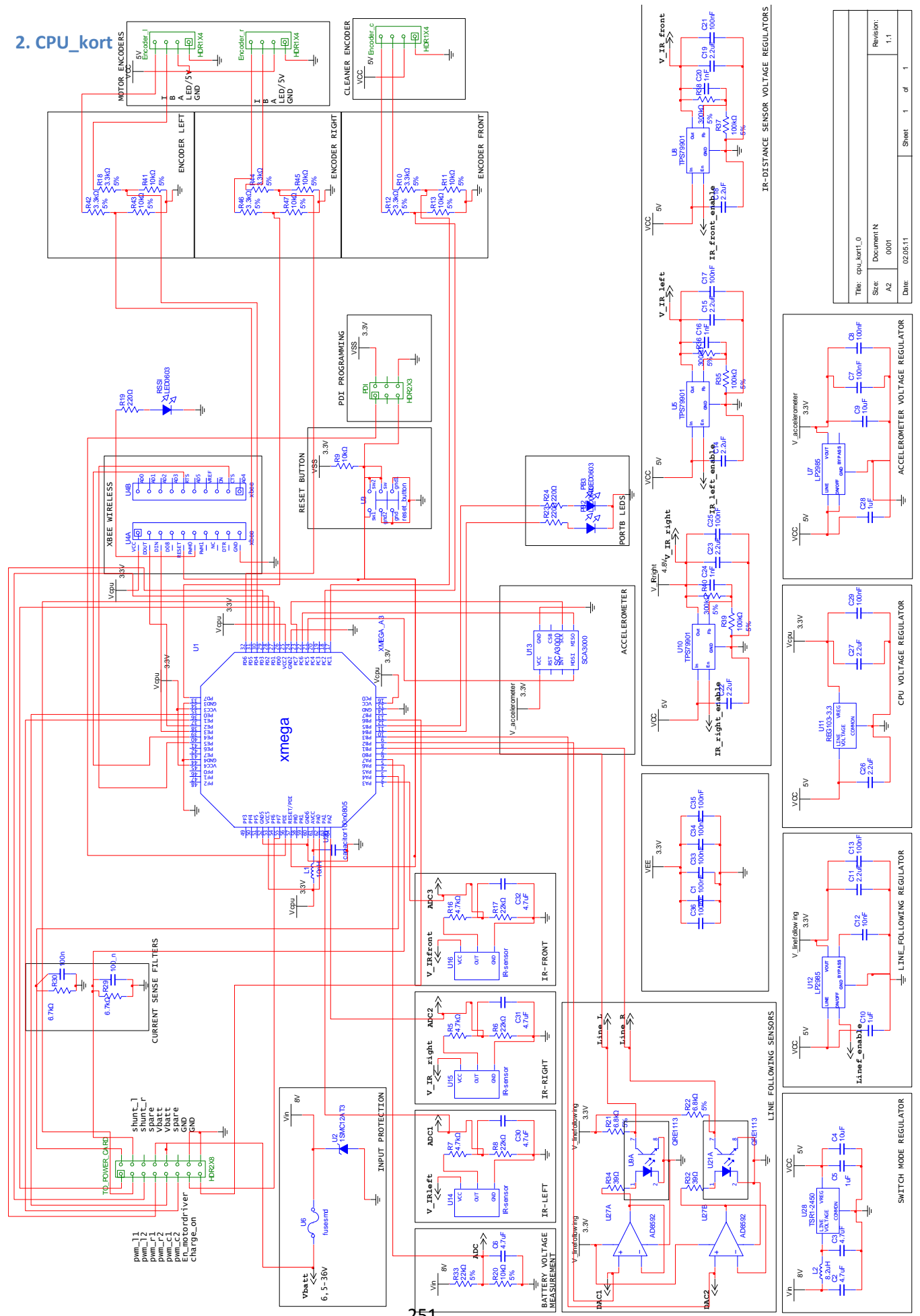
1. Power-kort
2. CPU-kort

1. Power_kort



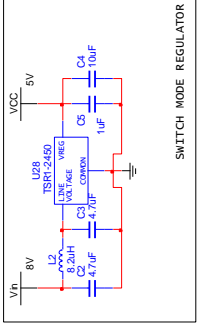
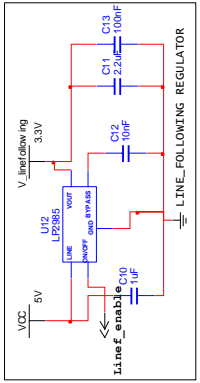
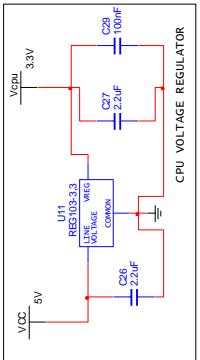
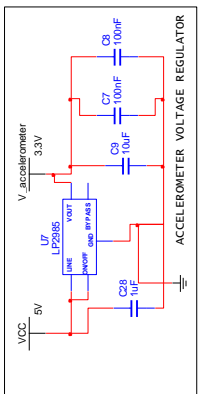
Size: A3	Document N: power_card	Sheet: 1 of 1
Date: 2011-06-15	Revision: 1.0	

2. CPU_kort



IR-DISTANCE SENSOR VOLTAGE REGULATORS

File:	cpu kort_0
Size:	Document N
A2:	0001
Date:	02.05.11
Sheet:	1 of 1
Revision:	1,1



D. Digitale vedlegg

1. Matlab magnet kraftberegningsprogram *magnet_force_calc.m*
2. Matlab kraftberegningsprogram *robot_forces.m*
3. Datablader for aktuelle sensorer og komponenter
4. Video robot utvikling *Røkerobot video master komprimert.wmv*

Dette er siste side i rapporten