

Styresystem for kybernetisk håndleddsprotese

Andreas Kråkenes

Master i teknisk kybernetikk
Oppgaven levert: Mai 2011
Hovedveileder: Øyvind Stavdahl, ITK

Oppgavetekst

Sammen med University of New Brunswick, Canada, har NTNU utviklet et elektrisk håndledd for armamputerte. Protesen omfatter bl.a. en børsteløs DC-motor med innebygde Hall-sensorer. Mekanikken er ferdig, og vi har startet design av et innvevd styresystem basert på mikrokontrollere og CAN-buss som skal styre håndleddet i henhold til mottatte kommandoer. Fokus for denne oppgaven er å forbedre og/eller fullføre designet og realisere en prototyp av det nye styresystemet, samt evaluere systemets egenskaper.

1. Gjør en utredning om mikrokontrollerbasert styring av små børsteløse DC-motorer, der du legger vekt på ulike kommuteringsprinsipper og mulige implementasjoner av disse. Foreta deretter et begrunnet valg av prinsipp for det foreliggende systemet.
2. Ta utgangspunkt i foreliggende systemdesign, og foreta forbedringer og/eller re-design i den grad du finner det nødvendig. Spesifiser testkriterier på modul- og systemnivå.
3. Realiser en prototyp av systemets maskinvare.
4. Test prototypen iht. testkriteriene fra punkt 2 så langt tiden tillater det. Denne testingen vil typisk omfatte både maskin- og programvare. Testprogrammer bør lages med tanke på at de skal gjenbrukes i det ferdige systemet.

Oppgaven gitt: 30. August 2010
Hovedveileder: Øyvind Stavadahl, ITK

Sammendrag

Et av de mer opplagte problemene som møter en person hvis arm har blitt erstattet med en protese, er reduksjonen i antall mulige bevegelser som en protese har i forhold til en frisk arm. Studier foretatt på friske armer, viser et større repertoar av bevegelser når håndleddets rotasjonsakse er stilt på skrå i forhold til underarmens lengdeakse. Et pågående forskningsprosjekt har som mål å undersøke om disse resultatene kan brukes til å hjelpe protesebrukere, og i den anledning har det blitt laget et håndledd med mulighet for vinkling av rotasjonsaksen.

Gjennom bruk av en utviklingsmetodikk med navn V-modellen har denne oppgaven, som fortsettelse på tidligere arbeid, forsøkt å lage et fungerende styresystem for håndleddet. Underveis i arbeidet har utviklingsmetodikkens faser blitt fulgt, og all nødvendig dokumentasjon og planer for testing har blitt testet.

Maskinvaren til håndleddets styresystem har blitt modularisert og designet for å håndtere sine tilordnede oppgaver. Kretsskjema for hver modul ble tegnet og lagt ut på flere kretskort som deretter kunne stables for å realiserte en prototyp av hele systemet. Programvare for hver av maskinvarens moduler har også blitt skrevet.

Av testingen som har blitt gjennomført, vises det at den realiserte prototypen tilfredsstillende kravene fra funksjons- og teknisk spesifisering.

Forord

Denne oppgaven er skrevet som avsluttende oppgave på masterstudiet i teknisk kybernetikk. Arbeidet med oppgaven har vært en lærerikt erfaring, både med tanke på oppfriskning av gammel kunnskap og påfyll av en del ny. Jeg har vært så heldig å få lov til å arbeide med et tema som interesserer meg personlig, og har frydet meg over å få muligheten til å lære mer. Men nå som studiet omsider er over, kan jeg endelig se fram til en vår uten å tenke på eksamener.

Aller først ønsker jeg å takke min veileder Øyvind for kjempegod veiledning og hjelp. Ditt engasjement for oppgaven har vært til inspirasjon når ikke alt fungerte som jeg ville. Også en takk til John Olav og gutta på verkstedet for god hjelp til alt fra komponenter til verktøy. Jeg vil også takke mine medstudenter, med Ove-Joakim i spissen, som har gjort studietiden til en fantastisk opplevelse jeg aldri vil glemme.

Til slutt en stor takk til min forlovede Susanne for hennes gode ord og bidrag til å holde motivasjonen oppe gjennom tyngre perioder. Jeg kunne aldri klart det uten deg ved min side.

Trondheim, mai 2011
Andreas Kråkenes

Nomenklatur

- CAN - Controller Area Network - Buss-standard for kommunikasjon mellom mikrokontrollere.
- Distal - Fjernest fra legemets midtlinje. Benyttes innen anatomi for å angi en legemsdels posisjon i forhold til en annen.
- EMG - Elektromyografi - Måling av elektriske signaler forårsaket av muskler.
- Hall-sensor - Sensor som måler hvordan et magnetfelt står plassert i forhold til sensoren.
- JTAG - Joint Test Action Group - Standard for overføring av programvare til innebygde systemer og debugging.
- Proksimal - Nærmest legemets midtlinje. Benyttes innen anatomi for å angi en legemsdels posisjon i forhold til en annen.
- Pull-up - Brukes om en motstand koblet mellom en høyimpedant inngangspinne og positiv spenning for å gi en definert "høy" verdi.
- PWM - Pulse Width Modulation.
- UART - Universal Asynchronous Receiver/Transmitter.
- UNB-protokoll - Forslag til standard for kommunikasjon i proteser.

Innhold

1	Innledning	1
1.1	Bakgrunn for oppgaven	1
1.2	Rapportens oppbygging	2
1.3	Mine bidrag	2
2	Styring av børsteløs DC-motor	5
2.1	Grunnleggende om børsteløs DC-motor	5
2.2	Sensorbasert styring	8
2.3	Sensorløs styring	10
2.4	Valg av prinsipp for styring	11
3	Metoder og utviklingsmetodikk	13
3.1	V-modellen	13
3.2	Min arbeidsmetode	14
4	Spesifisering og toppnivå-design	15
4.1	Teknisk spesifikasjon	16
4.1.1	Motordriver, MDR	17
4.1.2	Måling Motorstrøm, MMS	18
4.1.3	Regulator Håndledd, REG	18
4.1.4	Måling Håndleddsvinkel, MHV	19
4.2	Arkitekturmodell	19

5	Moduldesign	23
5.1	Mikrokontroller	23
5.2	CAN-modul	25
5.3	Motordriver	26
5.4	Posisjonsmåling	27
5.5	Strømovervåkning	29
5.6	Spenningsregulator	32
5.7	Modulenes grensesnitt	33
6	Implementasjon	35
6.1	Maskinvare	35
6.1.1	Mikrokontrollermodul	35
6.1.2	Motordriver- og CAN-modul	37
6.1.3	Strømovervåkningsmodul	37
6.1.4	Posisjonsmålingsmodul	37
6.1.5	Spenningsregulatormodul	39
6.2	Programvare	39
6.2.1	Regulator	40
6.2.2	Interrupt	41
7	Testplaner og testing	47
7.1	Testplan A	47
7.2	Testplan B	50
7.3	Testplan C	56
8	Diskusjon	57
8.1	Resultater	57
8.2	Metode	60
9	Konklusjon	63
	Bibliografi	65
A	Funksjonsspesifikasjon	67

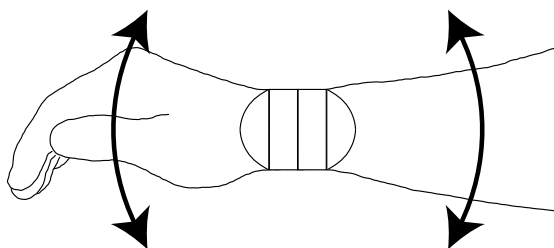
B	Kretsskjema og magnetholder	83
C	CD	95
C.1	Rapport	95
C.2	Kretsskjemaer	95
C.3	3D-modell	95
C.4	Datablad	96
C.5	Programvare	96

Kapittel 1

Innledning

1.1 Bakgrunn for oppgaven

Denne oppgaven har sin bakgrunn i et pågående forskningsprosjekt som er et samarbeid mellom NTNU og University of New Brunswick, Canada. I Øyvind Stavdahls doktoravhandling [9] viste målinger gjort på friske håndledd et større repertoar av bevegelser når håndleddets rotasjonsakse stod skrått på underarmens lengdeakse. For å finne ut om disse resultatene kan brukes for å gjøre det mulig for protesebrukere å utføre flere handlinger, har det blitt laget et håndledd (NTNU Rotary Wrist Device, NRWD) med mulighet for vinkling av rotasjonsaksen i forhold til hånd og underarm som vist i figur 1.1.



Figur 1.1: Vinkelen mellom håndledd og hånd/underarm kan endres for å tillate bevegelser som ikke hadde vært mulig ellers.

Konstruksjon av elektronikk og styresystem har vært gitt som masteroppgave tidligere, men et velfungerende og robust system har ennå ikke blitt laget. Denne oppgaven er en videreføring av Inge Brattbakkens masteroppgave fra 2010 [1]. Der ble det besluttet å starte på nytt og konstruere styresystemet helt fra bunnen. Oppgaven vil ha et økt fokus på å dokumentere valg av løsninger og testing av disse. Denne dokumentasjonen vil forhåpentligvis komme godt med hvis noen senere skulle ta opp tråden fra denne oppgaven.

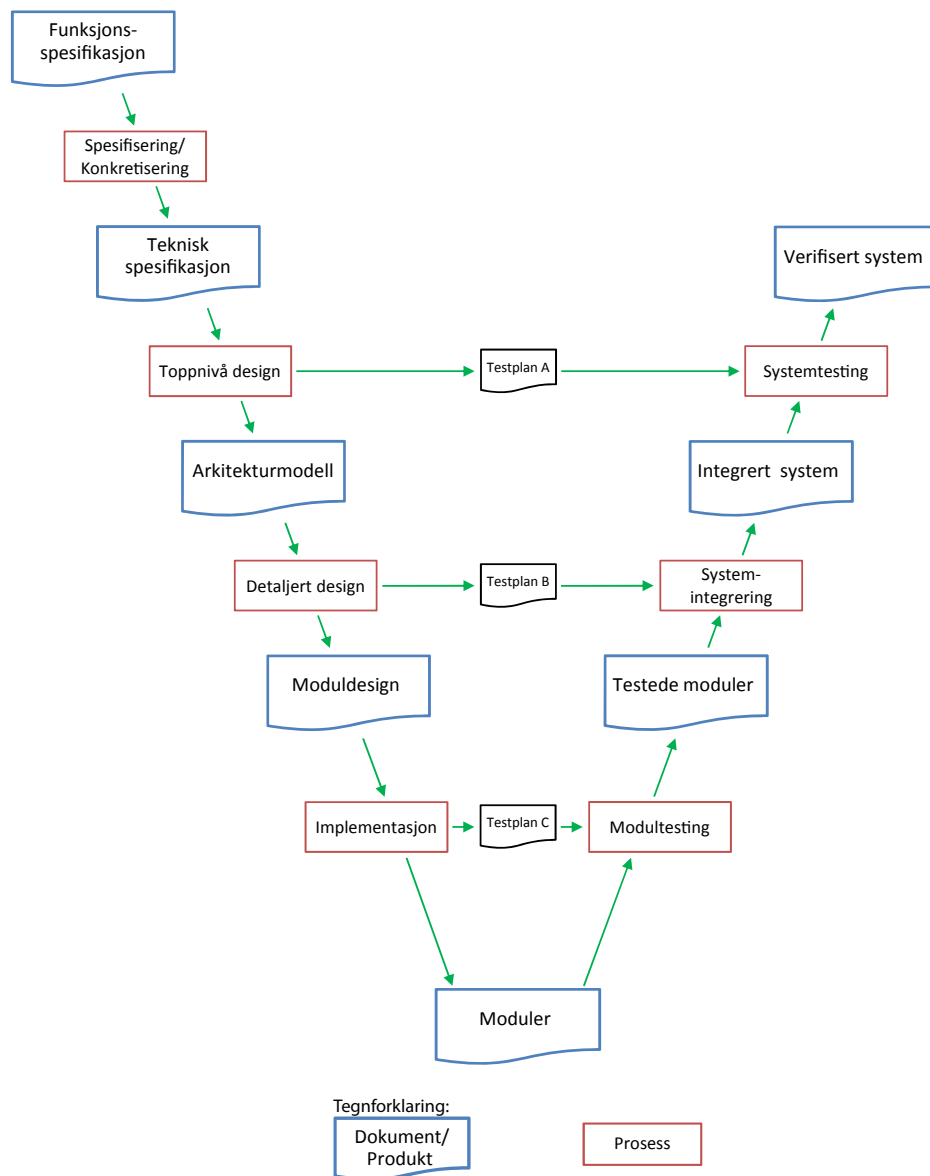
1.2 Rapportens oppbygging

I gjennomføringen av prosjektet har en utviklingsmetodikk kjent som V-modellen blitt brukt, se figur 1.2. Modellens venstre side kan grovt sett deles inn i tre faser; spesifikasjons-, design- og implementasjonsfase. Fasene følger hverandre kronologisk, og for å gjøre rapporten så oversiktlig som mulig, er den delt inn slik at hver fase har sitt eget kapittel. Alle testplanene har blitt samlet i et eget kapittel til slutt, også dette for å gjøre alt så oversiktlig som mulig.

1.3 Mine bidrag

I denne oppgaven har jeg brukt tid på å sette meg inn i et allerede eksisterende prosjekt. Gjennom en litteraturstudie har jeg undersøkt styringsprinsipper for børsteløse DC-motorer. Jeg har ved bruk av V-modellen foretatt en analyse av eksisterende funksjonsspesifikasjon og konkretisert denne i en teknisk spesifisering. Testdokumenter har blitt laget for verifikasjon av produktkravene. Systemet har blitt modularisert, og hver modul konstruert slik at disse løser sine oppgaver. Kretsskjema for modulene har blitt tegnet og kretskort laget og loddet opp. I tillegg har det meste av testing av prototypen blitt gjennomført.

En del tid har gått bort på grunn av feil forårsaket av defekte deler, blant annet to motorer. Samtlige av figurene og bildene i denne rapporten er det jeg som står bak.



Figur 1.2: V-modellen har blitt brukt som utviklingsmetodikk i denne rapporten. I venstre halvdel foregår utviklingen med spesifisering, modulering og implementasjon, mens systemets mindre deler settes sammen til et komplett system og testes i høyre del.

Kapittel 2

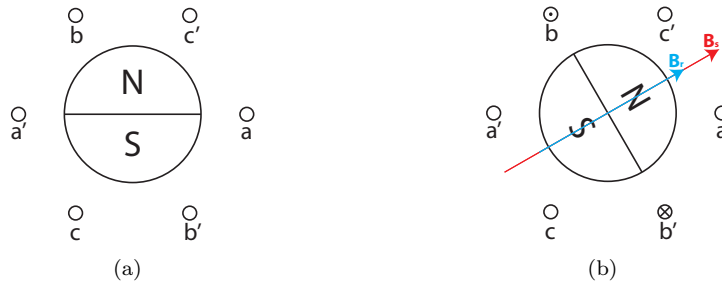
Styring av børsteløs DC-motor

2.1 Grunnleggende om børsteløs DC-motor

For å styre en børsteløs DC-motor, kan det være greit med litt grunnleggende kunnskap om hva som får en motor til å snurre. Alt handler om magnetisme, og prinsippet er stort sett det samme som for et kompass. Jordas magnetfelt strekker seg fra sør- til nordpolen, og kompassets magnetiserte nål vil innrette seg etter dette magnetfeltet og peke i retning av polene. Motorens rotor oppfører seg på samme måte som nåla i kompasset. Når statoren setter opp et magnetfelt med vektor \vec{B}_s , vil rotoren dreie slik at dens egen feltvektor \vec{B}_r peker i samme retning som statorens. Kraften rotoren vil dreie med bestemmes av vektorenes størrelser. For å opprettholde rotasjonen, må vinkelen mellom de magnetiske feltvektorene være ulik 0 grader, og i en børsteløs DC-motor gjøres dette ved å rotere statorfeltet i samme retning som ønsket rotasjonsretning. Denne endringen er det som kalles kommutering.

For at rotoren skal få en jevn bevegelse, som kan yte maksimalt moment, må kommuteringen skje på riktig tidspunkt. Og for at statoren skal kunne sette opp riktig magnetfelt til riktig tid, må den på en eller annen måte vite hvordan rotoren

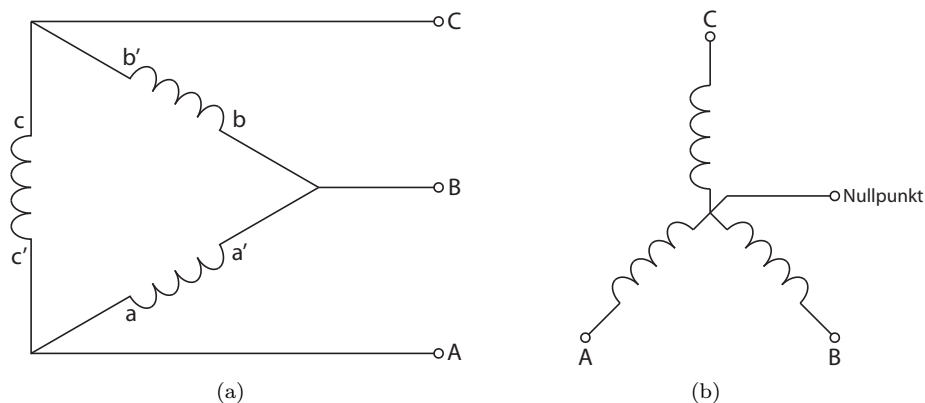
står plassert. Hvordan dette kan løses, beskrives i de neste to delkapitlene, men først tar vi en kikk på den børsteløse DC-motorens oppbygning.



Figur 2.1: (a) viser trefasemotorens oppbygning med tre spoler. (b) viser hvordan rotoren vil stille seg inn etter magnetfeltet som genereres av spole B. Strømmen kan ses gå inn i spolen i b', og ut i b.

Det enkleste eksemplet er trefasemotoren, og motoren som er valgt for dette prosjektet, en 0620K 012B fra Faulhaber, er eksempel på en slik. Figur 2.1 (a) viser motorens oppbygging med tre spoler i statoren. Ved å sende strøm gjennom en av spolene, kan vi få rotoren til å stille seg inn etter magnetfeltet som genereres, se figur 2.1 (b). Reverseres strømmen, vil rotoren snu seg 180 grader. For å slippe å ha to ledere per spole, kan de kobles sammen. Figur 2.2 (a) og 2.2 (b) viser spolekonfigurasjonen i henholdsvis delta- og stjernekoblet motor. Med disse konfigurasjonene kan to spoler aktiveres samtidig, noe som samlet gir større magnetfelt, som igjen gir større moment. Med utgangspunkt i en deltakonfigurasjon, som motoren fra Faulhaber har, vil vi ved å sette $A = 0$, $B = 0$ og $C = 1$ få strømmen til å gå inn i spolene i b' og c, noe som i figur 2.3 indikeres med et kryss. Legg merke til at spenningsdifferansen over spole A vil være 0V, og denne vil derfor ikke generere magnetfelt. Med tre spoler har statorens magnetfelt 6 mulige retninger å stille seg i, noe som vil si at det er 60 grader mellom to kommuteringer. Ved å påtrykke mønsteret i tabell 2.1 vil feltvektoren gjøre én rotasjon mot klokka.

En motors dreiemoment er avhengig av hvordan statorens og rotorens feltvektor, henholdsvis \vec{B}_s og \vec{B}_r , står i forhold til hverandre og er størst når vinkelen dem imellom er 90 grader. Optimalt skal statorens magnetfeltet rotere med sam-

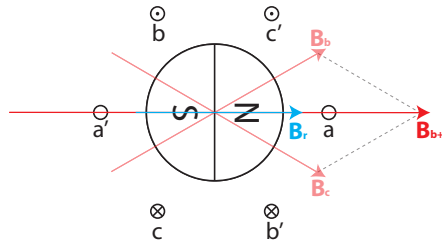


Figur 2.2: Med en deltakonfigurasjon, som vist i (a), vil det alltid være to aktive spoler som bidrar til å skape magnetfelt. Hvis en spoles inngang settes lik motorens nullpunkt i en stjernekoblet motor, som i (b), vil spolen være inaktiv uavhengig av hva de andre spolene gjør.

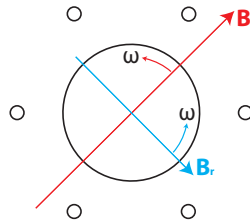
me hastighet som rotoren, men med en feltvektor som hele tiden ligger 90 grader foran, slik som vist i figur 2.4. For å klare dette vil det være behov for altfor mange spoler til at det er gjennomførbart. For å oppnå maksimalt dreiemoment i vår motor med tre spoler, må det settes opp et magnetfelt i statoren som ligger 120 grader på rotorfeltet, og dette må holde seg konstant til vinkelen er redusert til 60 grader. Deretter kan motoren kommutere. Dette gir en gjennomsnittlig vinkel mellom statorens og rotorens feltvektor på 90 grader.

Tabell 2.1: Kommuteringsmønster for én rotasjon mot klokka. For å rotere med klokka, kjøres bare mønsteret i motsatt rekkefølge.

A	B	C
0	1	1
0	0	1
1	0	1
1	0	0
1	1	0
0	1	0



Figur 2.3: Med en deltakoblet motor vil det alltid være to spoler aktivert samtidig. Med bidrag fra begge spolene blir det resulterende magnetfeltet større enn om bare en spole ble brukt, og motorens moment blir større.

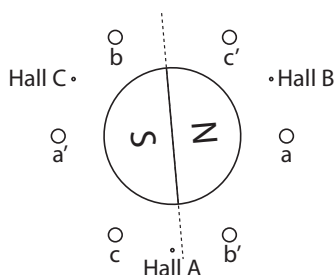


Figur 2.4: Idealtilfelle med statorens magnetfelt som roterer med samme hastighet, *omega*, som rotoren. Dette vil kreve at statorfeltet kan innta svært mange retninger, noe som vil kreve et stort antall spoler.

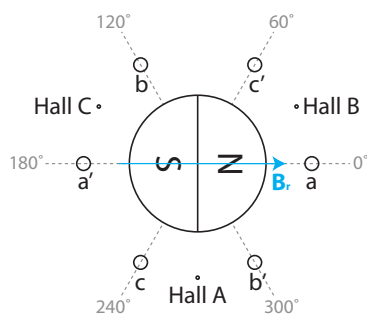
2.2 Sensorbasert styling

Når vi nå vet hvordan spolene i motoren skal aktiveres for å få den til å snurre, trenger vi bare å vite når hver enkelt spole skal være aktiv. Den enkleste måten å gjøre dette på er å skaffe en motor med innebygde hall-sensorer. En slik sensor gir ut 0 eller 1, alt etter hvordan rotorens permanentmagnet er posisjonert. 0 hvis sensoren befinner seg innenfor sørpolens sektor, og 1 hvis den befinner seg innenfor nordpolens sektor. Med tre sensorer fordelt med 120 grader mellom seg, kan det skilles mellom seks plasseringer. Figur 2.5 viser ett tilfelle. Sensorene er plassert slik at de vil gi beskjed når rotorfeltet står 60 grader på statorfeltet, noe som betyr at et nytt kommuteringsmønster må settes ut. Hvis hall-sensorene kobles til en mikrokontrollers interrupt-pinner, vil det genereres et interrupt hver gang en av sensorene endrer seg, og i interruptrutinen kan et nytt mønster påtrykkes.

Det er viktig å merke seg at det vil være behov for pull-up-motstander for å kunne lese av sensorene. I en mikrokontroller er det mulig å sette intern pull-up på interrupt-pinnene, og en vil da slippe ekstra komponenter.



Figur 2.5: Hall-sensor B er den eneste som ligger innenfor nordpolens sektor, og avlesing fra hall-sensorene vil derfor gi $A = 0$, $B = 1$ og $C = 0$. Hvis rotoren snus 180 grader, vil avlesingen inverteres.



Figur 2.6: Rotorens magnetiske feltvektor danner en vinkel på 0 grader med horisontalplanet. Merk at ved rotasjon mot klokka, vil kommutering skje når hall-sensor A gir ut 0, og ved rotasjon med klokka når den gir ut 1.

Figur 2.6 og tabell 2.2 viser hvordan pådraget på fasene skal settes for en gitt avlesing fra hall-sensorene ved rotasjon mot klokka. For å få rotasjon andre vei er det bare å invertere pådragene. I en mikrokontroller kan da kommuteringen gjøres ved å lese av hall-sensorene, og så gjøre et oppslag i en tabell for å finne det nye mønsteret som skal settes ut.

Tabell 2.2: Avlest signal fra hall-sensorene og fasenes pådrag ved rotasjon mot klokka.

Rotorvinkel	Hall			Fase		
	A	B	C	A	B	C
0°	0	1	0	1	0	0
60°	0	1	1	1	1	0
120°	0	0	1	0	1	0
180°	1	0	1	0	1	1
240°	1	0	0	0	0	1
300°	1	1	0	1	0	1

2.3 Sensorløs styring

Basert på mengden litteratur som finnes om sensorløs motorstyring, kan en si at dette er lite brukt i industrien. Hvis en motor har sensorer er det ingen grunn til ikke å bruke disse. Som vi skal se, gir det ingen forbedring i ytelse å styre en motor uten sensorer, men disse er billigere i innkjøp og kan lages mindre.

Hovedproblemet med sensorløs styring, er hvordan rotorens posisjon skal finnes. Et applikasjonsnotat fra Microchip [5] nevner to alternative prinsipper for å løse dette problemet; reluktans, også omtalt som magnetisk motstand, og motindusert spenning. Reluktansen i en motorspole vil endre seg med rotorens posisjon, og måling av denne vil kunne gi en posisjonsmåling som kan brukes for å styre kommuteringen. Et problem med dette prinsippet er at variasjonen i reluktans i mange motorer er så liten at den er vanskelig å måle nøyaktig. Derfor skal vi i hovedsak se på motindusert spenning som måleprinsipp.

Når en motor snurrer, fungerer den samtidig som en generator, og genererer en spenning med motsatt fortegn av spenningen inn på spolen. Den motinduserte spenningens amplitude er proporsjonal med motorens hastighet, og fungerer som en negativ tilbakekobling slik at hastigheten ikke går mot uendelig. Ved å la en spole i en motor være inaktiv, det vil si at inngangen er satt høyimpedant, kan spenningen indusert i spolen måles. Dette er enklest å se for seg i stjerne-koblede motorer. Figur 2.7 viser hvordan den induserte spenningen vil se ut for én rotasjon. Som figuren viser, vil den induserte spenningen krysse likevektslinjen og endre fortegn når rotorens feltvektor står 90 grader på horisontalplanet. Som vi vet fra tidligere skal motoren kommuteres for hver 60 grader, noe som betyr at vi

kan bruke kryssingen av likevektslinjen til å si ifra når det er 30 grader igjen til kommutering. Motorspolen er uansett ikke aktiv når den induerte spenningen krysser likevektslinjen, så det vil ikke forekomme noe tap av ytelse som følge av at spoleinngangen settes høyimpedant. For å treffe med kommuteringen når rotorfeltet står 120 grader på horisontalplanet, må det brukes en timer. Tiden fra en spole settes høyimpedant til induert spenning krysser likevektslinjen sier hvor lang tid det tar for motoren å rotere 30 grader. Etter null-kryssingen, er det da bare å vente like lenge før et nytt kommuteringsmønster settes ut. Likevektslinja vil alltid ha samme verdi som drivspenningas potensiale delt på to. Siden spolenes resistans er den samme, og kun to spoler er aktive samtidig, blir det en spenningsdeling som gir halvparten av drivspenninga. Deteksjon av null-kryssing kan gjøres med mikrokontrollerens interne AD-omsetter.

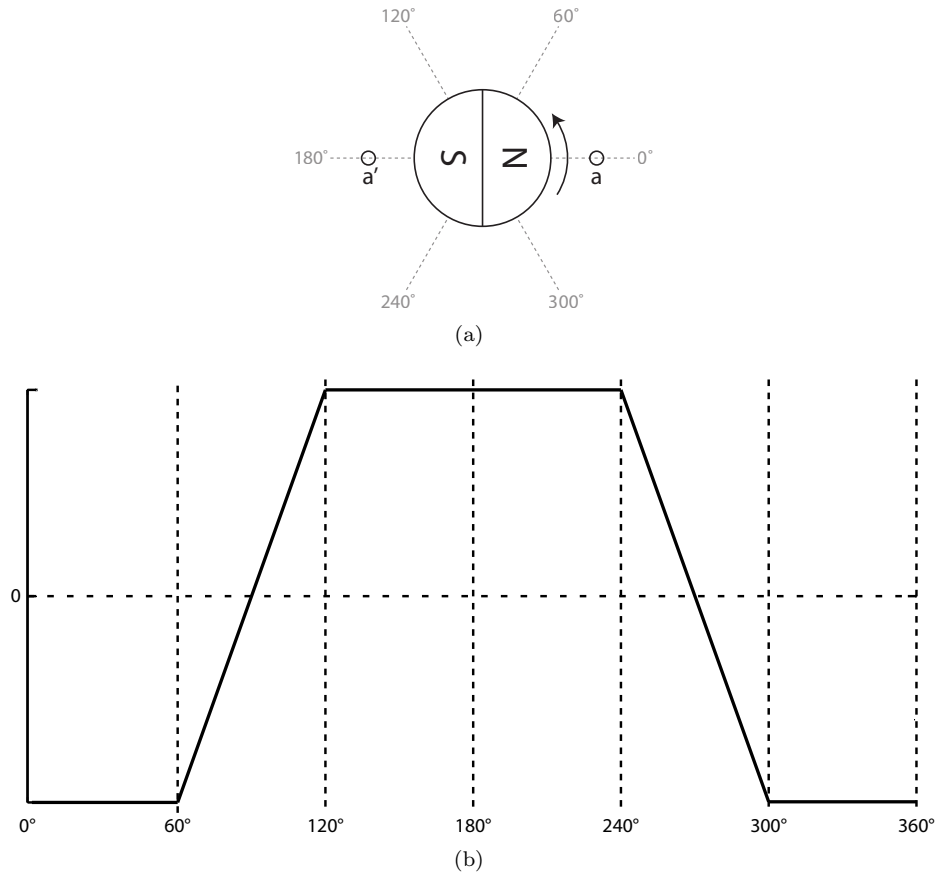
2.4 Valg av prinsipp for styring

Basert på styringsprinsippenes fordeler og ulemper, er det stort sett uproblematisk å gjøre et velbegrunnet valg. Sensorløs styring har noen ulemper som vil utelukke valg av denne i applikasjoner hvor posisjonsregulering er nødvendig. Dette av to grunner. Som nevnt er motindusert spenning proporsjonal med motorens hastighet, og når motoren skal startes opp fra å være stillestående, har vi ingen mulighet for å vite hvordan rotoren står plassert. En må da bare sette spenning på motoren slik at den begynner å snurre, og se etter null-kryssingen i induert spenning. Den andre ulempen er at beregning av rotorposisjonen ikke vil være robust ved lave hastigheter. Derfor kan vi si at sensorløs styring kun er egnet til applikasjoner hvor det bare er behov for kontinuerlig operasjon, som for eksempel vifter [5]. Sensorbasert styring er den klart beste løsningen hvis en ser på motorytelse. I motsetning til sensorløs styring, kan motoren yte maksimalt moment ved oppstart. Eneste ulempene ved dette prinsippet er at motorene må lages større for å gi plass til hall-sensorene. Sensorene fører også til at det trengs flere ledere; en per sensor pluss drivspenning. I tillegg er motorer med sensorer noe dyrere å produsere enn alternativet uten sensorer.

Basert på argumentene for de ulike styringsprinsippene, kan følgende sies: Hvis ikke applikasjonen setter fysiske begrensninger for hvor stor motoren kan

være, bør en med sensorer velges. I denne oppgaven brukes en motor med sensorer.

For mer teori om børsteløse motorer, henvises det til [8].



Figur 2.7: Måling av spenning induisert i motorspole A. Som vi ser vil spenningen være avhengig rotorens posisjon. En strøm inn i a, og ut av a' defineres som positiv strømretning.

Kapittel 3

Metoder og utviklingsmetodikk

3.1 V-modellen

En modell som er veldig aktuell innen produktutvikling og som foreleses ved NTNU, er V-modellen [7]. Figur 1.2 viser modellen tilpasset denne oppgaven. I modellens venstre del foregår all utvikling av produktet. Dette gjøres ved å gå gjennom flere faser hvor en på toppen starter med en overordnet beskrivelse av hva en ønsker å lage; i dette tilfellet funksjonsspesifikasjonen. For hver fase, eller prosess, genereres spesifikasjoner for krav som skal tilfredsstilles, og testdokumenter som senere vil legge grunnlaget for testing og verifisering av kravene. Jo lenger nedover i modellen en beveger seg, jo mer detaljert blir beskrivelsene. På denne måten vil modularisering av det totale systemet falle seg naturlig. I bunnen av modellen implementeres systemets moduler, og en beveger seg over på høyre side. Her tas testdokumentene fram for å verifisere at modulene virker som beskrevet i spesifikasjonene. Så settes modulene sammen og testing på systemnivå gjennomføres før produktet sertifiseres.

V-modellens styrke ligger i nettopp fokus på testing og sporbarhet, og i utviklingsprosjekt som går over lengre tid med flere deltakere, er sistnevnte essensielt.

Hvis modellen følges vil det være en klar kobling mellom hver fase av prosjektet, og da også dokumentene som produseres.

For mer informasjon og nærmere beskrivelse av V-modellen henvises det til [4] eller vilkårlig oppslagsverk.

3.2 Min arbeidsmetode

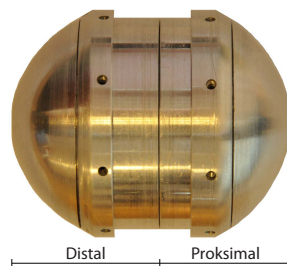
Gjennom prosjektet har flere verktøy blitt benyttet. Atmels programvare AVR Studio 4 har blitt brukt til å skrive programkode, og en JTAG ICE MKII for å overføre programkoden til mikrokontroller og debugging. Kretsskjemaene har blitt designet ved hjelp av Proteus, og kretskortene frest ut og loddet på instituttets komponentlager. For utskrivning av data over UART fra mikrokontroller til PC, ble Br@ys terminal brukt. Til slutt ble Google Sketchup brukt til å designe 3D-modeller. Et utviklingskort av typen STK500/501 fra Atmel har også blitt brukt under utviklingen av programkoden, i tillegg til testing av kommunikasjon med den ferdige prototypen.

V-modellen ble brukt som veiledning for hvilke dokumenter som skulle produseres, og har vært til stor hjelp. Produktutvikling er en iterativ prosess, så det har vært flere runder innom de forskjellige fasene i modellen.

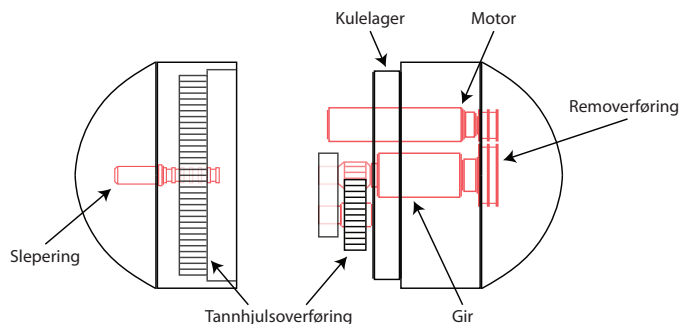
Kapittel 4

Spesifisering og toppnivå-design

Figur 4.1 viser et bilde av håndleddet bestående av to deler, en distal og en proksimal, som kan rotere i forhold til hverandre. I hver ende er det en festeanordning for hånd og underarm som kan vinkles. Snittet i figur 4.2 viser håndleddets innmat. Håndleddets to deler er satt sammen med presspasninger til et kulelager, og ved hjelp av removerføring fra motor til gir, og tannhjulsoverføring fra gir til distal side, oppnås rotasjon mellom de to delene. Total girutveksling er angitt å være 1:800. På den distale siden er det en sleperingkontakt som gjør at CAN-buss og spenningslinjer kan trekkes videre ut til distale enheter.



Figur 4.1: Håndleddet består av to halvkuler som enkelt muliggjør endring av rotasjonsaksens vinkel i forhold til underarm og hånd.



Figur 4.2: Snitt av håndleddet med mekaniske komponenter.

4.1 Teknisk spesifikasjon

Når håndleddet er satt inn i protesen, vil det måtte kommunisere med en sentral styreenhet som måler musklens EMG-signaler og oversetter disse til kommandoer som sendes til håndleddet, og eventuelt andre enheter. For en fullstendig beskrivelse av håndleddets plass i protesen, henvises det til funksjonsspesifikasjonen som finnes i vedlegg A.

Håndleddets oppgaver er følgende; ta imot meldinger fra styreenhet, eller master, og styre motoren i henhold til masterens kommandoer. Funksjonsspesifikasjonen gir krav som systemet må tilfredsstille for å kunne løse disse oppgavene, og er første skritt på veien til en fullstendig beskrivelse av hva som ønskes av det endelige systemet. Neste skritt er å lage en teknisk spesifikasjon. Til forskjell fra funksjonsspesifikasjonen som beskriver et behov, forsøker den tekniske spesifikasjonen å beskrive hvordan disse behovene skal dekket og implementeres. Den er med andre ord det første forsøket på å skissere løsningen. Den tekniske spesifikasjonen som her følger er en konkretisering av funksjonsspesifikasjonen og beskriver i nærmere detalj hvordan systemet skal se ut, og deler i større grad systemet opp i mindre deler med sine spesialiserte oppgaver.

Listen under med forkortelser refererer til krav fra funksjonsspesifikasjonen som også vil bli brukt i den tekniske spesifikasjonen for å sikre sporbarhet. I tillegg innføres noen forkortelser for referering til kravene i den tekniske spesifikasjonen.

Fra funksjonsspesifikasjon:

- WJF, Wrist Joint Function
- WSF, Wrist Servo Function
- WMF, Wrist Motor Function
- WPF, Wrist Power Function

Fra teknisk spesifikaasjon:

- MDR, Motordriver
- MMS, Måling Motorstrøm
- REG, Regulator Håndledd
- MHV, Måling Håndleddsvinkel

4.1.1 Motordriver, MDR

Følgende krav er utledet fra WMF-01, WMF-02 og WSF-01-03-01.

Krav nr.	Beskrivelse
MDR-01	Motorens turtall skal styres med PWM.
MDR-02	PWM-signalet skal ha en switchefrekvens på 20 kHz eller høyere. (Utenfor hørbart frekvensområde).
MDR-03	Motorens hall-sensorer skal kobles til mikrokontrollerens interrupt-pinner.
MDR-03-01	Interrupt-inngangene skal settes til intern pull-up.
MDR-03-02	Mikrokontrolleren skal kunne betjene alle interrupt fra hall-sensorene og kommutere motoren ved maks hastighet.
MDR-04	Motorens hastighet skal måles ved hjelp av hall-sensorene.
MDR-05	Motordriverne skal kunne levere nok strøm til at motoren kan levere tilstrekkelig med moment.

4.1.2 Måling Motorstrøm, MMS

Følgende krav er utledet fra WMF-04 og WSF-02-04-01.

Krav nr.	Beskrivelse
MMS-01	Strømmen gjennom motoren skal måles ved å koble en motstand i serie med motordriverne. Målesignalet skal lavpassfiltreres før det forsterkes. Målingen skal benyttes til: <ol style="list-style-type: none"> 1. Strømovervåkning 2. Beregning av motorens moment
MMS-01-01	Når strømmen gjennom motoren overstiger anbefalt grense, skal en transistor som forsyner motordriverne slås av.
MMS-01-01-01	En termisk simulator skal brukes for å simulere motorens termiske dynamikk.
MMS-01-01-02	En komparator skal sammenligne målesignalet med en referansespenning. Når målesignalet overstiger referansespenningen skal utgangen gå høy.
MMS-01-01-03	Komparatorens utgang skal kobles til en interrupt-pinne på mikrokontrolleren.
MMS-01-01-04	En SR-vippe skal slå transistoren av eller på. Vippa skal settes ved hjelp av en I/O-pinne på mikrokontrolleren, og resettes av komparatorens utgang.
MMS-01-02	Mikrokontrollerens interne AD-omsetter skal lese det forsterkede målesignalet og bruke dette i beregning av moment.

4.1.3 Regulator Håndledd, REG

Følgende krav er utledet fra WSF-01.

Krav nr.	Beskrivelse
REG-01	Håndleddet skal ha en P-regulator.

4.1.4 Måling Håndleddsvinkel, MHV

Følgende krav er utledet fra WJF-03 og WSF-01-02-01.

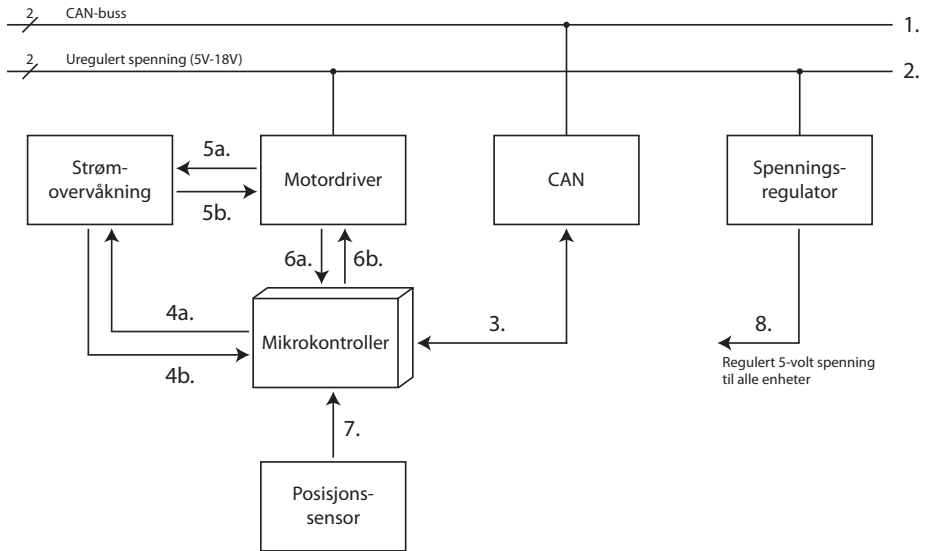
Krav nr.	Beskrivelse
MHV-01	Håndleddets vinkel skal måles med en magnetisk enkoder.
MHV-01-01	En magnet skal festes til håndleddets distale side og være plassert over enkoderen iht. dennes spesifikasjoner.
MHV-01-01-01	Magneten skal festes til sleperingen som brukes for signaloverføring til distale enheter.
MHV-01-02	Målesignal fra enkoder skal kobles til en av mikrokontrollerens pinner for måling, med så få ekstra komponenter som mulig.

4.2 Arkitekturmodell

Basert på funksjons- og teknisk spesifikasjon kan en danne seg et bilde av hvordan systemets arkitektur blir seende ut. Figur 4.3 viser maskinwarens arkitektur med piler mellom nodene for å markere informasjonsflyt.

1. CAN-buss til proksimal og distal elektronikk.
2. Uregulert batterispenning til motordriver og spenningsregulator.
3. Kommunikasjonsgrensesnitt mellom mikrokontroller og CAN-node.
4. Grensesnitt for igangsetting av motor (a), og varsling av motoravstenging og måling av motorstrøm (b).
5. Målesignal for motorstrøm (a) og kontrollsignal for transistor (b).
6. Hall-sensoravlesing (a) og kommuteringsmønster (b).
7. Posisjonsmåling.
8. Regulert spenning på 5V til alle noder.

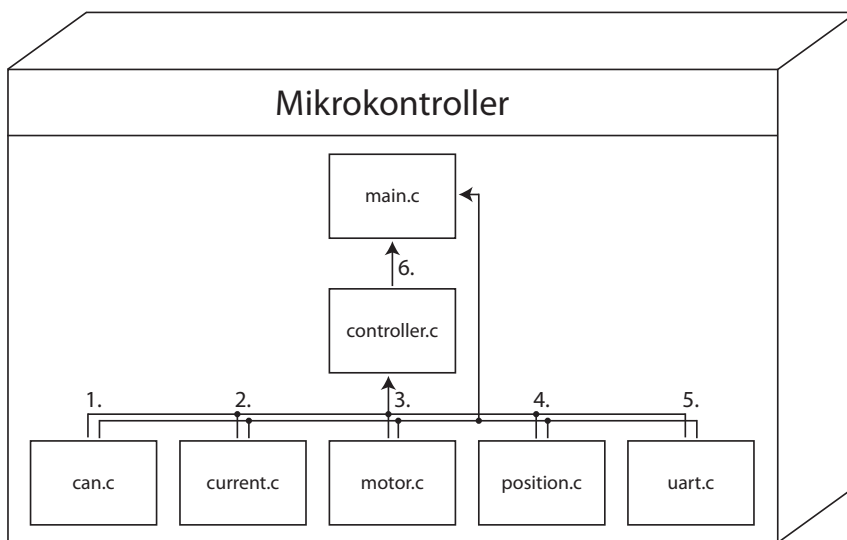
I kapittel 5 beskrives hver enkelt modul, deres virkemåte og grensesnitt i større detalj. Mikrokontrolleren vil inneholde programvare for alt fra motorkommutering



Figur 4.3: Maskinvarens arkitektur. Spenningsregulatorens utgang på 5V er koblet til alle nodene, men disse er ikke tegnet i figuren for å bedre leseligheten.

til posisjonsavlesing. Dette innebærer bruk av de andre modulene, og på samme måte som for maskinvaren, vil programvaren bli inndelt i moduler. Programvarens arkitektur er vist i figur 4.4.

1. Driver for mikrokontrollerens interne CAN-kontroller for kommunikasjon med proksimal og distal elektronikk.
2. Driver for strømovervåkning for avlesing av motorstrøm.
3. Driver for magnetisk enkoder for avlesing av håndleddsvinkel.
4. Driver for motorstyringen og grensesnitt for setting av motorhastighet.
5. Driver for mikrokontrollerens UART.
6. Grensesnitt for valg av regulatorstype og settpunkt.



Figur 4.4: Arkitektur for programvaren som kjører på mikrokontrolleren.

Kapittel 5

Moduldesign

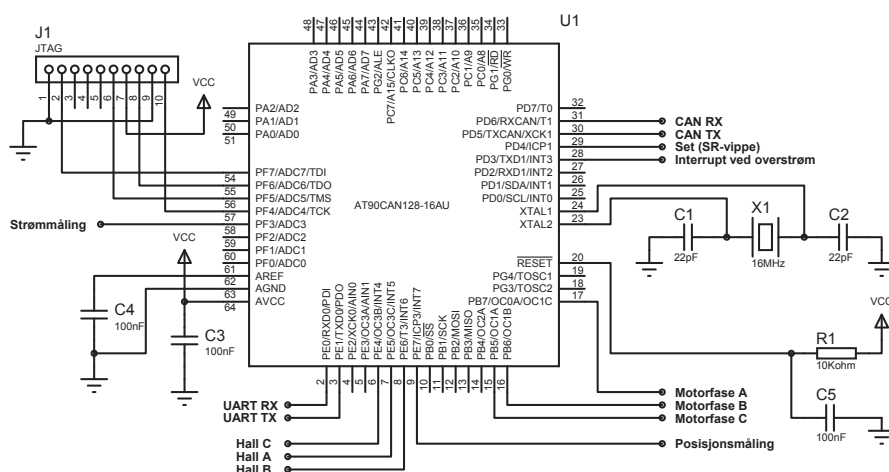
Hensikten med modularisering er å dele systemet opp i mindre deler med spesialiserte oppgaver som sammen løser systemets behov. Med et definert grensesnitt, kan modulene byttes ut med andre som tilfredsstillter grensesnittet. Sett fra et overordnet perspektiv er det da uvesentlig hvordan modulen løser sine oppgaver, så lenge den snakker samme språk som de andre. På denne måten blir det lettere å skrive programvare, og systemet blir mer oversiktlig å sette seg inn i. I dette kapitlet skal vi se på hvordan modulene løser sine tilordnede oppgaver, og hvilken informasjon som går inn og ut fra hver enkelt modul. Alle datablad til komponentene som blir brukt kan finnes i vedlegg C.

5.1 Mikrokontroller

Håndleddets programmerbare enhet er en AT90CAN128-16AU mikrokontroller fra Atmel. Denne kan kjøre på hastigheter opp til 16 MHz, og har flere funksjonaliteter som det vil være behov for. Blant annet 10-bits intern AD-omsetter og I/O-pinner med mulighet for PWM og interrupt. Det som gjør denne kontrolleren til et bedre valg enn mange andre, er at den har innebygd CAN-kontroller, noe som gjør at vi sparer mye plass på kretskortet. Mikrokontrolleren kan blant annet programmeres gjennom JTAG-grensesnittet og ved hjelp av en CAN-bootloader. Sistnevnte innebærer at programvaren kan lastes inn på mikrokontrolleren over

CAN-bussen, noe som vil si at vi kan spare ekstra plass ved å slippe behovet for konnektor til JTAG. I prototypen vil allikevel JTAG brukes på grunn av mulighetene som her finnes for debugging.

Figur 5.1 viser mikrokontrollermodulens kretsskjema med en krystall på 16 MHz og konnektor for JTAG. I tillegg brukes det resistor og kondensatorer for å gi riktig referansespenning til AD-omsetteren, og for å gi reset-pinnen en definert høy verdi som hindrer at kontrolleren resettes.



Figur 5.1: Mikrokontrollerens kretsskjema med blant annet 16 MHz krystall, konnektor for JTAG og pull-up på reset-pinnen.

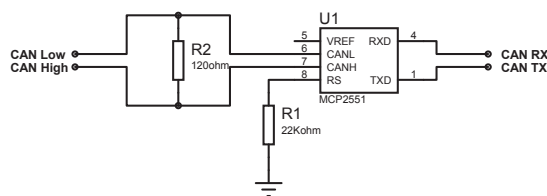
I systemet vil mikrokontrollermodulen være ansvarlig for motorstyring og kommunikasjon med distale og proksimale enheter gjennom CAN-modulen. Kommunikasjonen med andre enheter vil beskrives nærmere i neste delkapittel. I tillegg utstyres modulen med et UART-grensesnitt som vil bli brukt under testing av prototypen. Motorstyringen er behandlet i et tidligere kapittel, men i tillegg til kommutering skal mikrokontrolleren starte opp motoren ved å slå på drivspenningen. Dette gjøres gjennom et signal som sendes til strømovervåkningsmodulens SR-vippe.

5.2 CAN-modul

Kommunikasjonen mellom håndleddet og armprotesens andre enheter skal gjøres i henhold til UNB-protokollen, utviklet ved University of New Brunswick. Den er et forslag til en standardisering av kommunikasjon mellom enheter i proteser og baserer seg på CAN-meldinger. Det vil si at det er helt vanlige CAN-meldinger som går mellom nodene, men meldingsinnholdet, oppsett av arbitrering og data, gjøres etter standarden beskrevet i UNB-protokollen. For en nærmere beskrivelse av protokollen henvises det til [1] og [6].

Som nevnt har den valgte mikrokontrolleren innebygd CAN-kontroller, men for å gi et grensesnitt fra denne til den fysiske bussen, trenger vi en CAN-transceiver. Den valgte transceiveren er en MCP2551 fra Microchip som kan operere med overføringshastigheter opp til 1 Mb/s. Modulen vil ha to bidireksjonelle grensesnitt; ett mot CAN-bussen i overensstemmelse med ISO 11898-standard, og ett mot mikrokontrolleren i overensstemmelse med UNB-protokollen.

Som kretsskjemaet i figur 5.2 viser, kobles to motstandere til transceiveren. Den ene, på 120Ω , er en termineringsmotstand som må plasseres i hver ende av bussen. Under testing vil prototypen være en endenode. Motstanden på $22k\Omega$ er for “slope-kontroll”. Den vil hjelpe til med å redusere mengden støy generert av rask switching på bussen. Ulempen er at overføringshastigheten blir lavere, men i denne prototypen anses høy hastighet som et sekundært krav og en lavere hastighet på 125 kb/s vil bli brukt.



Figur 5.2: Kretsskjema for CAN-modulen. Termineringsmotstanden på 120Ω fjernes hvis håndleddet ikke er siste node på bussen.

5.3 Motordriver

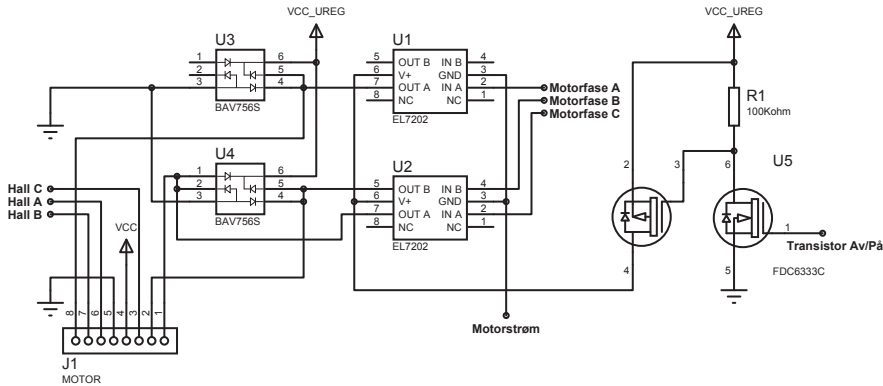
Siden mikrokontrolleren ikke kan gi nok strøm eller spenning til å drive motoren, vil det være behov for en MOSFET-driver. Den valgte driveren er ikke-inverterende av typen EL7202 fra Intersil som kan levere strømmer opp til 2A. Ikke-inverterende vil si at et høyt signal på inngangen vil gi et høyt signal på utgangen med samme spenning som driverens source-spenning. Hver driverbrikke har to kanaler, noe som betyr at det vil være behov for to brikker for å styre motorens tre faser.

Når motoren snurrer vil den motinduserte spenningen som genereres forsøke å presse strøm gjennom transistorkoblingene. Når transistorene er lukket, vil denne strømmen ødelegge driverne. Derfor er det behov for friløpsdioder som kan lede denne strømmen vekk fra MOSFET-ene. De valgte diodene er av typen BAV756S fra NXP Semiconductors.

For å kunne gi analoge spenninger fra motordriverne, vil styresignalet fra mikrokontrolleren pulsbreddemoduleres. Bruk av PWM til motorstyring regnes som kjent stoff, og forklares ikke videre. For å hindre at PWM-signalet genererer hørbare lyder som følge av switchingen, velges en switchefrekvensen på 20 kHz som ligger i enden av det hørbare frekvensområdet.

En MOSFET kobles inn i kretsen for å kunne bruke maskinvare til å stenge av motoren. Denne må kobles på driverkretsens positive side for at ikke MOSFET-ens resistans skal forstyrre strømmålingen på driverens negative side. Av denne grunn må en N&P-kanals MOSFET brukes.

Figur 5.3 viser motordrivermodulens kretsdiagram. Modulen har 4 grensesnitt; signal fra hall-sensorer og motorstrøm som er utganger, og signal for motorfaser og kontrollsignal for transistor som er innganger. Høyt signal på inngangen av MOSFET-en, vil få den til å lede, mens et lavt signal vil få den til å stenge. Motorfasene er som tidligere nevnt pulsbreddemodulerte signaler med switchefrekvens på 20 kHz. Signal fra hall-sensorene angir rotorens posisjon, og må kobles til pull-up-motstander for å kunne avleses. Ved å sette mikrokontrollerens innganger til intern pull-up, kan sensorene kobles direkte til kontrolleren uten bruk av ekstra komponenter. Motorstrømmen kobles til en målemotstand, om det skulle være nødvendig å måle hvor mye strøm som går gjennom motoren.



Figur 5.3: Kretsskjema for motordriverens modul. MOSFET-en brukes for å kutte forsyningsspenningen hvis nødvendig.

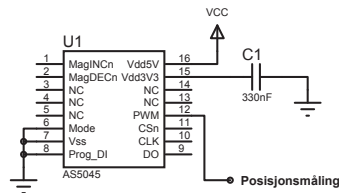
Hvis ikke kan den kobles til jord, og kontrollsignalet for transistoren settes høyt.

5.4 Posisjonsmåling

For å holde rede på hvordan håndleddets to deler står plassert i forhold til hverandre, er det behov for en posisjonssensor. En magnet med en feltvektor vinkelrett på håndleddets rotasjonsakse skal festes til den distale delen, og på proksimal side skal en magnetisk enkoder benyttes. Enkoderen er av typen AS5045, en 12-bits enkoder fra Austriamicrosystems som genererer et PWM-signal hvor positiv bredde endrer seg med vinkelen på den magnetiske feltvektoren. PWM-signalet har en periode på $4097\mu\text{s}$, frekvens på 244 Hz, og positiv bredde kan variere fra $1\mu\text{s}$ til $4096\mu\text{s}$. Det er mulighet for å halvere frekvensen, noe som doubler lengden av den positive bredden. Men prosedyren for å sette enkoderen i en slik modus er såpass kompleks at det ikke blir gjort i denne prototypen.

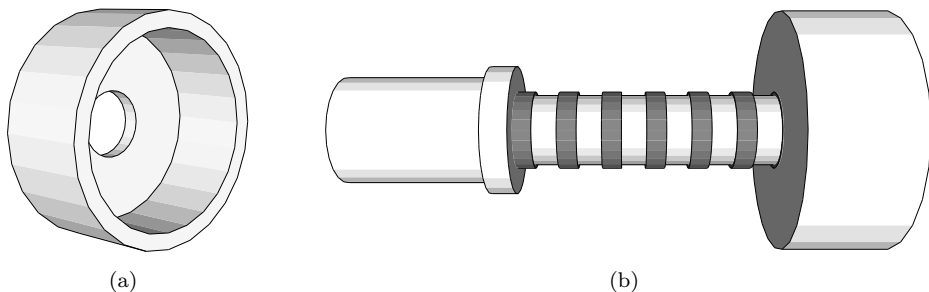
Målesignalet ut fra enkoderen kan avleses på to måter. Ved å lavpassfiltrere PWM-signalet kan målingen avleses som en analog verdi av mikrokontrollerens interne AD-omsetter. Det andre alternativet er å bruke mikrokontrollerens Input Capture. Når et signal tilkoblet en inngang med støtte for dette genererer et interrupt, kan en teller avleses. Når verdien på inngangen igjen genererer et

interrupt, avleses telleren på nytt og lengden på signalet kan beregnes ved å finne differansen mellom tidsstemplene. Sistnevnte er det alternativet som vil bli valgt siden alt gjøres i mikrokontrollerens programvare, og dermed krever færrest komponenter. Figur 5.4 viser posisjonsmålingsmodulens kretsskjema med posisjonsmålingen som eneste utgangssignal.



Figur 5.4: Posisjonsmålingsmodulen med magnetisk enkoder. Når 5V-operasjon benyttes, må en kondensator kobles mellom pinne 15 og jord.

Det eneste problemet som da gjenstår er å feste magneten til håndleddets distale side. Den beste plassen å feste magneten er til enden av sleperingkontakten. Siden lim ikke hefter til magnetens overflate, må det designes en holder som forener magneten med sleperingkontakten ved hjelp av presspasninger. Figur 5.5 viser en slik holder. Holderen er dimensjonert etter magnetens og sleperingkontaktens mål. Holderens dimensjoner finnes i vedlegg B.



Figur 5.5: Holder for magnet til posisjonsmåling. Magnetten festes til holderen som igjen festes til sleperingkontaktens ende. Alt ved hjelp av presspasninger.

5.5 Strømovertvåkning

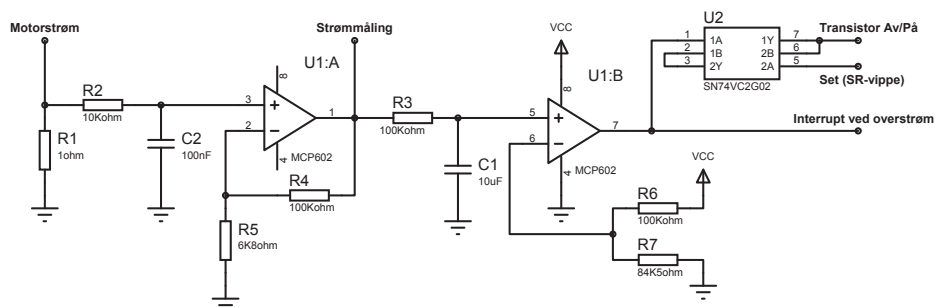
Måling av motorstrøm er nødvendig av to grunner. For å kunne regulere motorens moment er det behov for en slik måling, siden momentet er proporsjonalt med motorstrømmen. Dersom det går for mye strøm gjennom motorens spoler, vil temperaturen stige og motoren kan bli ødelagt. Derfor er det viktig å kunne måle strømmen slik at motoren kan slås av før den kommer så langt. Ved å koble en motstand i serie med motordriverne, kan spenningen over denne, og dermed motorstrømmen, måles. Målemotstandens størrelse kan ikke være for stor, siden dette vil føre til at mer spenning “stjeles” fra motoren. Samtidig må den ikke være for liten da spenningen vil bli for lav til å kunne måles nøyaktig. I funksjonsspesifikasjonens krav WPF-02 ønskes det at det totale systemet, og da også motoren, skal kunne kjøre på spenninger opp mot 18V. Av motorens datablad [2] kan en finne at resistansen i en spole er 59Ω , noe som vil si at den maksimale strømmen gjennom motoren er:

$$I_{maks} = \frac{U_{maks}}{R} = \frac{18V}{59\Omega} = 305mA$$

Målemotstanden velges til å være 1Ω . Figur 5.6 viser kretsskjema av modul for strømovertvåkning med målemotstanden i venstre bildekant. Motorstrømmmålingen vil oscillere med 20 kHz fra motordriverens PWM-signal. For å fjerne dette filtreres målesignalet med et lavpassfilter. Vi ønsker så liten tidsforsinkelse som mulig siden det filtrerte signalet skal brukes i momentreguleringen. Derfor brukes et filter med så liten tidskonstant som mulig, men som kan glatte ut frekvensene på 20 kHz. Et filter bestående av en motstand på $10k\Omega$ og en kondensator på $100nF$ vil tilfredsstillе begge kravene, og gir en tidskonstant på:

$$\tau = R \cdot C = 10 \cdot 10^3\Omega \cdot 100 \cdot 10^{-9}nF = 1ms$$

Forsterkerkretsen er bygd opp rundt en operasjonsforsterker, op-amp, av typen MCP602 fra Microchip. Den har to op-amper på samme brikke, hvor den ene brukes som ikke-inverterende forsterker til strømmmålingen. Den andre op-ampen brukes senere som komparator. Forsterkningen må tilpasses slik at inngangsverdi-er opp mot 305mV kan håndteres uten at forsterkeren går i metning, men samtidig



Figur 5.6: Kretsskjema for strømovertvåkingsmodulen. Operasjonsforsterkerene finnes på samme brikke, og SR-vippa bygges opp av to NOR-porter.

gi maksimal oppløsning. Ved å velge motstandsverdier på $100\text{k}\Omega$ og $6,8\text{k}\Omega$, fås en forsterkning på:

$$A_{forsterker} = 1 + \frac{100 \cdot 10^3 \Omega}{6,8 \cdot 10^3 \Omega} \approx 15,7$$

Verdien ut fra forsterkeren kan så sendes til mikrokontrollerens interne AD-omsetter for å bli brukt i momentreguleringen.

Hadde det vært nok å bruke programvare for å hindre overoppheting av motoren, kunne vi stoppet her. Men siden dette skal gjøres av maskinvaren må strømmålingen behandles videre. Neste skritt er å sende målingen inn på positiv inngang på en komparator hvor den sammenlignes med en spenning tilsvarende maksimalt tillatt motorstrøm. Denne kan finnes ved hjelp av ligning 5.2 som gir maksimal motorstrøm til å være 145mA . Se utregning lenger ned. Dette tilsvarer en spenning ut fra forsterkeren på:

$$0,145\text{A} \cdot 1\Omega \cdot A_{forsterker} = 2,28\text{V}$$

Med en spenningsdeling mellom motstandere på $R6 = 100\text{k}\Omega$ og $R7 = 84,5\text{k}\Omega$, fås en referansespenning på $2,29\text{V}$. Ved å sette denne inn på komparatorens negative inngang, kan vi når motorstrømmen blir for høy få generert et interrupt til mikrokontrolleren for å si ifra om at motoren slås av. Det samme signalet brukes til å resette en SR-vippe hvis utgang er koblet til transistoren i motor-

drivermodulen. Utgangen går lav, transistoren stenger og motoren stopper. For å starte opp motoren igjen, må mikrokontrolleren “sette” vippa på nytt. For å lage en SR-vippe trengs to NOR-porter som kobles sammen, og SN74LVC2G02 fra Texas Instruments passer perfekt.

Det er imidlertid viktig å merke seg at temperaturen i motoren ikke vil nå kritisk nivå med en gang motorstrømmen når 145mA. Den er gitt av en termisk tidskonstant som forteller hvor lang tid det tar for temperaturen å nå 63% av endelig verdi. For å kunne tillate motoren å akselerere, noe som vil kreve mer strøm, må vi finne en måte å hindre at SR-vippa blir resatt med en gang motorstrømmen overstiger 145mA. Dette kan gjøres ved å sende målesignalet gjennom et filter som simulerer motorens termiske dynamikk. Motorspolene ligger helt inn til motorhuset og kan antas å ha samme termiske tidskonstant, som i motorens datablad finnes å være $\tau = 1s$. Ved å velge filterkomponenter med verdi $R = 100k\Omega$ og $C = 10\mu F$ kan vi matche denne tidskonstanten:

$$\tau = R \cdot C = 100 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 1s,$$

og filterets utgang vil bruke like lang tid på å nå 2,28V som temperaturen i motoren bruker på å nå sin maksimumsverdi.

Utregning av maksimumsstrøm kan gjøres med følgende ligning hentet fra motorprodusentens tekniske informasjonshefte [3], som gjelder ved kontinuerlig operasjon:

$$I_{max} = \sqrt{\frac{T_{125} - T_{22} - \frac{\pi}{30000} \cdot n \cdot \epsilon \cdot R_{th2} \cdot (C_o + C_v \cdot n)}{R \cdot (1 + \alpha_{22} \cdot (T_{125} - T_{22})) \cdot (R_{th1} + \epsilon \cdot R_{th2})}} \quad (5.1)$$

hvor

T_{125} = maksimalt anbefalt temperatur (125 grader Celsius) [K]

T_{22} = omgivelsestemperatur (22 grader Celsius) [K]

n = rotasjonshastighet [rpm]

R_{th1} = termisk resistans mellom spoler og motorhus [K/W]

R_{th2} = termisk resistans mellom motorhus og luften rundt [K/W]

ϵ = reduksjon av R_{th2} som følge av tiltak for kjøling (mellom 0 og 1)

C_o = statisk friksjonsmoment [mNm]

C_v = dynamisk friksjonsmoment [mNm/rpm]

R = resistans i spoler [Ω]

α_{22} = temperaturkoeffisient [K^{-1}]

Fra ligningen er det to verdier som kan bestemmes, n og ϵ . Som eksempel har motorprodusenten satt $\epsilon = 0,45$. Siden motoren skal settes i en aluminiumsblokk, som har god varmeledningsevne, bruker også vi denne verdien. Reduksjon av rotasjonshastighet vil føre til at ligningens teller blir større, noe som igjen gir større maksstrøm. Motorens datablad gir rotasjonshastighet uten last til å være 35600 rpm. Med alle verdiene innsatt i ligning 5.1, får vi følgende uttrykk:

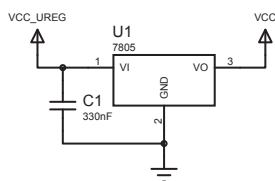
$$I_{max} = \sqrt{\frac{398 - 295 - \frac{\pi}{30000} \cdot 35600 \cdot 0,45 \cdot 88 \cdot (0,023 + 1 \cdot 10^{-6} \cdot 35600)}{59 \cdot (1 + 0,004 \cdot (398 - 295)) \cdot (14 + 0,45 \cdot 88)}} \quad (5.2)$$

$$I_{max} \approx 145mA$$

5.6 Spenningsregulator

Systemets elektronikk er avhengig av å ha en konstant drivspenning for å kunne fungere. En spenningsregulator benyttes til dette. Siden denne prototypen ikke vil ha samme krav til strømforbruk som det endelige systemet som skal settes inn i en protese, velges en lineær spenningsregulator. Denne er svært billig og lite kompleks, men ikke fullt så effektiv som for eksempel en switcheregulator. En

spenningsregulators effektivitet forteller hvor mye av energien som puttes inn som kommer ut. Spesielt i applikasjoner som en protese, ønsker en å bruke lite strøm slik at batteriet kan vare lengst mulig. Ulempen med å bruke en switcheregulator er at det er behov for en del tilleggskomponenter som tar plass og koster mer. Men siden dette er til en prototyp som ikke skal drives av batteri, brukes en lineærregulator for å gjøre designet så enkelt som mulig. Regulatoren er av typen MC7805 fra ON Semiconductors og kan ses i kretsskjemaet i figur 5.7.



Figur 5.7: Spenningsregulatormodulens kretsskjema.

5.7 Modulenes grensesnitt

Hver modul har som beskrevet et grensesnitt opp mot de andre modulene. Tabell 5.1 viser en samlet oversikt over alle signalene som passerer mellom modulene, og deres spesifikasjoner. I tillegg tar spenningsregulator og motordriver inn den uregulerte spenningen.

Tabell 5.1: Signaler som passerer mellom modulene og deres spesifikasjoner. Modulene kan byttes ut med andre så lenge de har samme grensesnitt.

Signaltype	Fra	Til	Spesifikasjoner
Set (SR-vippe)	Mikrokontroller	Strømovervåkning	Digitalt signal (0-5V)
Motorfaser	Mikrokontroller	Motordriver	PWM (20 kHz)
CAN-kommunikasjon	Mikrokontroller	CAN	Iht. UNB-protokollen
Hall-sensorer	Motordriver	Mikrokontroller	Digitalt signal (0-5V)
Motorstrøm	Motordriver	Strømovervåkning	Analogt signal (0-305mA)
Strømmåling	Strømovervåkning	Mikrokontroller	Analogt signal (0-5V)
Interrupt ved overstrøm	Strømovervåkning	Mikrokontroller	Digitalt signal (0-5V)
Transistor Av/På	Strømovervåkning	Motordriver	Digitalt signal (0-5V)
Posisjonsmåling	Posisjonsensor	Mikrokontroller	PWM (244 Hz, positiv bredde 1-4096 μ s)
CAN-kommunikasjon	CAN	Mikrokontroller	Iht. UNB-protokollen
CAN-kommunikasjon	CAN	Eksterne enheter	ISO 11898
Regulert spenning	Spenningsregulator	Alle noder	5V, opptil 1A

Kapittel 6

Implementasjon

6.1 Maskinvare

For å gjøre testing av prototypen så enkel som mulig, har systemets moduler blitt lagt ut på flere kretskort som deretter kan stables oppå hverandre. På denne måten kan hver enkelt modul tas ut av systemet for testing. Alle signaler som passerer mellom modulenes kretskort er listet i tabell 6.1. Hvert kretskort har også en trykknapp for å resette mikrokontrolleren. Kretskortene ble frest ut og badet i sur-tinn før komponentene ble loddet fast. For å spare så mye plass som mulig, er samtlige komponenter med unntak av spenningsregulator, trykknapper og krystall overflatemonterte. For å filtrere bort støy i IC-enes forsyningsspenning, brukes avkoblingskondensatorer på 100nF. Alle modulenes kretsskjemaer og komponentlister er å finne i vedlegg B.

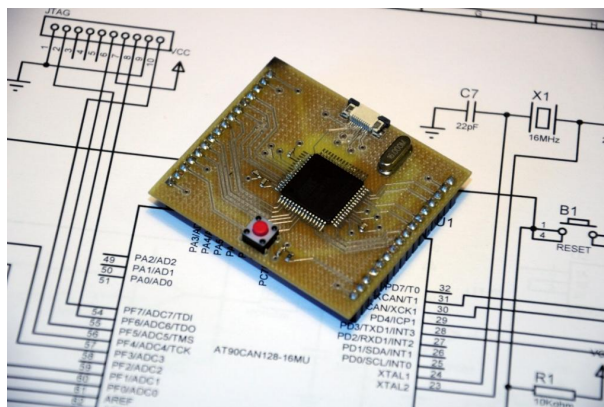
6.1.1 Mikrokontrollermodul

AT90CAN128-16AU er tilgjengelig i to størrelser; QFN- og TQFN-pakke, hvor QFN-pakken er den minste. I det endelige systemet som skal settes inn i håndledet vil QFN være det opplagte valget, men i denne oppgaven er vi bare ute etter å teste “the proof of concept”. Derfor velges den noe større TQFN-pakken siden denne vil forenkle opploddingen. Mikrokontrollerens modul kan ses avbildet

Tabell 6.1: Oversikt over hvilke signaler som går på kretskortenes konnektor J1 og J2 (iht. kretsskjemaene i vedlegg B).

J2	Signaltype	J1	Signaltype
1	VCC (5V)	1	VCC_UREG (5-18V)
2	GND	2	VCC (5V)
3	Motorstrøm	3	CAN RX
4	Strømmåling	4	CAN TX
5	CAN Low	5	Transistor Av/På
6	CAN High	6	Set (SR-vippe)
7	UART RX	7	Reset (SR-vippe)
8	UART TX	8	Motorfase A/OC1C
9		9	Motorfase B/OC1B
10	Hall C/INT4	10	Motorfase C/OC1A
11	Hall A/INT5	11	
12	Hall B/INT6	12	
13	Reset	13	
14	Posisjonsmåling/ICP3	14	
15	VCC (5V)	15	VCC (5V)
16	GND	16	GND

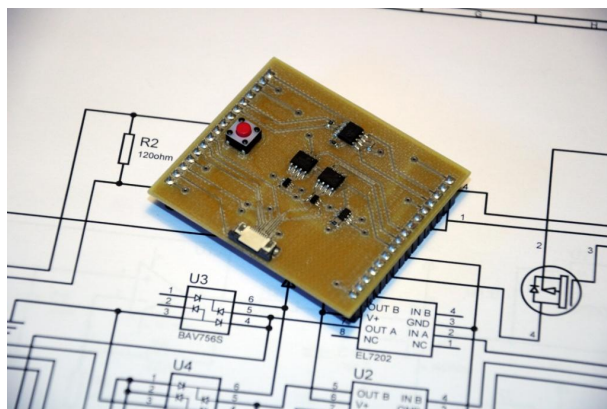
i figur 6.1. CAN-bussens to linjer er koblet til mikrokontrollerens interne AD-omsetter gjennom 0Ω motstander som kan loddes opp dersom analoge signaler istedet for CAN-meldinger skal brukes til styring.



Figur 6.1: Mikrokontrollermodul med AT90CAN128 og konnektor for JTAG.

6.1.2 Motordriver- og CAN-modul

Siden CAN-modulen ville tatt så liten plass på et kort alene, ble den satt på samme kort som motordrivermodulen. Fra modulenes kretsskjemaer i delkapittel 5.2 - 5.3 er det ikke gjort noen endringer. Det ferdige kretskortet kan ses i figur 6.2. En 10-pols FFC/FPC-konnektor brukes for overføring av motorens signaler til håndledet og målingen fra magnetisk enkoder.



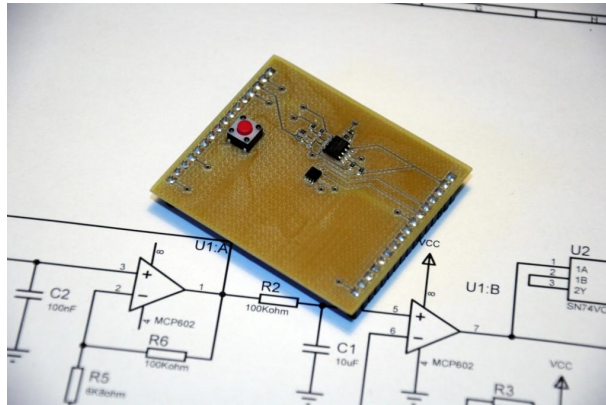
Figur 6.2: Motordriver- og CAN-modul med konnektor for håndledd.

6.1.3 Strømovertvåkningsmodul

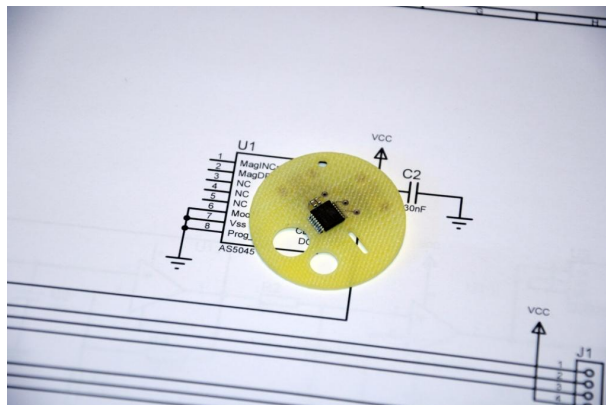
Fra strømovertvåkningsmodulens kretsskjema i delkapittel 5.5 er det ikke gjort noen endringer. Det ferdige kretskortet er vist i figur 6.3.

6.1.4 Posisjonsmålingsmodul

Dette er det eneste kretskortet som har blitt laget for å settes inn i håndledet. I tillegg til den magnetiske enkoderen er det to FFC/FPC-konnektorer, en 8-pols for tilkobling av motor, og en 10-pols til motordriver- og CAN-modulens kretskort. En 10-pols FFC-kabel koblet til sistnevnte konnektor leverer forsyningsspenning til posisjonsmålingsmodulen, sammen med motorens styresignaler. Kretskortet er avbildet i figur 6.4, og oppkobling med håndledet i figur 6.5.

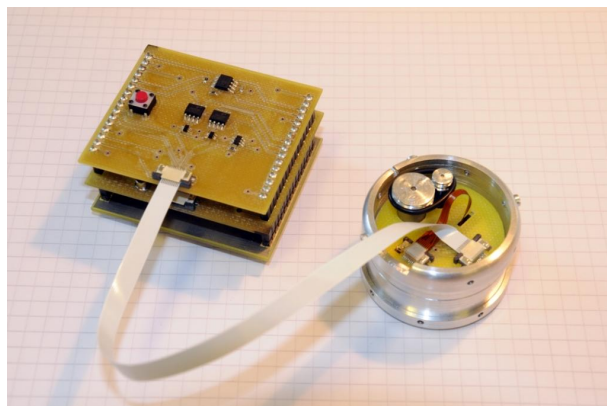


Figur 6.3: Strømovervåkningsmodul.



Figur 6.4: Posisjonsmålingsmodul med åpninger for gjennomføring av motor og gir.

Siden det i denne prototypen ikke har vært nødvendig å føre forsyningsspenning og CAN-buss videre til distale enheter, har ikke sleperingskontakten blitt brukt. For å feste magneten for måling av håndleddets vinkel, ble holder og en erstatning for sleperingskontakten frest ut av verkstedet i ett stykke aluminium.



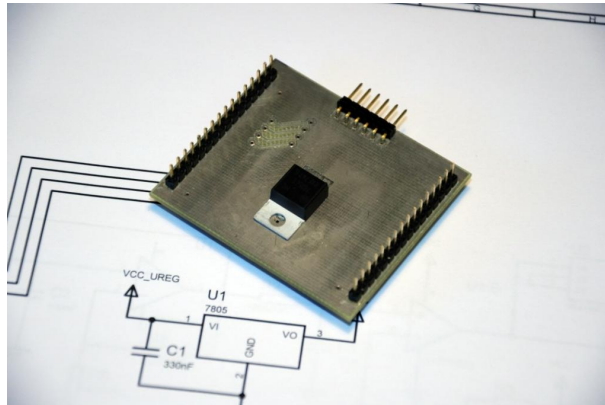
Figur 6.5: Posisjonsmålingsmodulen tilkoblet håndleddet. På håndleddets kretskort er det to konnektorer. En for tilkobling til resten av prototypen, og en for tilkobling av motoren.

6.1.5 Spenningsregulatormodul

For å samle alle ledere på en plass, er konnektorene for uregulert forsyningspenning, CAN-buss og UART samlet på spenningsregulatormodulens kretskort. Under testing vil et utviklingskort av typen STK500/501 fra Atmel simulere proksimal elektronikk og kommunisere over CAN-bussen. UART-en går også til utviklingskortet hvor signalene føres inn på en “level-converter” og videre inn på PC-ens serielle port. Siden spenningsnivået i RS-232-protokollen ligger på -15V til 15V, brukes level-converteren for å øke spenningen på signalene fra mikrokontrolleren, og redusere spenningen på signalene fra PC-en. Kretskortet for spenningsregulatormodulen er vist i figur 6.6.

6.2 Programvare

Systemets programvare er i likhet med maskinvaren delt opp i moduler, og er samlet i vedlegg C. Programkode som har tilknytning til maskinvarens moduler, har blitt gitt samme navn som modulen for å gjøre systemet så oversiktlig som mulig. Hver kodefil med tilknytning til maskinvare, har en initialiseringsfunksjon som kjøres ved systemets oppstart for å sette opp mikrokontrolleren til å bruke



Figur 6.6: Spenningsregulatormodul med konnektor for tilkobling av UART og CAN.

denne. Når alle maskinvaremodulene snakker sammen, skal håndledet koble seg til den proksimale master-enheten. Denne oppkoblingen gjøres i henhold til UNB-protokollen og et forslag til dette er gitt i [1], men er ikke implementert i denne oppgaven. Etter initialisering går programmet inn i en uendelig løkke. Systemets programvare er illustrert ved hjelp av et sekvensdiagram i figur 6.7.

6.2.1 Regulator

Funksjonsspesifikasjonen nevner følgende regulator typer som skal implementeres; av/på-, hastighets- og posisjonsregulator. Bare de to første har blitt implementert i denne oppgaven. Hver av regulatorene må ha sin egen programfunksjon. For å gjøre programkoden så kompakt og oversiktlig som mulig har det blitt definert en “standardfunksjon”. Når en regulator type velges, vil regulatorens funksjon knyttes til denne standardfunksjonen slik at main-funksjonen alltid gjør samme kall uavhengig av hvilken regulator type som er valgt.

Et problem som kan oppstå etter hvert som protesens batteri tappes, er at regulatoren blir tregere. For å bøte på lavere batterispennning, må regulatorparametrene endres. Dette tenkes gjort av den proksimale elektronikken som kan overvåke batterispenningen, og beregne nye parametre som deretter sendes over CAN-bussen.

6.2.2 Interrupt

Sammen med main-metodens uendelige løkke, er det i alt fem andre prosesser som kan kreve kjøretid fra prosessoren. Begrepet prosess vil i denne sammenheng være en handling som settes igang av et interrupt, med andre ord en interrupt-rutine. De fem prosessene er:

- Motorkommutering
- CAN-kommunikasjon
- Overstrømsinterrupt
- Posisjonsmåling
- Motorhastighet

I interrupt-rutinen for motorens hall-sensorer skal nytt kommuteringsmønster settes ut, alt etter hvordan rotorens posisjon er. Dette gjøres ved hjelp av kall til funksjoner i motor.c. Se figur 6.8 for prosessens sekvensdiagram. For én av de seks mulige hall-avlesingene, itereres en lokal variabel som brukes til å telle antall rotasjoner, og da beregne motorens hastighet. Hall-sensorene er koblet til tre interrupt-pinner på mikrokontrolleren, og hver pinne har sin egen interrupt-rutine som kan ses på som én interrupt-rutine siden de gjør akkurat det samme og aldri vil overlapse hverandre. Hver sensor vil generere et interrupt to ganger per rotasjon, noe som vil si seks interrupt per rotasjon. Ved maksimal hastighet vil motoren rotere med maks 36000 omdreininger i minuttet, noe som betyr at det vil genereres:

$$\frac{36000 \text{ rotasjon/min} \cdot 6 \text{ interrupt/rotasjon}}{60 \text{ sek/min}} = 3600 \text{ interrupt/sek} \quad (6.1)$$

Prosessen som håndterer CAN-kommunikasjon kjøres hver gang det mottas en melding over CAN-bussen. Hvor ofte en melding mottas er det vanskelig å si noe om, men en antagelse på 1 melding per sekund i snitt regnes som fornuftig.

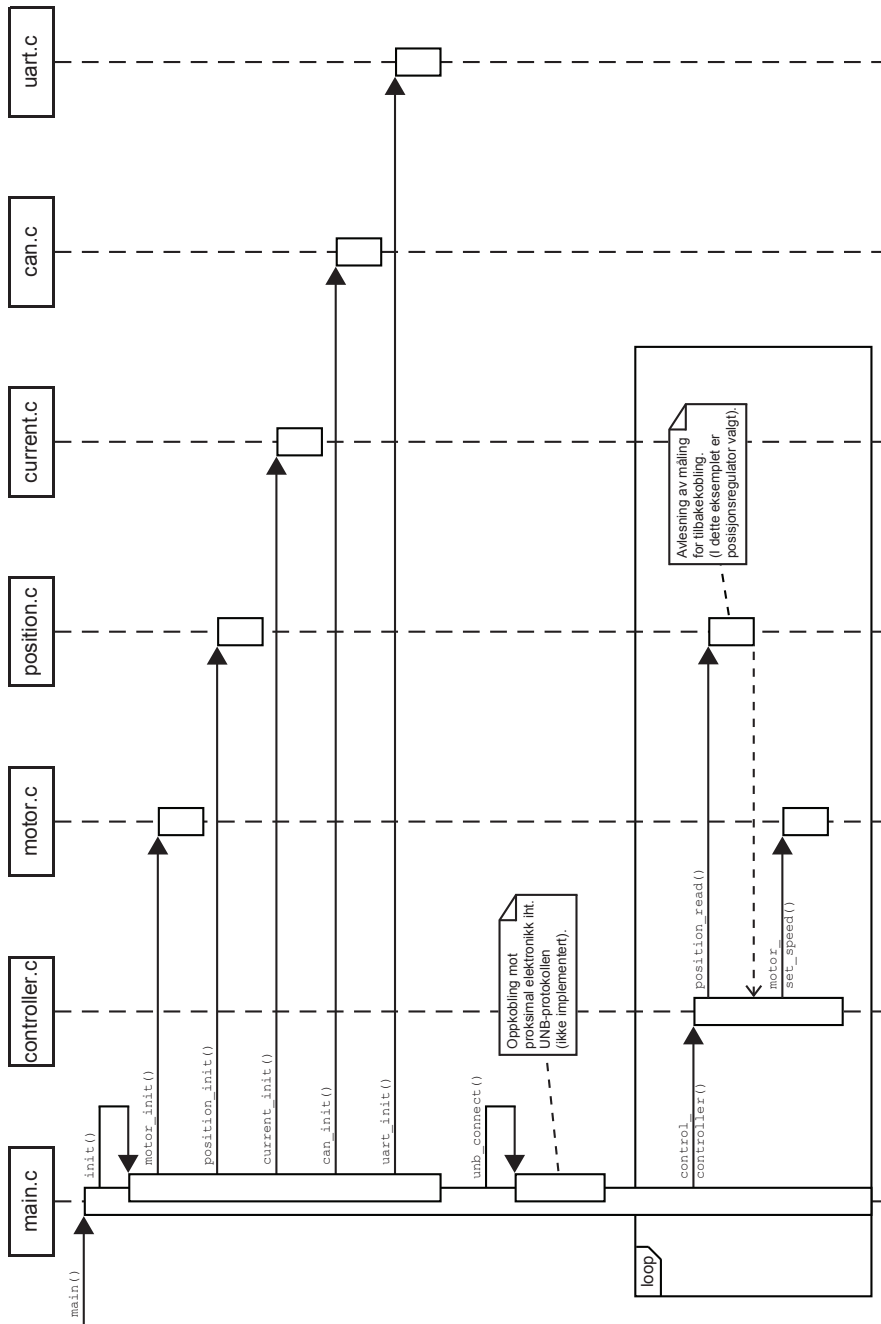
Håndteringen av et slikt interrupt går ut på å lese av registrene i mikrokontrolleren hvor meldingens innhold blir lagret, og kalle en funksjon i `control.c` basert på meldingens ID, se figur 6.9.

Når motoren trekker for mye strøm, vil strømovervåkningsmodulens komparator generere et interrupt. Den påfølgende prosessen vil slå av motoren og vente, for eksempel ett sekund, før motoren startes opp igjen ved å sette SR-vippa på nytt. Dette er forhåpentligvis en hendelse som inntreffer svært sjelden, så i forhold til en beregning av mikrokontrollerens ressursbruk vil ikke dette interruptet ha noen betydning. Se figur 6.10 for interrupt-håndtering. Av kommunikasjon til programvarens andre moduler, vil `motor.c`, `current.c` og `util/delay` brukes.

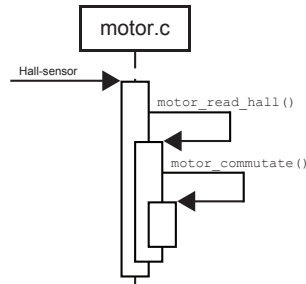
Den magnetiske enkoderen, som brukes for å måle håndleddsvinkel, gir ut et PWM-signal som skal måles. Dette er koblet til en av mikrokontrollerens pinner som har støtte for Input Capture. Når signalet endrer seg fra lavt til høyt, genereres et interrupt som leser av et tidsstempel. Når signalet igjen går lavt, genereres et nytt interrupt og tidsstempelet avleses på nytt og signalets positive flanke kan beregnes. I løpet av PWM-signalets periode, som er $4097\mu\text{s}$, genereres det da to interrupt. Det vil si ett interrupt per 2ms, altså 500 interrupt/sekund. Denne prosessen vil ikke gjøre noen funksjonskall, men kun manipulere lokale variabler i `position.c`.

Den siste prosessen som kjører er en timer som genererer et interrupt hvert tidels sekund. Når ti slike interrupt har inntruffet, det vil si hvert sekund, oppdateres en variabel som holder rede på hvor mange rotasjoner motoren har gjort det siste sekundet. Altså 10 interrupt/sekund. I likhet med prosessen over, vil heller ikke denne gjøre funksjonskall, men kun manipulere lokale variabler. Denne gang i `motor.c`.

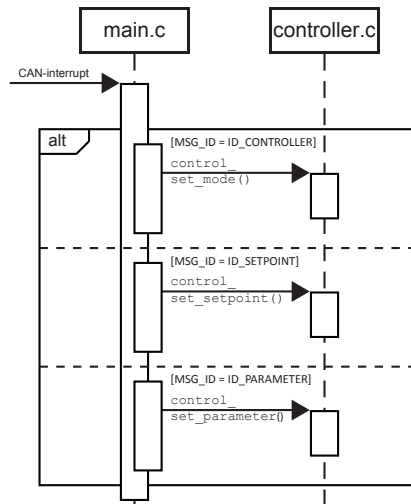
Hvordan alle systemets prosesser opererer er vist i kommunikasjonsdiagrammet i figur 6.11.



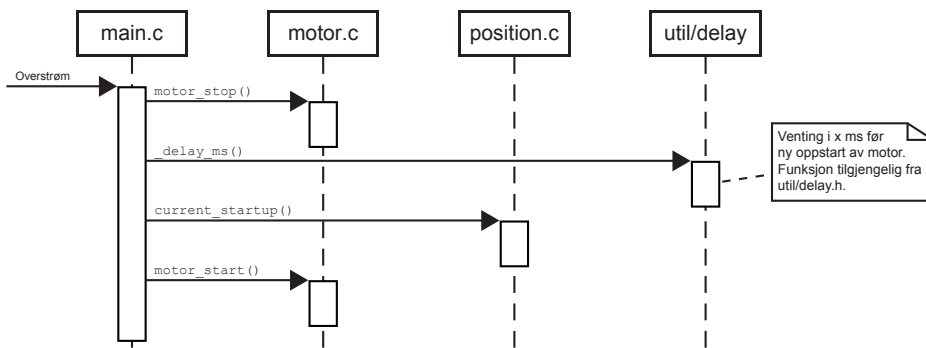
Figur 6.7: Sekvensdiagram for systemets normale drift.



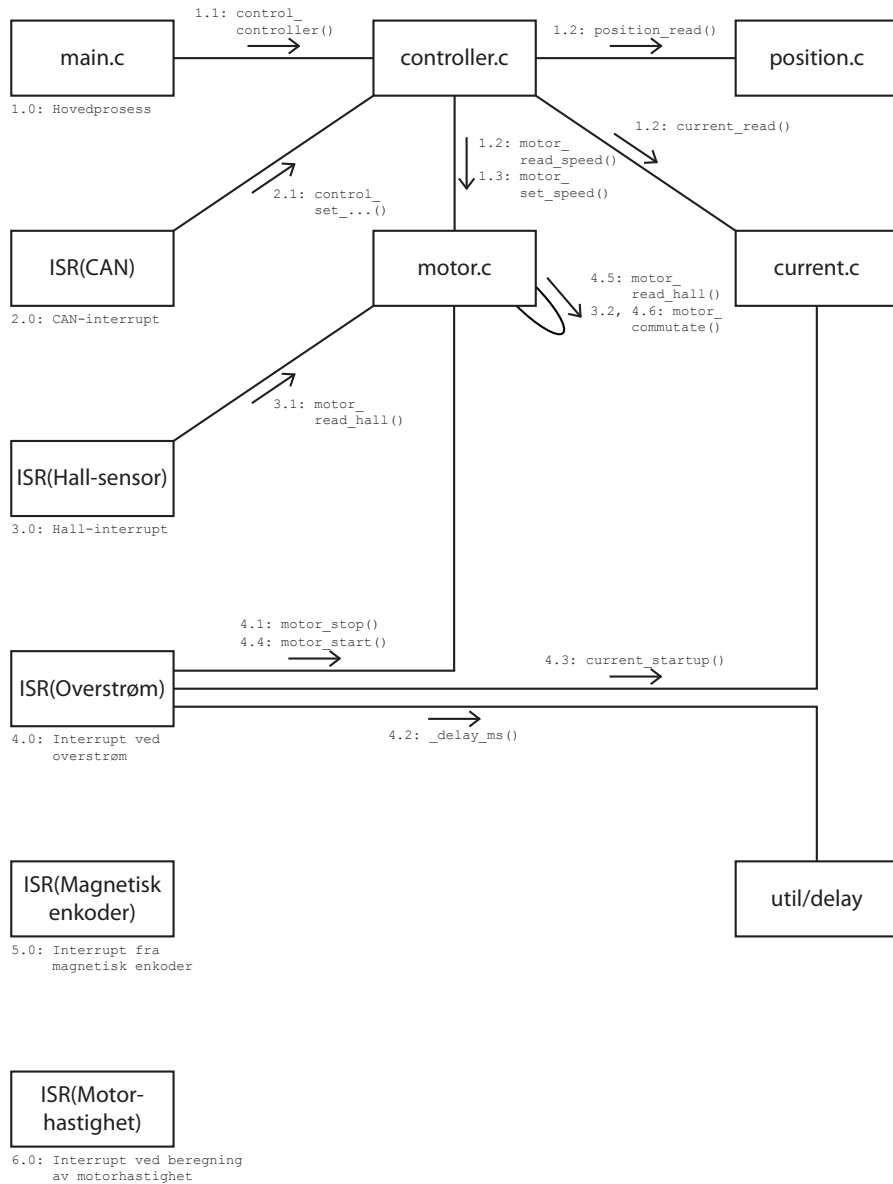
Figur 6.8: Sekvensdiagram for håndtering av interrupt fra hall-sensorer.



Figur 6.9: Sekvensdiagram for håndtering av interrupt generert ved mottak av melding på CAN-buss.



Figur 6.10: Sekvensdiagram for håndtering av interrupt ved overstrøm.



Figur 6.11: Kommunikasjonsdiagram for kjøring av systemets seks prosesser. Prosessene 5.0 og 6.0 utfører bare manipulering av variabler i henholdsvis position.c og motor.c. I 1.2 kalles den funksjonen som er nødvendig for valgt regulator.

Kapittel 7

Testplaner og testing

Følgende delkapitler har fått navn som samsvarer med testplanene fra V-modellen i figur 1.2. Referering til pinner på kretskortenes konnektorer vil gjøres på følgende måte: Jx,y, hvor x angir konektor, og y angir pinnennummer jfr. tabell 6.1. Testene med kjøring av motor er gjort uten strømovervåkningsmodulen.

7.1 Testplan A

Hva testes: WMF-01	Utført: OK
Beskrivelse av test: Med motoren satt inn i håndleddet skal maksimal hastighet måles. Dette skal gjøres ved å sette et merke på distal og proksimal del av håndleddet. Motorens pådrag skal settes til maksimum, og tiden det tar for håndleddet å gjøre 10 rotasjoner skal måles.	
Beskrivelse av testoppsett: To teipbiter med en strek på, en på hver del av håndleddet, brukes for å telle rotasjoner. Maksimalt pådrag settes på og tiden det tar å telle 10 rotasjoner måles. Målingen skal gjøres med en motorspenning på 12V, og én o-ring for kraftoverføring av typen RM 0141-16.	
Testresultater: I løpet av 15 sekunder roterte håndleddet 10 ganger, noe som vil si $360 \text{ grader/rot} \cdot 10 \text{ rot}/15 \text{ s} = 240 \text{ grader/s}$.	

Hva testes: WMF-02, MDR-05	Utført: OK
Beskrivelse av test: En tynn snor skal festes til håndleddets ytterskall, og snorens andre ende skal festes i et dynamometer. Maksimalt pådrag skal settes på motoren og dynamometerets verdi skal leses av.	
Beskrivelse av testoppsett: En tynn nylontråd festes til en skrue i håndleddets distale del, og legges inntil kroppen. I trådens andre ende festes et dynamometer med måleområde 0-1000 g. Maksimalt pådrag settes på motoren og maksimal trekkraft leses av. Snoren skal forhåndsstrammes for å unngå rykk som kan gi feil i målingen. Av formelen for beregning av moment, skal håndleddets stall-moment regnes ut. Målingen skal gjøres med en motorspenning på 12V, og én o-ring for kraftoverføring av typen RM 0141-16.	
Testresultater: En gjennomsnittlig trekkraft på 304 g ble målt. Med håndleddets radius på 20 mm, beregnes momentet til 59,6 mNm. Som en kommentar kan det nevnes at motoren måtte ha et pådrag på 60% for at håndleddet i det hele tatt skulle rotere.	

Hva testes: Måling av håndleddets friksjonsmoment	Utført: OK
Beskrivelse av test: På grunn av at et uventet høyt motorpådrag må til for å få håndleddet til å rotere, er det interessant å måle håndleddets friksjonsmoment. En tynn snor skal festes til håndleddets ytterskall, og snorens andre ende skal festes i et dynamometer. Håndleddets proksimale del skal så roteres sakte og når distal del begynner å bevege seg skal maksimal trekkraft avleses.	
Beskrivelse av testoppsett: En tynn nylontråd festes til en skrue i håndleddets distale del, og legges inntil kroppen. I trådens andre ende festes et dynamometer med måleområde 0-1000 g. Håndleddets proksimale del skal sakte roteres helt til den distale delen begynner å bevege seg. Maksimalt målt verdi registreres og av formel for beregning av moment beregnes håndleddets friksjonsmoment. Målingen skal gjøres med én o-ring for kraftoverføring av typen RM 0141-16.	
Testresultater: En gjennomsnittlig trekkraft på 572 g ble målt. Med håndleddets radius på 20 mm, beregnes momentet til 112,1 mNm.	

Hva testes: Test av innkjøpt motordriver	Utført: OK
Beskrivelse av test: For å teste om den “egenproduserte” motordriveren fungerer optimalt, skal en innkjøpt motordriverkrets fra motorens leverandør brukes for å måle maksimal rotasjonshastighet. Motorens pådrag skal settes til maksimum, og tiden det tar for håndleddet å gjøre 10 rotasjoner skal måles.	
Beskrivelse av testoppsett: Motoren skal kobles opp i henhold til motordriverkretsens spesifikasjoner. Driverkretsen er fra Faulhaber av typen BLD 2401. To teipbiter med strek på, en på hver del av håndleddet, brukes for å telle rotasjoner. Maksimalt pådrag settes på og tiden det tar å telle 10 rotasjoner måles. Målingen skal gjøres med en motorspenning på 12V, og en o-ring for kraftoverføring av typen RM 0141-16.	
Testresultater: I løpet av 12 sekunder roterte håndleddet 10 ganger, noe som vil si $360 \text{ grader/rot} \cdot 10 \text{ rot}/12 \text{ s} = 300 \text{ grader/s}$.	

Hva testes: WPF-02	Utført: OK
Beskrivelse av test: Spenningsregulatoren skal gi ut konstant regulert spenning på 5V når drivspenningen er i område 6-12V, og helst skal den også tåle 5-18V.	
Beskrivelse av testoppsett: En signal generator benyttes for å gi regulatorens drivspenning. Spenningen skal følge en sinusbølge med frekvens på 0,2Hz og amplitude på 6,5V (mellom 5V og 18V). Regulatorens utgang måles med et oscilloskop.	
Testresultater: Utgangsspenningen holdt seg konstant på 5V.	

7.2 Testplan B

Hva testes: MDR-02	Utført: OK
Beskrivelse av test: Et program som genererer et PWM-signal med frekvens på 20kHz på en av mikrokontrollerens utganger skal kjøres. Utgangen skal måles.	
Beskrivelse av testoppsett: Det skal skrives et program som genererer et PWM-signal på pinnene J1,8-J1,10 med duty cycle på 50%. Ved hjelp av et oscilloskop skal dette signalet måles.	
Testresultater: Et firkantsignal med like lang positiv som negativ flanke ble målt.	

Hva testes: MDR-01	Utført: OK
Beskrivelse av test: Et program som øker PWM-signalets duty cycle skal kjøres og utgangen måles.	
Beskrivelse av testoppsett: Et program som øker PWM-signalets positive flanke skal kjøres, og på pinnene J1,8-J1,10 skal dette måles ved hjelp av et oscilloskop.	
Testresultater: Et firkantsignal hvor den positive delen av signalet stadig økte ble målt.	

Hva testes: Hall-sensor	Utført: OK
Beskrivelse av test: Motoren skal kobles opp og hall-sensorenes utganger skal kobles til en pull-up-motstand for så å måles.	
Beskrivelse av testoppsett: Tre motstandere på 100kΩ skal kobles til hall-sensorenes utgang, og med et oscilloskop skal alle utgangene måles mens motoren for hånd blir snurret rundt.	
Testresultater: Ettersom motoren ble snurret, ble det bekreftet at hall-sensorene fungerte som de skulle.	

Hva testes: MDR-03-01	Utført: OK
Beskrivelse av test: Motoren skal kobles til uten pull-up-motstandere, men mikrokontrolleren må ha intern pull-up. Motoren skal så snurres rundt og det skal bekreftes at mikrokontrolleren håndterer interruptene som genereres.	
Beskrivelse av testoppsett: Et program som setter opp interrupt og med interrupt-rutiner som skriver til Br@y's terminal over UART skal kjøres.	
Testresultater: Ettersom motoren ble snurret, ble det skrevet ut i terminalvinduet for hver gang et interrupt ble generert. 6 ganger per rotasjon.	

Hva testes: MDR-02	Utført: OK
Beskrivelse av test: Motordriveren skal kobles til mikrokontrolleren, og et PWM-signal skal kjøres. Signalet ut fra mikrokontrolleren og motordriveren skal måles.	
Beskrivelse av testoppsett: Samme program som tidligere ble brukt til å teste PWM, skal kjøres. Mikrokontrollerens utganger skal kobles til motordriverens innganger, og en probe fra oscilloskopet brukes til å måle signalet ut av mikrokontrolleren, og en annen probe brukes til å måle signalet ut fra motordriveren.	
Testresultater: Da signalet på motordriverens inngang gikk opp, gikk signalet ut fra driveren opp. Ved å endre drivspenning inn på motordriveren, ble amplituden på signalet ut endret.	

Hva testes: MDR-03-02	Utført: OK
Beskrivelse av test: Motoren skal kobles til motordriveren og et PWM-signal skal kjøres. Motordriverens utgang skal måles.	
Beskrivelse av testoppsett: Motoren skal kobles til med inngangene koblet til motordriveren, og utgangene koblet til mikrokontrollerens interrupt-pinner. Motoren skal kjøres fra null til maksimal hastighet.	
Testresultater: Motoren roterte og alt så ut til å fungere som forventet.	

Hva testes: MDR-04	Utført: OK
Beskrivelse av test: I interrupt-rutinen for én av de seks mulige kombinasjonene av verdier fra hall-sensorene skal en teller brukes for å beregne motorens hastighet og skrive den ut over UART.	
Beskrivelse av testoppsett: En teller som inkrementeres hver gang hall-sensorene har en gitt verdi skal legges til interrupt-rutinen. Hastighetsmålingen skal oppdateres hvert 0,1 sekund (en timer brukes for å beregne tiden), og telleren nullstilles. Målt hastighet skrives ut i Br@y's terminal.	
Testresultater: Utskrift over UART oppga en målt maksimumshastighet på ca. 35000 rpm ved 12V.	

Hva testes: MDR-01, MDR-02	Utført: OK
Beskrivelse av test: Et program som endrer PWM-signalets duty cycle skal kjøres. Motorens rotasjonsretning skal også byttes om.	
Beskrivelse av testoppsett: Et program som teller fra -100 til 100 og så tilbake igjen skal kjøres (endring av duty cycle fra -100% til 100%). Negativt fortegn tilsvarer rotasjon mot klokken, og positivt fortegn med klokken. Telleren skrives ut i Br@y's terminal.	
Testresultater: Motoren roterte raskere og saktere etter hvert som verdien endret seg. Da telleren passerte 0, skiftet rotasjonsretningen.	

Hva testes: MMS-01, MMS-01-02	Utført:
Beskrivelse av test: Målekretsens inngang påtrykkes et firkantsignal for å undersøke om filteret fungerer som det skal. Signalets frekvens skal tilsvare motordriverens switchefrekvens og ha en amplitude på 50mV. Mikrokontrolleren skal skrive ut målingen fra AD-omsetter over UART.	
Beskrivelse av testoppsett: En signalgenerator brukes til å generere en firkantpuls med amplitude 50mV, frekvens 20kHz og offsetspenning på 50mV.	
Testresultater:	

Hva testes: MMS-01-01-01	Utført:
Beskrivelse av test: Filteret som simulerer motorens termiske tidskonstant skal påtrykkes et firkantsignal med lav frekvens. Filterets inngang og utgangens sprangrespons måles, og tidskonstanten beregnes.	
Beskrivelse av testoppsett: En signalgenerator genererer en firkantpuls med frekvens på 0,1Hz på filterets inngang for å gi et sprang på 5V. Inngang og utgang skal måles med et oscilloskop, og sprangresponsen beregnes ved hjelp av oscilloskopets innebygde måleprogram.	
Testresultater:	

Hva testes: MMS-01-01-02, MMS-01-01-03	Utført:
Beskrivelse av test: Komparatorens positive inngang skal påtrykkes en DC-spenning som kan varieres fra 0V til 5V. Mikrokontrolleren skal skrive ut over UART når den mottar interrupt.	
Beskrivelse av testoppsett: En DC-spenningskilde brukes til å sakte øke spenningen på komparatorens inngang fra 0V til 5V. Inngangen og utgangen måles så med et oscilloskop.	
Testresultater:	

Hva testes: MMS-01-01-04	Utført: OK
Beskrivelse av test: Vippas innganger skal påtrykkes et signal på 0V eller 5V for å teste vippas sannhetstabell.	
Beskrivelse av testoppsett: To testledninger benyttes til å sette SR-vippas innganger til 0V eller 5V. Med et oscilloskop skal vippas utganger måles.	
Testresultater: Alle kombinasjoner av inngangssignal gav målinger som forventet utfra SR-vippas sannhetstabell.	

Hva testes: MMS-01-01	Utført:
Beskrivelse av test: Transistorens utgang (drain på P-kanal) skal måles mens et signal på 0V eller 5V settes på inngangen (gate på N-kanal).	
Beskrivelse av testoppsett: En testledning benyttes til å sette transistorens inngang (pinne J1,5) til 0V eller 5V. Med et oscilloskop skal transistorens utgang (på kretskortet) måles.	
Testresultater:	

Hva testes: MMS-01	Utført:
Beskrivelse av test: Et firkantsignal på 20kHz og amplitude 50mV skal påtrykkes over målemotstanden. Mens offsetspenningen økes, skal transistorens utgang måles. Under hele testen skal mikrokontrolleren skrive ut innlest spenning over UART.	
Beskrivelse av testoppsett: En signalgenerator skal brukes til å generere et firkantsignal med offsetspenning på 50mV, amplitude på 50mV og frekvens på 20kHz. Samtidig som offsetspenningen sakte øker, skal signalet ut fra signalgeneratoren måles med et oscilloskop. Det samme skal transistorens utgang (pinne 4).	
Testresultater:	

Hva testes: WSF-03	Utført: OK
Beskrivelse av test: Et program som kjører på et testkort skal sende en CAN-melding hvor regulatortype velges.	
Beskrivelse av testoppsett: Utviklingskortet STK500/501 skal kobles til CAN-bussen og brukes til å sende en melding til prototypen med en ID som samsvarer med valg av regulator. Meldingens innhold forteller hvilken regulator som skal velges, og resultatet skrives ut over UART.	
Testresultater: I Br@ys terminal ble det skrevet ut hvilken regulator som ble valgt, og alt fungerte som det skulle.	

Hva testes: WSF-03	Utført:
Beskrivelse av test: Et program som kjører på et testkort skal sende en CAN-melding hvor regulatorparametre settes.	
Beskrivelse av testoppsett:	
Testresultater:	

Hva testes: WSF-03	Utført:
Beskrivelse av test: Et program som kjører på et testkort skal sende en CAN-melding hvor regulatorens settpunkt settes.	
Beskrivelse av testoppsett:	
Testresultater:	

Hva testes: MHV-01-02	Utført: OK
Beskrivelse av test: Måling av PWM-signal ut fra magnetisk enkoder.	
Beskrivelse av testoppsett: En probe fra et oscilloskop skal kobles til konektor J2,14 (fra utgang på magnetisk enkoder). Håndleddet roteres så for å endre retningen på magnetfeltet over enkoderen.	
Testresultater: Et PWM-signal ble målt, og da håndleddet ble rotert, endret den positive flanken seg.	

Hva testes: MHV-01-02	Utført: OK
Beskrivelse av test: Et program som måler lengden av positiv flanke skal kjøres. Måleresultatet skal skrives ut over UART.	
Beskrivelse av testoppsett: Et program som setter opp interrupt og kjører interrupt-rutine for hver gang PWM-signalet blir togglet skal kjøres. Tiden mellom hver gang signalet går høyt til det går lavt skal måles og skrives ut i Br@y's terminal.	
Testresultater: Utskriften i terminalvinduet endret seg ettersom håndleddet ble rotert. Programmet var ikke i stand til å måle vinkler nær 0 grader fordi tiden mellom toggingene i disse tilfellene er for raske til at mikrokontrolleren klarer å få de med seg.	

Hva testes: Kommunikasjon over CAN bus	Utført: OK
Beskrivelse av test: Et program som kjører på et testkort skal sende meldinger over bussen. Mottakersiden skal gjøre en endring på dataen i meldingen, og så returnere denne til testkortet. Endringen som gjøres vil avhenge av meldingens ID.	
Beskrivelse av testoppsett: En AT90CAN128 mikrokontroller i et utviklingskort av typen STK500/501 skal brukes som testkort. Tre trykknapper på utviklingskortet brukes til å bestemme hvilken melding (av tre forhåndsdefinerte) som skal sendes. Dataene i alle meldingene er like, men ID-ene forskjellige. På prototypen skal det kjøres et program som tar imot CAN-meldingene og multipliserer dataen med 2, 4 eller 8, alt etter hvilken ID meldingen har. Resultatet av multiplikasjonen legges så i en CAN-melding og returneres til utviklingskortet hvor dataen skrives ut i Br@y's terminal over UART.	
Testresultater: Ingen problemer ble oppdaget. Alle utskriftene stemte overens med det en kunne forvente.	

7.3 Testplan C

Hva testes: Konduktivitet	Utført: OK
Beskrivelse av test: Etter fresing av kretskort og lodding av komponenter skal samtlige pinner og kontaktpunkt testes for konduktivitet.	
Beskrivelse av testoppsett: En liste over alle kontaktpunkt i kretskortets utlegg skal genereres, og alle punktene testes med et multimeter.	
Testresultater: Ingenting uventet.	

Kapittel 8

Diskusjon

8.1 Resultater

Siden poenget med denne oppgaven har vært å starte arbeidet med utformingen av styresystemet på nytt, har så lite som mulig av tidligere design blitt brukt. Dette fordi det aldri har vært testet hva som fungerte, eventuelt ikke fungerte. Derfor har ikke analysen av tidligere arbeid gått lenger tilbake enn til [1]. Det eneste som her forelå av konkret design, var motordriveren. Siden sannsynligheten var stor for at denne ville fungere som den skulle, ble den akseptert som den var, og implementert. Tester av motordriveren med motoren uten last viser at den fungerer som den skal. Men under testing med motoren i håndleddet, måtte det til et pådrag på 60% av maksimum ved 12V, for at håndleddet skulle rotere. Spørsmålet er da om dette er tegn på at motordriveren ikke fungerer så godt allikevel. En motordriverkrets bestilt fra Faulhaber ga en maksimal rotasjonshastighet på 300 grader/s, mot 240 grader/s fra den egenproduserte driveren. Det vil si en forbedring på 25% ved å bruke motordriveren fra Faulhaber, noe som kan tyde på at den egenproduserte driveren fungerer godt nok. Alternativet da er håndleddets mekanikk, og om denne har for stor friksjon.

I programvaren vil det være opptil seks “tråder” som kjører parallelt, og her kan det bli et problem med lokale variabler. Mikrokontrolleren er en 8-bits kontroller, noe som vil si at den kan operere med 8 bit per klokkesykel. Hvis en

prosess som skal lese av en 16 bits verdi blir avbrutt etter bare å ha lest de 8 første bitene, vil det oppstå feil dersom den avbrytende prosessen endrer denne variabelen, en situasjonen som i sanntidsprogrammering kalles “race condition”. Om dette vil være et større problem er uvisst. I programvaren som har blitt skrevet, vil felles variabler bli skrevet til av én prosess, og lest av en annen. Det vil altså ikke oppstå situasjoner hvor to prosesser forsøker å skrive samtidig, noe som ville resultert i tap av informasjon. Men et eksempel på en feil som kan oppstå, er ved avlesing av håndleddets vinkel. Hvis vinkelvariablen skulle endre seg under avlesingen, vil målingen til regulatoren bli feil, noe som igjen vil gi feil pådrag. Et mulig problem som kan oppstå som følge av en slik feil, er at motorens rotasjonsretning endres momentant. En måte dette kan løses på, er ved å bruke “mutual exclusion”, eller mutex. Det fungerer som et kølappsystem slik at bare én prosess av gangen får tilgang til variabelen. Dette fører til at vi vil få riktig avlesing hver gang.

Ved måling av håndleddets vinkel, var det ikke mulig å måle PWM-signalets positive flanke riktig når vinkelen var nær 0 grader. Grunnen til det er at tiden det tar å betjene interruptet som genereres av at PWM-signalet går høyt, er lengre enn tiden det går før signalet igjen går lavt. En lignende feil vil oppstå i motsatt ende, når den positive bredden nærmer seg signalets periode. Dette kan bety at direkte måling av PWM-signalet kanskje ikke er den beste måten å gjøre det på. Siden testen ble utført uten andre kjørende prosesser, ligger ikke årsaken i lav prioritering av interruptet, men at kontrolleren ikke klarer å behandle det raskt nok. En måte å unngå dette på, kan være å lavpassfiltrere PWM-signalet og så lese verdien med en AD-omsetter. Men siden dette er et problem i begge endene av signalet, vil målingen få en offset-feil, som det kan tas høyde for i programvaren.

Det foreligger ingen beregninger på hvor mye tid mikrokontrolleren trenger for å håndtere alle systemets interrupt. Interruptenes frekvens er kjent, og med en slik beregning kan en gjøre en vurdering på om systemet har de nødvendige ressursene som må til for at systemet skal fungere som ønsket.

For spenningsreguleringen ble det valgt en regulator som ikke har særlig høy effektivitet. Det vil si at strømtrekket fra batteriet vil være større enn nødvendig. Det kunne kanskje blitt laget to regulatormoduler; en med lineær og en med

switcheregulator. Disse kunne så blitt testet for å finne ut hvor mye energi en ville spare ved å bytte, og om det ville være nok til å utgjøre noen forskjell i vesentlig grad. En forskjell i oppetid på én time i en applikasjon som brukes for eksempel 16 timer per dag, er det ikke sikkert betyr så mye. Men siden vi i denne oppgaven ikke har kommet langt nok til å la alle systemets moduler kjøre samtidig, er det ikke sikkert at en slik måling ville gitt så mange svar.

Den tekniske spesifikasjonen lister opp en rekke krav som har gitt opphav til testplanen. Gjennom testingen ble dermed flere av kravene fra funksjons- og teknisk spesifikasjon verifisert. Siden strømovervåkingen ikke ble testet, og ikke var tilkoblet under testing av motoren, kan det ikke sies noe helt sikkert i forhold til om kravene for disse modulene er oppfylt. I ettertid kan en også stille seg spørsmål om spesifikasjonen er konkret nok. Teknisk krav nr. MDR-05 sier at motordriverne skal kunne levere nok strøm til at motoren kan levere tilstrekkelig moment. Med dette kravet som utgangspunkt, er ikke løsningsrommet så innsnevret som vi kunne ønske, siden det ikke sies noe om hvor mye strøm det vil være snakk om. Med et slikt krav må en prøve seg fram for å finne en tilfredsstillende løsning. MOSFET-driverne i denne oppgaven kan levere strømmer opptil 2A, mens det senere i oppgaven ble regnet ut at det ikke ville være behov for mer enn 305mA. Kanskje kunne en mindre og billigere MOSFET-driver blitt valgt. Det finnes også flere tilsvarende upresise krav. Slike unøyaktigheter kunne ført til problemer med å få modulene til å fungere, noe vi heldigvis har unngått. Grunnen til at vi har vært “heldige”, er at samtlige verdier som det har vært behov for har det blitt gjort rede for i løpet av rapporten. Men for oppslagsmuligheter ved senere anledninger burde disse vært samlet i ett dokument.

I den tekniske spesifikasjonen bestemmes det at håndleddet skal ha en P-regulator. Dette vil føre til at hastighet og posisjon vil få et stasjonært avvik fra referanseverdien, noe som sjelden er noen fordel. I en protese er det EMG-signaler målt i brukerens muskel som forteller hvor hurtig håndleddet skal rotere, eller til hvilken posisjon det skal gå. Men hva betyr de målte signalene? Brukeren har ikke nødvendigvis noe forhold til hvor mye håndleddet skal bevege seg, siden dette gjerne er forskjellig fra protese til protese. Så når vi ikke vet hva referanseverdien er, har det ingen hensikt å bruke ekstra prosessorressurser for å lukke det stasjonære avviket.

8.2 Metode

Bruk av utviklingsmetodikker kan noen ganger føles som et hinder i et prosjekt, siden det “administrative” vil stjele tid fra delen som går på utvikling. Samtidig sikrer metodikken at prosjektet faktisk styrer mot den fastlagte kursen. Albert Einstein sa en gang: “Hvis jeg fikk en time på å redde verden, ville jeg brukt 59 minutter på å definere problemet og ett minutt på å løse det”. Dette er et godt eksempel på hvorfor en metodikk er så viktig. Når en oppgave gis, er løsningsrommet så stort at man som utvikler vil ha liten mulighet til å skille en god idé fra en mindre god. Metodikken tvinger oss gjennom fasene med analyser og spesifisering for å innskrenke løsningsrommet til de alternativene som enklest løser det vi har behov for.

Spørsmålet som da må stilles, er ikke om det i det hele tatt er fornuftig å bruke en metodikk, siden dette regnes som hevet over enhver tvil. Spørsmålet er hvor stort et prosjekt må være for at det kan regnes som nødvendig å bruke en metodikk. Har denne oppgaven vært stor nok? Hvis ikke, kunne mer tid blitt brukt til å skrive ferdig programvare, fullføre all testing og kanskje til og med lage et kretskort lite nok til å få plass i håndledet.

Hvis jeg i dag hadde fått beskjed om å fortsette på denne oppgaven, uten den kunnskapen jeg nå har, ville jeg uten dokumentasjon brukt lang tid på å prøve å forstå systemets oppbygning. Jeg måtte gått over alle beslutninger som hadde blitt gjort, gjøre alle beregninger på nytt og deretter teste hva som fungerte. I beste fall ville dette tatt en uke, og selv ikke da er det sikkert at jeg ville sittet med den kunnskapen om systemet som jeg har i dag. Siden jeg nå har brukt tid på å dokumentere modulenes virkemåte, lage testplaner og gjennomføre disse, kan neste utvikler lese gjennom dette og få en forståelse for hvordan systemet er bygd opp, og at det virker. Tiden jeg bruker på å skrive dokumentasjon vil være kortere enn den tiden nestemann vil bruke på å lære seg systemet fra bunnen av.

Hvor stor en oppgave kan være, uten at en har en plan for hvordan den skal løses, er det ingen fasit på. For i bunn og grunn er det jo det en metodikk er. En planleggingsfase i begynnelsen av prosjektet for hvordan en skal komme fram til løsningen. Personlig kan jeg vanskelig se for meg å sette igang med en oppgave med tidshorisont på en uke, uten å ha en nedtegnet plan. Hvordan blir det da

med en oppgave med tidshorisont på et semester?

I denne oppgaven, som omhandler en del testing, ble V-modellen valgt som utviklingsmetodikk. Grunnen til dette var at det skulle være et fokus på å produsere dokumentasjon, som igjen skulle legge grunnlag for testingen. Siden den også inngår i undervisningen ved universitetet, er den fra før kjent for de aller fleste. På grunn av dette ble det ikke gjort noe for å finne en alternativ metodikk som kanskje kunne passet enda bedre. Hadde en annen, enda litt bedre, metodikk blitt valgt, kunne en kanskje brukt tiden mer effektivt og kommet noe lengre. På den annen side, ville kanskje tiden tjent gått opp i opp med tiden brukt på å lete etter og lære metodikken.

Som nevnt tidligere ble ikke kravene i den tekniske spesifikasjonen definert så konkret som en kunne ønske. I stedet ble det senere gjort utregninger for å finne de verdiene som manglet. På denne måten kom utregningene sammen med den aktuelle modulen. Ulempen med dette er at en teknisk spesifikasjon som uavhengig dokument, skal være så presist formulert som mulig. Altså bør alle verdier være med.

Ved å se for seg en grafisk fremstilling over antall arbeidstimer per dag fra prosjektets begynnelse til slutt, vil en raskt kunne se en økning i antall timer mot slutten. Noe av dette skyldes selvsagt at det har gått med en del tid til å dokumentere resultatene i denne rapporten. Men hadde jeg ved prosjektets begynnelse vært mer strukturert og mer ambisiøs i forhold til planlegging av arbeid, kunne grafen sett noe annerledes ut. Når en ønsker kvalitet i arbeidet, fungerer ikke skippertaksmetoden så godt. Derfor er det mulig at resultatet hadde vært enda bedre, med en helt ferdigtestet prototyp klar til å bli re-designet for å få plass i håndledet. På den annen side er samtlige av punktene i oppgaveteksten gjort, og samtlige av de gjennomførte testene bestått. Dermed kan det tenkes at grafen ser ut som den gjør fordi det har tatt tid å komme inn i oppgaven og la den modne.

Kapittel 9

Konklusjon

Det har i denne oppgaven blitt utviklet et styresystem for et kybernetisk håndledd med motorstyring basert på en børsteløs DC-motor med innebygde hall-sensorer.

En litteraturstudie tok for seg styringsprinsipp (med eller uten sensorbasert styring) for børsteløs DC-motor, og argumentene som ble funnet mot å bruke sensorbasert styring, begrenser seg til høyere pris og større fysisk innpakning. Dermed ble det konkludert med at så lenge ikke pris eller størrelse er et problem, bør det velges en motorstyring som baserer seg på bruk av sensorer for kommutering av børsteløs DC-motor.

Gjennom bruk av V-modellen, har det blitt realisert en prototyp av styrings-systemet. Utviklingsmetodikkens faser har blitt fulgt og nødvendig dokumentasjon og testplaner har blitt produsert. Den bygde prototypen består av flere kretskort som kan stables oppå hverandre og forenkler på denne måten testingen av systemets moduler.

Programvaren som har blitt skrevet inneholder drivere som initialiserer systemets maskinvaremoduler, og det meste av denne vil kunne gjenbrukes i det ferdige systemet.

For måling av håndleddets vinkel, har det blitt designet en magnetholder som ved hjelp av presspasninger holder magneten på plass slik at en magnetisk enkoder kan brukes til å måle den magnetiske feltvektoren som roterer sammen med håndleddet.

Testing gjennomført i henhold til de produserte testplanene viser at systemet tilfredsstillende funksjonsspesifikasjonenes krav til for eksempel rotasjonshastighet og dreiemoment. Reduksjonen i motordriverens ytelse sammenlignet med driverkretsen fra Faulhaber er ikke overraskende stor. Derfor bør det heller legges fokus på å redusere mekanikkens friksjon framfor “tweaking” av motordriveren.

Videre arbeid vil omhandle ferdigstilling av programvare for regulator for deretter å fullføre testingen. UNB-protokollen bør også implementeres, og muligheten for å bruke en CAN-bootloader undersøkes. Det bør også gjøres beregninger eller tester for å finne ut hvilken type spenningsregulator som er best egnet til jobben.

Bibliografi

- [1] Inge Brattbakken. *Embedded control system for cybernetic wrist prosthesis*. NTNU, 2010. Masteroppgave.
- [2] Faulhaber. *Brushless DC-Servomotors 0620K 012B*, 2010-2011. Datablad.
- [3] Faulhaber. *Technical Information*, 2010-2011. Datablad.
- [4] IABG, München. *Das V-Modell*. <http://www.v-modell.iabg.de>.
- [5] Microchip Technology Inc. *Using the dsPIC30F for Sensorless BLDC Control*, 2004. Application note.
- [6] Yves Losier. *Prosthetic Device Communication Protocol for the AIF UNB Hand Project*. University of New Brunswick, 2009.
- [7] Geir Mathisen. *Utvikling i henhold til V-modellen*. Lysark fra TTK4125, 2010.
- [8] Peter Moreton. *Industrial Brushless Servomotors*. Newnes, Oxford, 2000.
- [9] Øyvind Stavdahl. *Optimal Wrist Prosthesis Kinematics - Three-dimensional Rotation Statistics and Parameter Estimation*. NTNU, 2002. Doktoravhandling.

Tillegg A

Funksjonsspesifikasjon



NTNU
Norwegian University of
Science and Technology

Faculty of Information Technology,
Mathematics and Electrical Engineering
Department of Engineering Cybernetics

REPORT

Report number

Classification

ISBN

Address: **NTNU**
Department of Engineering Cybernetics
O.S. Bragstads plass 2D
NO-7491 TRONDHEIM, NORWAY

Switchboard: +47 73 59 40 00
Telephone: +47 73 59 43 76
Fax: +47 73 59 43 99

Report title	Date
Functional Requirements Specification for the NTNU Revolute Wrist Device (NRWD) v0.3	Number of pages 10
	Project supervisor Øyvind Stavdahl

Author (s) Øyvind Stavdahl, Inge Brattbakken	Project no. TBC; Spor Tove
---	-------------------------------

Sponsoring Organization NTNU	Client's reference
---------------------------------	--------------------

Abstract
This document specifies the functional requirements for the initial version of the NTNU Revolute Wrist Device (NRWD). The specification is intended to provide the necessary basis for developing a technical requirements specifications with respect to mechanical, electrical and algorithmic properties.
TBC

Keywords
TBC

Contents

1. Background	4
2. Revision History	4
3. Conventions	4
3.1 Abbreviations etc	4
3.2 Document Structure.....	4
4. System Description	4
4.1 Context and Purpose.....	4
4.2 Configurations.....	5
5. Functional Requirements.....	6
5.1 General requirements	6
5.2 Wrist Joint Function, WJF.....	8
5.3 Wrist Motor Function, WMF.....	8
5.4 Wrist Servo Function, WSF.....	9
5.5 Wrist Communication Function, WCF.....	10
5.6 Wrist Power Function, WPF	11
5.7 Proximal Attachment Function, PAF	12
5.8 Distal Attachment Function, DAF.....	12
Bibliography	14

List of Figures

Figur 1 System context.....5
Figur 2 The two different equipment configurations 6

1. Background

The functionally optimal 1-DOF wrist prosthesis kinematics was theoretically derived in (Stavdahl, 2002). Now one aims at implementing a physical device based on these principles. The current document constitutes a functional specification for this device, which covers not only the kinematics but even mechanical, electrical, electronic and algorithmic aspects.

2. Revision History

When	Who	What
2005.02.08	Ø.Stavdahl	Brief revisions for FPGA-based version. Several requirements and comments clarified and typos fixed. This relates to: GEN-08, WJF-01, WJF-02, WJF-03, WSF-01-03, WSF-03, WCF-02, WCF-03, WCF-04, WCF-04-01, WCF-05, WCF-09, WCF-10, WPF-02, WPF-03, Circuit board geometry included.
Spring 2010	Inge Brattbakken	Revised specifications regarding communication. This relates to WCF-02 and WCF-03. Also removed requirements no longer relevant. Those being: WCF-04, WCF-04-01, WCF-04-02, WCF-06, WCF-08 and WCF-09.

3. Conventions

3.1 Abbreviations etc

The following conventions apply to this document:

NA	Not Applicable; irrelevant
HW	Hardware
SW	Software
TBC	To Be Completed; an aspect that has to be filled in.
TBD	To Be Defined; an aspect that is still not completely defined.

Use of the word *shall* denotes requirements that must be met by the system, while the word *should* denotes requirements that are desirable and must be met unless justification is provided for an alternative.

3.2 Document Structure

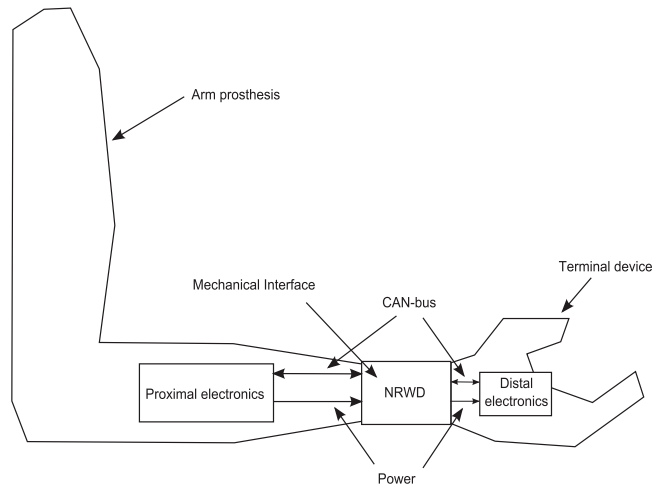
TBC.

4. System Description

4.1 Context and Purpose

The "system" referred to here is the entire wrist prosthesis, including both mechanical, electrical/electronic and

software components. The primary purpose of the system is to rotate/orient the terminal device with respect to the forearm according to user input. Figur 1 gives an overview of the system and its context.



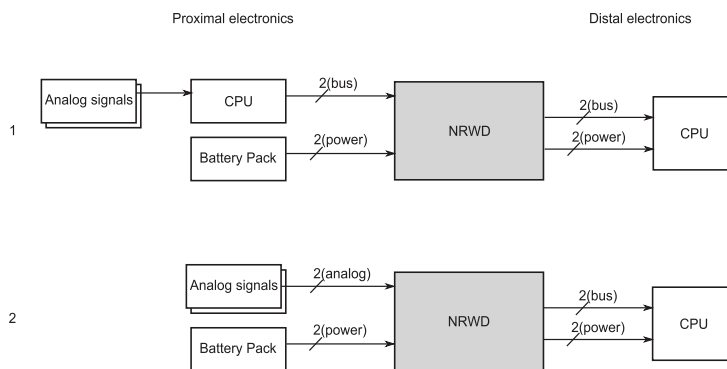
Figur 1 System context

The proximal electronics includes a battery pack or another electric power source, as well as digital circuits with sensors for reading the user's motor intent (typically EMG electrodes, switches, "pressure pads" or the like) and communication of this intent to the joint controllers in the prosthesis. While the figure suggests that the proximal electronics is situated in the forearm, this needs not be the case; in the case of a total arm replacement the prosthesis may comprise motorized shoulder, elbow, wrist and/or finger functions, and the arm electronics may correspondingly be distributed in the different parts of the arm. The "Proximal electronics" box Figure 1 thus represents all the electronics proximal to the wrist, while the "Distal electronics" represents any or all electronic components distal to the wrist, such as a motor controller responsible for opening and closing of the hand.

4.2 Configurations

The system is applicable to several different equipment configurations, as indicated in Figure 2. These configurations include the following, listed in the order of relevance and only the first two being absolutely necessary to implement:

1. A completely digital mode where all intercomponent communication is based on a data bus. This mode is for use with other novel systems that support the same communication protocol.
2. A hybrid mode where the proximal communication (i.e. between the wrist and proximal electronics) is analog while the distal communication is digital. This is for using a novel hand in systems based on analog electrodes and the like.



Figur 2 The two different equipment configurations

5. Functional Requirements

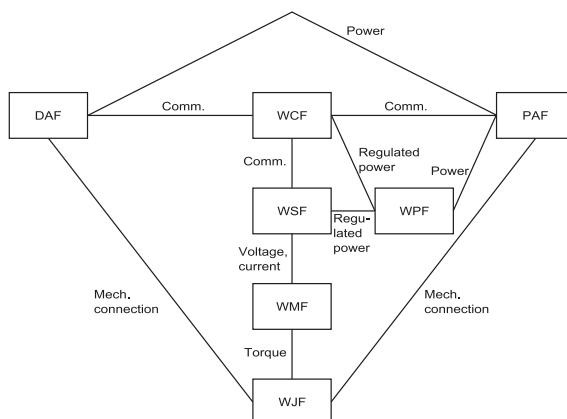
5.1 General requirements

The NRWD system shall implement the following functions and satisfy the following requirements.

Req. no.	Description	Comments
GEN-01	A joint which implements the optimal kinematics described in (Stavdahl, 2002) – Wrist Joint Function, WJF.	
GEN-02	An electric motor which drives the movement of the joint via a gear train – Wrist Motor Function, WMF.	
GEN-03	A motor control interface and regulation process to control the movements of the WJF. – Wrist Servo Function, WSF.	
GEN-04	A communication function that interfaces with WSF and other connected systems – Wrist Communication Function, WCF.	“Other connected systems” typically include proximal and distal joint controllers, as well as units for system diagnosis and configuration.
GEN-05	A power adaptation function that enables the system to run from a variety of voltage levels – Wrist Power Function, WPF.	Compliance with commercial and research systems.

GEN-06	A mechanism for attachment of the wrist to the forearm socket. – Proximal Attachment Function, PAF.	
GEN-06-01	The PAF shall be disconnectable and, when disconnected, allow entry to the space proximal to the wrist.	For maintenance and replacement of forearm electronics.
GEN-07	A mechanism for attachment of the wrist to the terminal device – Distal Attachment Function, DAF.	
GEN-08	An outer geometry that crudely resembles that of an adult wrist – Wrist Geometry Function, WGF.	No component shall extend beyond the envelope of a normal wrist, which has an elliptic crosssectional area of approx. 5 cm x 4 cm. All parts and connectors must be kept small.
GEN-08-01	The longitudinal dimension (along the forearm) of the entire NRWD should be as short as possible, and shall not exceed 65 mm.	Allows longer residual limbs to use it, i.e. "larger market". 65 mm is Bock spec.
GEN-09	The system should consume a minimum of energy, and the current consumption shall be kept below 2A at all times.	When motor is active, its output dictates a lower bound for the power consumption. This requirement just implies that unnecessary circuits should be turned off, and active use should be made of the controller's various sleep modes.
GEN-10	The system shall be modular with respect to both HW and SW.	
GEN-11	The weight of the entire NRWD should not exceed 100 g.	Industrial components: Otto Bock: 96 g, VASI: 100 g.

Figur 3 depicts the functions and their dependencies.



Figur 3 Functional block diagram

5.2 Wrist Joint Function, WJF

The following requirements are derived from GEN-01.

Req. no.	Description	Comments
WJF-01	The NRWD joint shall be a single, simple revolute joint which axis of rotation can be placed at an attitude with respect to the forearm and terminal device as specified in (Stavdahl, 2002) Equations (7.4) and (7.5).	Derived from (specific version of) GEN-01. Note a typographical error in Eqn. (7.5); last element of vector should read “-0.23” instead of “0.23”.
WJF-02	The joint axis should be manually adjustable to other attitudes than that specified in WJF-01.	In order to test other axis alignments. Note that adjustability wrt. forearm AND hand requires TWO adjustable functions!
WJF-03	The joint shall enable an angular excursion of at least 180 degrees. The excursion should be unlimited.	180 deg is crudely that of a healthy limb.

5.3 Wrist Motor Function, WMF

The following requirements are derived from GEN-02.

Req. no.	Description	Comments
WMF-01	The wrist joint (output of the gear train) shall have a maximum angular	Otto Bock spec. No-load speed

	velocity of at least 1.4 rad/s (81 deg/s). The maximum velocity should be as high as possible.	
WMF-02	The wrist joint should have a maximum torque of at least 34,3 mNm.	VASI spec. Stall torque
WMF-03	The motor shall have a maximum mechanical output power of at least TBC W.	
WMF-04	The motor shall be protected from overheating. The protection should be implemented by hardware.	

5.4 Wrist Servo Function, WSF

The following requirements are derived from GEN-03.

Req. no.	Description	Comments
WSF-01	The movements of the wrist joint shall be controllable according to the following modes: <ol style="list-style-type: none"> 1. On/Off-mode 2. Position mode. 3. Velocity mode 	
WSF-01-01	In On/Off-mode the motor shall be at rest or run at maximum speed (open-loop) in one direction according to a given setpoint.	Requires only transistor bridge.
WSF-01-02	In position mode the joint angle shall be proportional to a given angular setpoint.	
WSF-01-02-01	The WSF shall include an absolute position sensor. This sensor shall provide no less than 10 bits resolution per revolution.	
WSF-01-03	In velocity mode the joint angular velocity shall be crudely proportional to a given velocity setpoint.	"Crudely proportional" implies that there is no explicit need for velocity feedback, the speed may be controlled in open-loop.
WSF-01-03-01	The WSF shall include a velocity sensor or estimator.	If brushless motor: use Hall elements for speed estimates.
WSF-02	The movements of the wrist joint should be controllable according to the following modes: <ol style="list-style-type: none"> 4. Torque mode 5. Impedance mode 	
WSF-02-04	In torque mode the motor torque shall be proportional to a given torque setpoint.	Torque crudely proportional with motor current, so current can be used for feedback.

WSF-02-04-01	The WSF should include means for monitoring motor current.	Also follows from GEN-09.
WSF-02-05	In impedance mode the mechanical impedance of the joint shall be determined by a given impedance setpoint.	Mech. Impedance = torque/velocity. May require strain gauge measurements etc. to "bypass" friction.
WSF-03	WSF shall provide an interface to WCF through which the modes (described in WFS-01 to WFS-02) can be selected and relevant parameters can be set, and through which WSF can report relevant state variables TBD.	Typically: Setpoints in, process values out. The precise content of this communication will be defined by a protocol specification (SCIP) TBD.

5.5 Wrist Communication Function, WCF

The following requirements are derived from GEN-04.

Req. no.	Description	Comments
WCF-01	The NRWD shall have a two-wire Proximal Communication Interface (PCI) and a two-wire Distal Communication Interface (DCI).	
WCF-02	The PCI shall be configurable so that it implements two (0V, 7.2V) analog input lines or a bidirectional two-wire CAN interface with the UNB protocol (Losier, 2009).	The 7.2V spec is approximate. For protocol, see comment re. WSF-03.
WCF-02-01	The analog input lines shall be able to sample both lines at a rate of 1 kHz. The sampling rate should be as high as 2 kHz.	EMG signals have a bandwidth of approx. 500Hz.
WCF-03	The DCI shall be configurable so that it implements two (0 V, 7.2 V) analog output lines or a bidirectional two-wire CAN interface with the UNB-protocol.	The 7.2V spec is approximate; it may be acceptable to reduce this to 5.0V.
WCF-05	The WCF shall be configurable to an all-digital mode, with the PCI and the DCI acting as bidirectional CAN bus interfaces.	Only a single CAN interface is necessary, as both PCI and DCI can be internally connected to this single interface.
WCF-07	The WCF should be configurable to a hybrid mode in which the PCI acts as two analog input lines while DCI acts as a bidirectional CAN-interface (cf. WCF-01).	
WCF-10	The WCF shall include a serial interface for downloading software and for debugging/diagnostic purposes.	Same fashion as AVR Butterfly serial programming. This requires a bootloader. Might include RS-232 and/or other proper interfaces.
WCF-08	WCF shall implement an interface to	

	WSF according to WSF-03.	
--	--------------------------	--

5.6 Wrist Power Function, WPF

The following requirements are derived from GEN-05.

Req. no.	Description	Comments
WPF-01	The WPF shall accept external power in the form of an unregulated two-wire DC supply.	Implies on-board voltage regulation.
WPF-02	The NRWD shall tolerate and run normally when powered with a voltage in the range (6 V, 12 V). The range of usable voltages should be as wide as (5 V, 18 V).	This corresponds to Otto Bock, Motion Control and other systems. Upper limit possibly to be relaxed (lowered).
WPF-03	The NRWD shall tolerate supply voltage in the range (0 V, 12 V) without exhibiting unpredictable behaviour and without getting damaged.	E.g. shutting down the controller before the voltage gets dangerously low, may otherwise damage Flash and EEPROM content etc. See comments to WPF-02.
WPF-04	The NRWD should automatically limit its motor current to a level that does not reduce the supply voltage below the interval given in WPF-02.	Low batteries => careful motor control to avoid power-down.

5.7 Proximal Attachment Function, PAF

The following requirements are derived from GEN-06 and more.

Req. no.	Description	Comments
PAF-01	The PAF shall comprise two parts, the proximal of which is adapted to be permanently attached to the forearm socket and the distal permanently attached to the wrist unit. The parts must "mate" to form a mechanically stable connection while also being detachable.	A commercially available "quick disconnect" unit may be used, but the entire mechanism must be kept as short as possible.
PAF-01-01	The proximal part of the PAF shall be hollow to allow access to the space within the socket proximally to the wrist.	Batteries and electrodes etc. is mounted here, so an opening must be present to allow maintenance and replacement of these units.
PAF-02	PAF disconnection should be possible with hand or a simple tool, e.g. a screwdriver.	
PAF-03	The PAF shall include a four-wire electric coupling, preferably mechanically integrated with the PAF itself.	GEN-04 and GEN-05. Preferably a "quick disconnect" type, optionally loose wires and a manually detachable coupling/plug.
PAF-03-01	The PAF electrical coupling shall include at least two power supply wires/contacts capable of transferring a constant current of 4A per wire.	This is the current for the wrist AND the terminal device.
PAF-03-02	The PAF electrical coupling should be rotatable without twisting the wires.	Brush rings etc. This requirement and DAF-02-02 are mutually exclusive; both are not needed!

5.8 Distal Attachment Function, DAF

The following requirements are derived from GEN-07 and more.

Req. no.	Description	Comments
DAF-01	The DAF should comprise two parts, the proximal of which is permanently attached to the wrist and the distal permanently attached to the terminal device. The parts must "mate" to form a mechanically stable connection while also being detachable.	The distal part may be a function of the terminal device, e.g. a Bock hand. No "quick disconnect" required here!
DAF-02	The DAF shall include a four-wire electric coupling, preferably mechanically integrated with the	GEN-04 and GEN-05. Preferably a "quick disconnect" type, optionally loose wires and a manually

	DAF itself.	detachable coupling/plug.
DAF-02-01	The DAF electrical coupling shall include at least two wires/contacts capable of transferring a constant current of 2 A per wire, and these wires shall be connected to the power supply wires from PAF.	This is the current that drives the terminal device. Check with Otto Bock (=1 A?); higher currents needed for more advanced/multifunction hands.
DAF-02-02	The DAF electrical coupling should be rotatable without twisting the wires.	Brush rings etc. This requirement and PAF-03-02 are mutually exclusive; both are not needed!

Bibliography

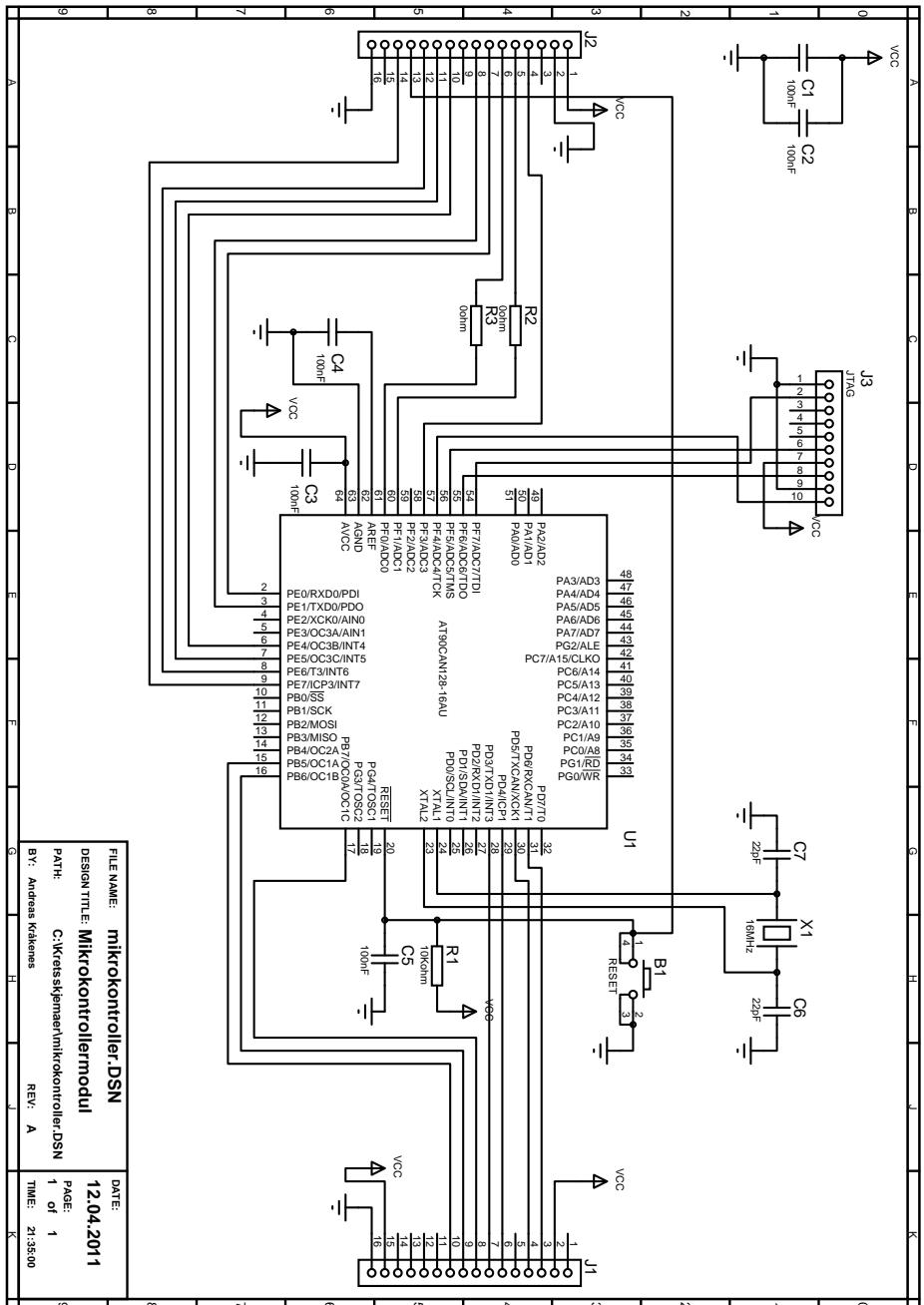
Losier, Yves. 2009. *Communication protocol for the AIF UNB hand project.* University of New Brunswick. 2009.

Stavdahl, Øyvind. 2002. *Optimal wrist prosthesis kinematics: Three-dimensional rotation statistics and parameter estimation.* Department of Engineering Cybernetics, Norwegian University of Science and Technology. 2002. PhD Thesis.

Stavdahl, Øyvind. 2002. *Functional Requirements Specification.* 2002.

Tillegg B

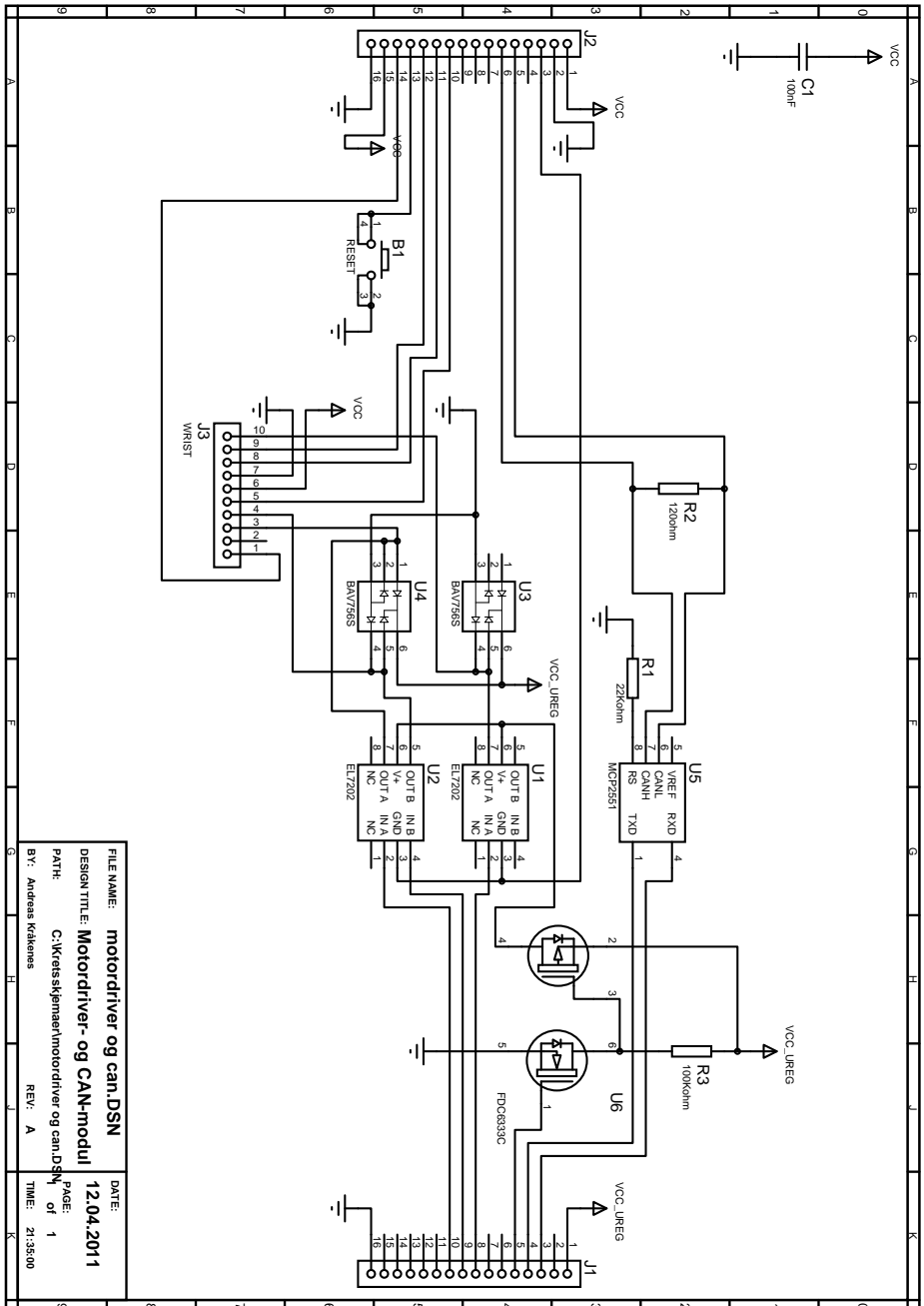
Kretsskjema og magnetholder



Figur B.1: Kretsskjema for den implementerte mikrokontrollermodulen.

Tabell B.1: Komponentliste for mikrokontrollermodul.

	Beskrivelse	Verdi	Produsent	Leverandør	Varenummer
B1	Button		Tyco Electronics	Elfa	35-665-48
C1	Kondensator	100nF	AVX	Farnell	1740614
C2	Kondensator	100nF	AVX	Farnell	1740614
C3	Kondensator	100nF	AVX	Farnell	1740614
C4	Kondensator	100nF	AVX	Farnell	1740614
C5	Kondensator	100nF	AVX	Farnell	1740614
C6	Kondensator	22pF	AVX	Farnell	1738922
C7	Kondensator	22pF	AVX	Farnell	1738922
J1	Konnektor	Header, Socket	Fischer Elektronik	Farnell	9728856
J2	Konnektor	Header, Socket	Fischer Elektronik	Farnell	9728856
J3	Konnektor	FFC/FPC, 10-pin	Würth Electronics	Elfa	43-502-59
R1	Resistor	10k Ω	Vishay Draloric	Farnell	1652827
R2	Resistor	0 Ω	Vishay Draloric	Farnell	1652824
R3	Resistor	0 Ω	Vishay Draloric	Farnell	1652824
U1	Mikrokontroller	AT90CAN128-16AU	Atmel	Farnell	1455065
X1	Krystall	16 MHz	Euroquartz	Farnell	1640875

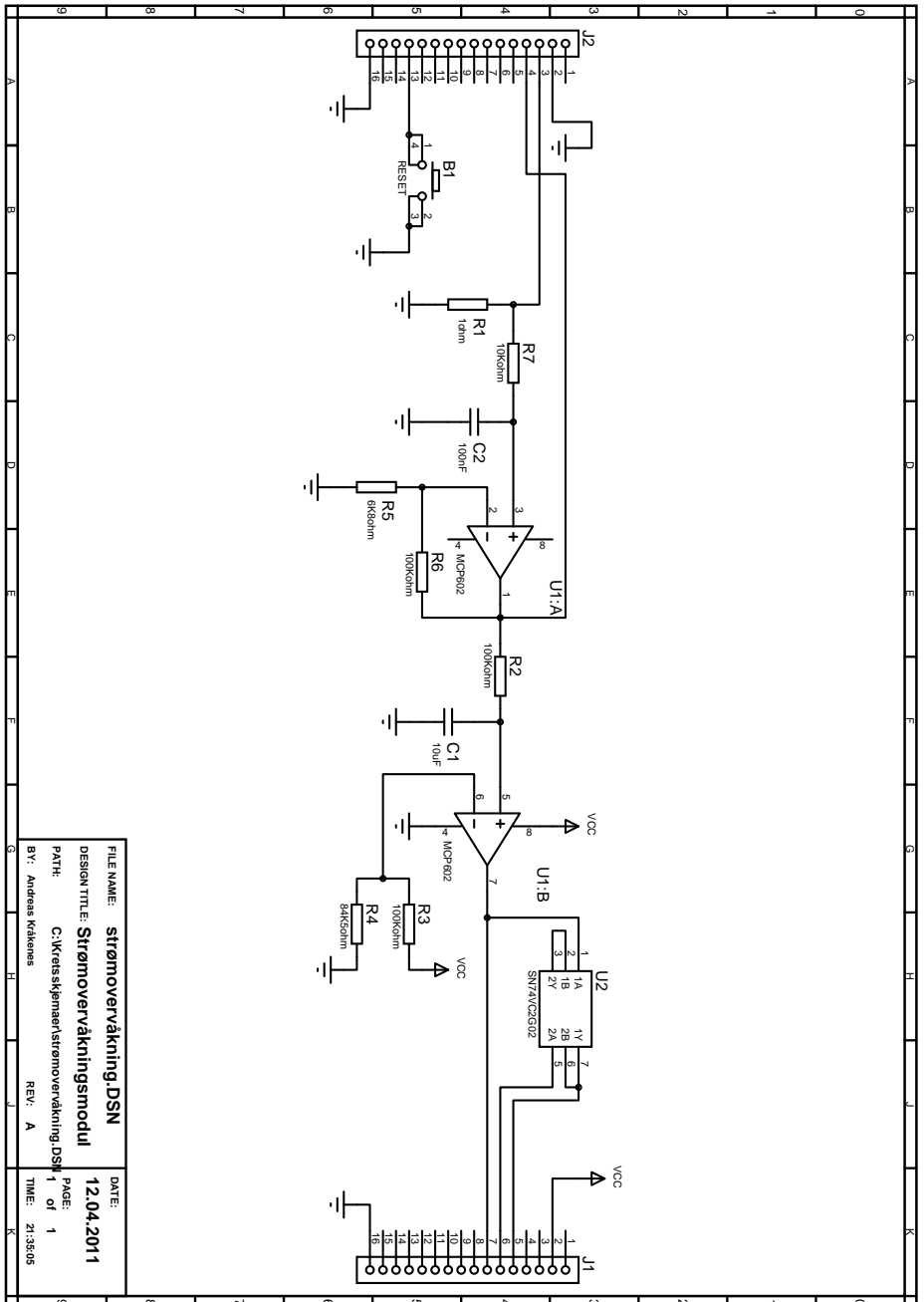


Figur B.2: Kretsskjema for den implementerte motordriver- og CAN-modulen.

FILE NAME:	motordriver og can.DSN	DATE:	12.04.2011
DESIGN TITLE:	Motordriver- og CAN-modul	PAGE:	1
PATH:	C:\Kretsskjema\motordriver og can.DSN	of	1
BY:	Andreas Kråkenes	REV:	A
		TIME:	21:35:00

Tabell B.2: Komponentliste for motordriver- og CAN-modul.

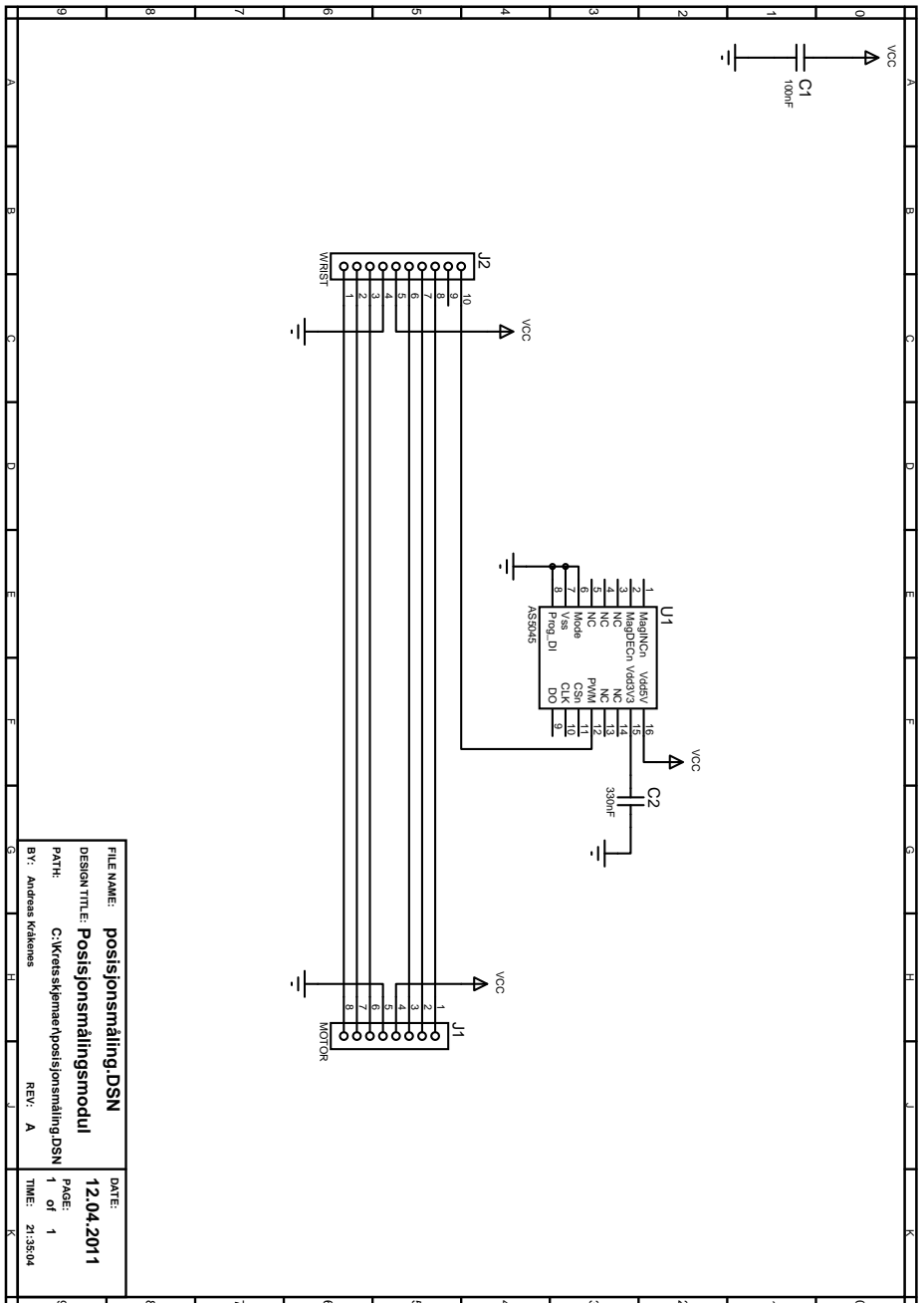
Beskrivelse	Verdi	Produsent	Leverandør	Varenummer
B1 Button		Tyco Electronics	Elfa	35-665-48
C1 Kondensator	100nF	AVX	Farnell	1740614
J1 Konnektor	Header, Socket	Fischer Elektronik	Farnell	9728856
J2 Konnektor	Header, Socket	Fischer Elektronik	Farnell	9728856
J3 Konnektor	FFC/FPC, 10-pin	Würth Electronics	Elfa	43-502-59
R1 Resistor	22k Ω	Vishay Draloric	Farnell	1738922
R2 Resistor	120 Ω	Vishay Draloric	Farnell	1652832
R3 Resistor	100k Ω	Vishay Draloric	Farnell	1738931
U1 MOSFET-driver	EL7202	Intersil	Farnell	1561929
U2 MOSFET-driver	EL7202	Intersil	Farnell	1561929
U3 Switcheddiode	BAV756S	NXP	Elfa	70-309-19
U4 Switcheddiode	BAV756S	NXP	Elfa	70-309-19
U5 CAN-transceiver	MCP2551	Microchip	Farnell	1467746
U6 MOSFET N&P-kanal	FDC6333C	Fairchild Semicon.	Farnell	1700671



Figur B.3: Kretsskjema for den implementerte strømvåkningsmodulen.

Tabell B.3: Komponentliste for strømovervåkningsmodul.

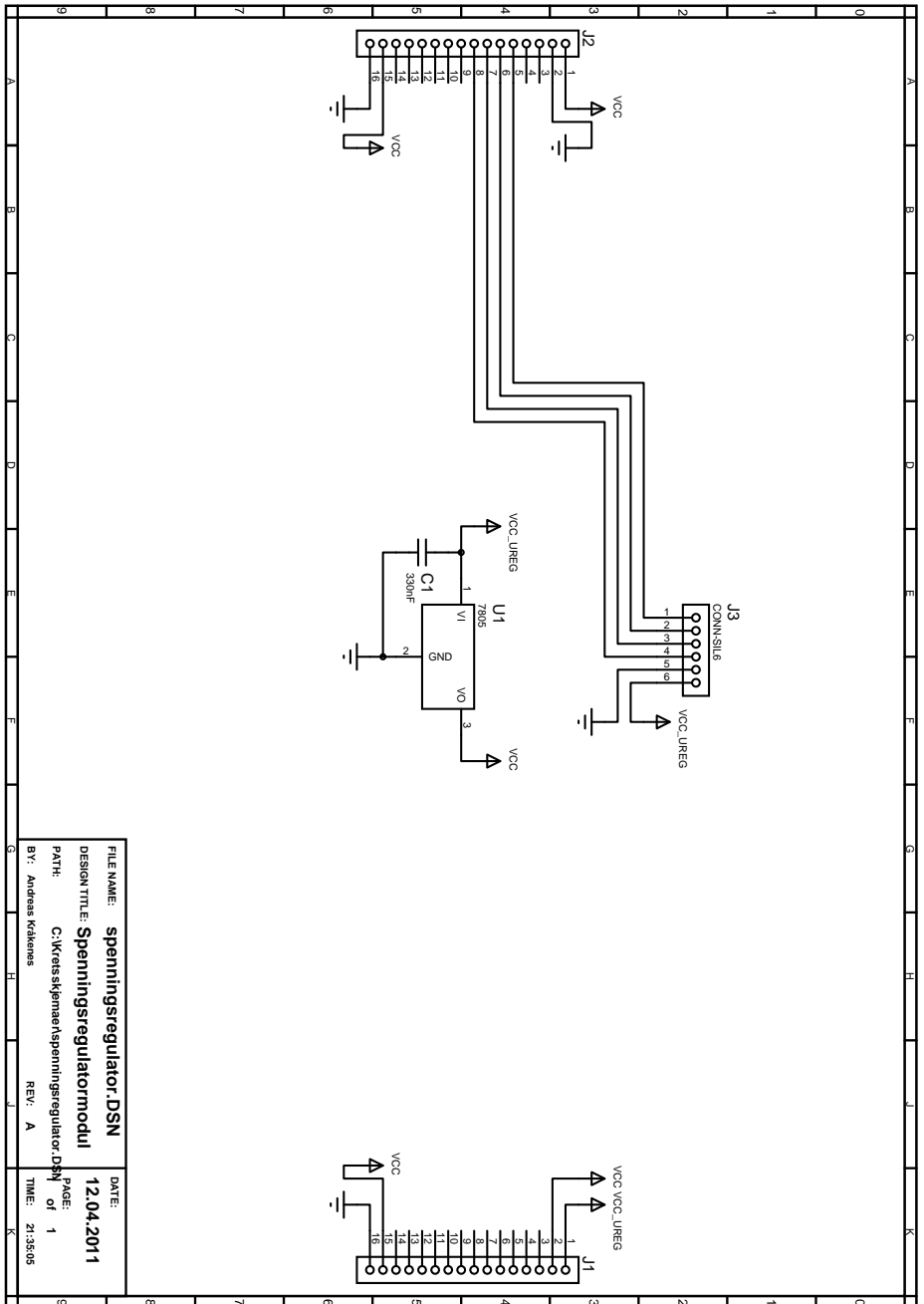
	Beskrivelse	Verdi	Produsent	Leverandør	Varenummer
B1	Button		Tyco Electronics	Elfa	35-665-48
C1	Kondensator	10uF	Taiyo Yunden	Farnell	1463375
C2	Kondensator	100nF	AVX	Farnell	1740614
J1	Konnektor	Header, Socket	Fischer Elektronik	Farnell	9728856
J2	Konnektor	Header, Socket	Fischer Elektronik	Farnell	9728856
R1	Resistor	1 Ω	Panasonic	Farnell	1717772
R2	Resistor	100k Ω	Vishay Draloric	Farnell	1738931
R3	Resistor	100k Ω	Vishay Draloric	Farnell	1738931
R4	Resistor	84,5k Ω	Welwyn	Farnell	1160395
R5	Resistor	6,8k Ω	Panasonic	Farnell	1577617
R6	Resistor	100k Ω	Vishay Draloric	Farnell	1738931
R7	Resistor	10k Ω	Vishay Draloric	Farnell	1652827
U1	Op-amp	MCP602	Microchip	Farnell	9758666
U2	NOR-gate	SN74LVC2G02DC/TR	Texas Instruments	Farnell	1236358



Figur B.4: Kretsskjema for den implementerte posisjonsmålingsmodulen.

Tabell B.4: Komponentliste for posisjonsmålingsmodul.

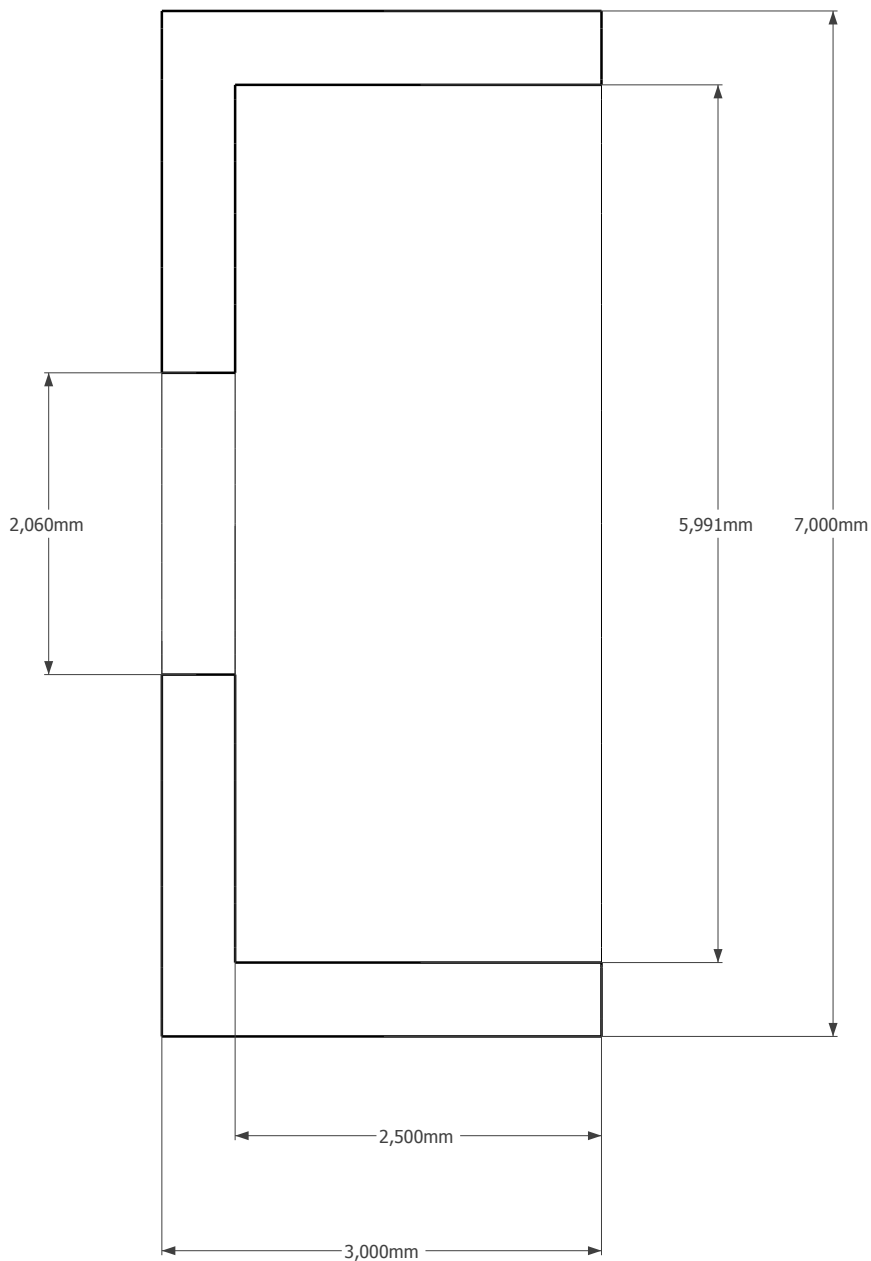
	Beskrivelse	Verdi	Produsent	Leverandør	Varenummer
C1	Kondensator	100nF	AVX	Farnell	1740614
C2	Kondensator	330nF	AVX	Farnell	1327681
J1	Konnektor	FFC/FPC, 8-pin	Würth Electronics	Elfa	43-502-58
J2	Konnektor	FFC/FPC, 10-pin	Würth Electronics	Elfa	43-502-59
U1	Magnetisk enkoder	AS5045	Austriamicrosystems	Farnell	1630801



Figur B.5: Kretsskjema for den implementerte spenningsregulatormodulen.

Tabell B.5: Komponentliste for spenningsregulatormodul.

Beskrivelse	Verdi	Produsent	Leverandør	Varenummer
C1 Kondensator	330nF	AVX	Farnell	1327681
J1 Konnektor	Header, Socket	Fischer Elektronik	Farnell	9729038
J2 Konnektor	Header, Socket	Fischer Elektronik	Farnell	9729038
J3 Konnektor	Header, vinklet	Molex	Farnell	7702784
U1 Spenningsregulator	MC7805	ON Semiconductors	Elfa	73-286-55



Figur B.6: Skisse av foreslått magnetholder med dimensjoner.

Tillegg C

CD

C.1 Rapport

- pdf-versjon av rapport
- figurer brukt i rapport

C.2 Kretsskjemaer

- mikrokontroller.pdf
- motordriver og can.pdf
- posisjonsmåling.pdf
- spenningsregulator.pdf
- strømovertvåking.pdf

C.3 3D-modell

- magnetholder.skp

C.4 Datablad

- 0620K 012B - Motor.pdf
- AC2690 - Sleperingkontakt.pdf
- AS5045 - Magnetisk enkoder.pdf
- AT90CAN128 - Mikrokontroller.pdf
- BAV756S - Friløpsdioder.pdf
- EL7202 - MOSFET-driver.pdf
- FDC6333C - N&P-kanal MOSFET.pdf
- MCP2551 - CAN-transceiver.pdf
- MCP602 - Op-amp.pdf
- MC7805 - Spenningsregulator.pdf
- SN74LVC2G02 - NOR-port.pdf

C.5 Programvare

- main.c
- can.c, can.h
- controller.c, controller.h
- current.c, current.h
- motor.c, motor.h
- position.c, position.h
- uart.c, uart.h