

TTK4551 - FORDYPNINGSPROSJEKT

I SAMARBEID MED SINTEF OCEAN AS

Konstruksjon av finger til avansert robothånd

Forfatter:
Albert Danielsen

Veiledere:
Øyvind Stavdahl
Aleksander Eilertsen

26. desember 2018

Oppgavetekst

Pick and place operations involving compliant objects still lag behind on implementation. Interaction with pliable and easily damageable materials, such as food, is still a human operated task. To facilitate a transition to robotics within food industries, robots need to be able to gain higher manipulation skills – on par with or beyond human abilities. Dexterity, defined as the ability of hand or end effector to relocate objects in an arbitrary way according to a given task, will be key to enable this shift. Manipulations are defined as dexterous when multiple fingers cooperate to grasp or manipulate an object.

In this assignment, the candidate will work along researchers at SINTEF Ocean and NMBU to build an end effector with proprietary novel sensor technology. In this project you shall start developing a finger for the described system.

1. Sett deg inn i litteraturen rundt bevegelige fingre for robotanvendelser, og gi en kort oversikt over de viktigste prinsipielle konstruksjonsalternativene som foreligger. Legg spesiell vekt på aspekter relatert til distribusjon av sensorer og aktuatorer i systemet, og kommunikasjon mellom disse.
2. Sett opp en funksjonsspesifikasjon for en finger som vil dekke behovene i det foreliggende tilfellet i samråd med oppdragsgiver.
3. Konstruer en finger basert på funnene fra de foregående punktene.
4. Hvis tiden tillater det, test ut kritiske deler av designet i form av en fysisk modell eller prototyp.

Sammendrag

Gjennom å gi robotgripere enn høyere grad av finmotorikk kan man realisere manipulatorer som er kapable til å utføre tradisjonelt sett menneskeutførte oppgaver innen matindustrien. Slik som eksempelvis håndtering av sild og tomat som SINTEF Ocean arbeider med i prosjektet iProcess.

I forbindelse med å lage en kostnadseffektiv robothånd med finmotoriske egenskaper er det blitt fremlagt en løsning for en robotfinger aktuert av børsteløse DC-motorer gjennom “sener”, med 3D printede deler og vinkelmåling ved hjelp av magnetsensor teknologi. Det er funnet funksjonelle spesifikasjonskrav til hvordan det ferdige systemet skal virke, ut ifra det er det funnet frem til tekniske krav for systemet og eksisterende løsninger er blitt vurdert. På grunnlag av dette presenteres en passende løsning for hvordan en finmotorisk finger kan realiseres.

Designet er ennå ikke realisert og det gjenstår å se om det vil oppfylle funksjonelle krav.

Innhold

1 Bakgrunn	1
1.1 iProcess	1
1.2 Finmotorikk i robotlitteratur	2
2 Funksjonell spesifikasjon	3
2.1 Nyttelast	3
2.2 Overordnet system	3
2.3 Utforming og aktuering	4
3 Litteraturstudie	5
3.1 Komplette løsninger	5
3.1.1 Shadow Dexterous Hand	5
3.1.2 Shadow modular grasper	6
3.1.3 Sandia Hand	6
3.1.4 Right Hand robotics ReFlex	7
3.1.5 Highly biomimetic grasper	7
3.1.6 Jamming gripper	8
3.1.7 DLR-Hand II	9
3.1.8 GRIBBOT	9
3.2 Typer aktueringssystem	10
3.2.1 Elektromotor via sener	10
3.2.2 Elektromotor direkte i ledd	11
3.2.3 Hybrid, drivkraft i ledd og via sener	11
3.2.4 Air muscle-aktuering via sener	11
3.3 Sensorer i robotgripere	11
3.3.1 3-axis Fingertip Sensor	12
3.3.2 BioTac Tactile Sensor	12
3.3.3 GelSight	12
3.4 Reverserbar kjøring (back-driveable)	13
4 Test av magnetsensor	14
4.1 Magnetsensor	14
4.1.1 Lodding	14
4.2 Testoppsett	15

4.3 Resultater	15
5 Resultat og diskusjon	17
5.1 Designfokus	17
5.2 Design	18
5.3 Montering	21
5.4 Styring og oppsett	21
5.5 Kostnad	22
5.6 Kompleksitet satt opp mot funksjonalitet	22
5.7 Fremgang	23
6 Konklusjon	24
A Arbeidstegninger for konstruksjon av finger	27
B Matlabkode for kalkulering bevegelsesområde	35

Kapittel 1

Bakgrunn

Gjennom utdanningen kybernetikk og robotikk på NTNU får man verdifull innspakt i strategier for å designe og styre roboter. Ved å kombinere denne kunnskapen med prinsipper fra tilgjengelig vitenskapelig robotlitteratur kan det settes et mål om å lage en konkurransedyktig robotgriper. Denne rapporten er utarbeidet som den konkluderende delen av fordypningsprosjektet TTK4551 som er vektlagt 7.5 studiepoeng og i dette tilfellet fungerer som forprosjekt til masteroppgave.

Oppgaver som å plukke opp og plassere gjenstander er utfordrende når objektet som skal flyttes på eller manipuleres er deformerbart. Interaksjon med materialer som lett skades, slik som mat, er fortsatt en primært menneskeutført oppgave. For å frembringe overgangen til robotikk innen matvareindustrien vil det være nyttig om robotgripes finmotorikk når opp til det nivået mennesker er på.

SINTEF har igangsatt flere prosjekter for å oppnå mer skånsom håndtering av fisk. Et av disse prosjektene er “Fremtidens teknologi for håndtering av pelagisk fangst om bord” som har som mål å “utvikle enda bedre og mer skånsomme systemer og løsninger for håndtering og oppbevaring av fangsten” [1]. Et annet prosjekt er “Ny teknologi for bedre fangsthåndtering (DANTEQ)” som har som formål å “fremskaffe ny kompetanse og utvikle metoder for å optimalisere håndtering av fisk ombord mht miljøbelastninger og råstoffkvalitet” [2].

1.1 iProcess

iProcess er et prosjekt styrt av SINTEF med mål om å utvikle nye løsninger og metoder for bærekraftig matproduksjon i Norge. Her skal det tas høyde for mindre produksjonskvanta og høy variasjon i råmaterialene for å muliggjøre økt lønnsomhet og høyere utbytte fra råvarene, som vil innebære en reduksjon i

mengden spiselige varer som blir kastet [3]. Et av undermålene til dette prosjektet er å utvikle teknologiske konsepter, som skal være tilpasningsdyktige til råvarer som innebærer et bredt biologisk mangfold.

Videre har iProcess et fokus på roboters gripeevne, det jobbes blant annet med salathoder, som kan være utfordrende da de kommer i forskjellige størrelser og fasonger. I tillegg tåler ikke salathodene å gripes for hardt rundt, noe robotgripere tradisjonelt sett ikke har måttet ta høyde for. Men gjennom dette prosjektet er fokuset på å oppdage motkraften og kompensere dette i gripebevegelsen [4].

1.2 Finmotorikk i robotlitteratur

Mennesker har generelt egenkapen til å utføre presise, små, raske og smarte manipulasjonsoppgaver. Mennesker legger veldig lite tanke i å utføre et grep, men om man studerer menneskelige grep nærmere kan man bli overrasket av hvor smarte de er. Å snurre en basketball på fingeren, strikke med tynt garn, plukke et popcorn-skall ut av tennene. Dette er alle eksempler på manøvrer som ikke tradisjonelt sett er utforbare av robotiske fingre eller hender.

I denne rapporten svarer finmotorikk til endeffektorers evne til å flytte objekter med samhandling mellom flere fingre, det svarer til ordet “dexterous” som ofte brukes på engelsk. Finmotorikk er noe ukonvensjonelt i forhold til den tidligere robotutviklingen, hvor roboter har hatt én oppgave de har spesialisert seg på. Likevel finnes det en del eksempler og litteratur på området “dexterous manipulation”, et utvalg går gjennom i denne rapporten

Kapittel 2

Funksjonell spesifikasjon

For å designe noe som skal konstrueres er det nødvendig å vite hvilken funksjon innretningen skal oppfylle. Dette kapitlet forsøker å beskrive de ønskede formålene og funksjonene den foreliggende robotgriperen skal ha. Formålet med griperen og fokuset for oppgaven er å designe, konstruere og styre en griper som skal brukes til å håndtere u-prosesserte matvarer som lett skades av en griper uten noen kraftkompensasjon. Gitte eksempler er gjennomsnittlige sild og tomater.

2.1 Nyttelast

At en griper skal håndtere sild og tomater innebærer krav til løftekapasitet og gripevidde. Sildene vi bruker som grunnlag for denne oppgaven veier generelt rundt 350g, mens en øvre grense er 700g. Tomater tenker vi på som rundt 65g. Vanlig størrelse for en sild er 25-37cm fra munn til halefinne, men gripingen skjer sannsynligvis om rygg og buk, hvor avstand er 5-9cm, på grunn av en fisk sin ovale form sett forfra er omkretsen i denne retningen anslagsvis 15cm [5]. Samtidig har en tomat en gjennomsnittlig omkrets på omtrent 16cm.

Det er silda som setter de øvre kravene til griperen i forhold til vekt. Likevel er det tomaten som setter øvre krav i forhold til gripeomkrets. Vi estimerer at en god løsning vil være for griperen å kunne løfte opp til 700g og ha mulighet til å gripe rundt et objekt som er 5 cm i diameter.

2.2 Overordnet system

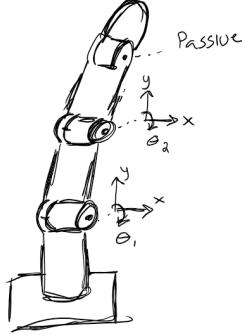
Griperen skal festes og brukes som endeffektor på en robotarm og benyttes under et større kontrollsysten. Det overordnede systemet som griperen skal

operere under tar inn bilder fra et kamera som tar 30 bilder i sekundet. Dette setter en begrensning for resten av systemet slik at griperen får posisjonsdata med en frekvens på 30Hz. Systemet kjører på gigabit ethernet.

Det er meningen at dette overordnede systemet skal planlegge gripebevegelsen til hånden. Det vil si at informasjonen som kommer inn til robotgriperen skal tolkes som koordinater i rommet, dette skal oversettes til en bevegelse fra fingrenes utgangsposisjon til et ønsket grep. Håndens reguleringssystem må så kompensere for kraft påtrykt objektet som skal gripes rundt.

2.3 Utforming og aktuering

Det er uttrykt et ønske fra oppdragsgiver om at hver finger skal ha tre ledd, der to av de roteres av hver sin motor. Det ytterste leddet i fingeren skal være passivt, det vil si ikke kunne aktueres. Figur 2.1 viser et tidlig konsept. Ønsket fart er gitt ved at fingrene skal kunne flytte seg hele sin rekkevidde på under ett sekund.



Figur 2.1: Konsepttegning fra tidlig i prosjektet.

Et system som minner om menneskets overføring fra muskelkraft til beinet via sener er ønskelig fra oppdragsgivers side da det gir mindre problemer med backlash når fingeren støtes mot sin kjøreretning (mer om dette i [6]). Tidligere forsøk er gjort med overføring av rotasjon via snekkeveksel (worm gear) som har ført til at motoren eller giret ødelegges. Skulle det ryke er det verdt å merke at sene-systemet sannsynligvis vil være enklere å bytte ut.

Kapittel 3

Litteraturstudie

3.1 Komplette løsninger

Det finnes mye litteratur som tar for seg komplette løsninger for robotarmer, noen som har som formål å erstatte menneskehender og andre som har mer industrielle formål som å sortere eller filetere. Her presenteres et utvalg som er funnet relevante i forhold til å designe en finmotorisk finger.

3.1.1 Shadow Dexterous Hand

Shadow Dexterous Hand (figur 3.1) er en antropomorf robothånd utviklet av Shadow Robot Company, i et forsøk på å komme så nærmest mulig finmotorikken i den menneskelige hånd [8]. Gjennom å ta i bruk 20 aktuerte frihetsgrader - tre i tre av fingrene, fem i tommelen, fire i lillefingeren og to i håndleddet - muliggjør den et vidt spekter av bevegelser. Med posisjon- og kraftsensorer har den mulighet til å være var om sine omgivelser når den beveger seg.

Tju motorer er styrt med PWM signal. Motorene har mulighet for PID reguleringsring som kan reguleres med hensyn på kraft eller posisjon. Med motorer festet i håndleddene overføres drivkraften opp til leddene i fingrene via et senesystem.

Denne er også tilgjengelig i "air muscle" variasjon, noe som betyr at den bruker pneumatikk istedenfor elektriske motorer for sammentrekning og utstrekning av ledd. Slike aktuatorer reagerer raskere enn den elektriske motparten. Der bruk av elektriske motorer muliggjør en full fingerleddbevegelse én gang i sekundet, er versjonen med ventilstyring kapabel til den samme bevegelsen på 5 ganger i sekundet.



Figur 3.1: Shadow Dexterous Hand fra Shadow Robot company. Hentet fra [7].

Halleffektsensorer brukes for å måle rotasjon i ledd. Taktile sensorer brukes i fingertuppene for å detektere berøring med en overflate, temperatursensorer er i tillegg implementert for å muliggjøre kompensasjon for varmevariasjoner. Kraftsensorer måler kraft i sener og muliggjør momentregulering.

3.1.2 Shadow modular grasper

Dette er en simplifisert versjon av Shadow Robot Companys Shadow Dexterous Hand. Med tre finger-moduler med tre frihetsgrader hver utgjør denne griperen 9 frihetsgrader. Utbyttbare fingertupper og strøm- og temperatursensorer i motorene gjør dette til en endeffektor med høy allsidighet [9].

Griperen aktueres med motorer fra maxon. Oppnår 10N kontinuerlig kraft i fingertuppene. Den har strøm og temperaturmåling i motor for nøyaktig kontroll. Hvert ledd har posisjonsmåling med 1kHz raske målinger.

Produsenten tilbyr også et bibliotek med forskjellige gripemetoder. Som de skriver på sin nettside har de jobbet med å få griperen til å «føle, tolke og utføre». Dette betyr at den kan se et objekt den skal gripe, gjenkjenne objektet og velge optimal måte å gripe på basert på utformingen av objektet.

3.1.3 Sandia Hand

Sandia hand er utviklet med fokus på lav kostnad og høy finmotorisk egenskap [10]. Denne griperen har den store fordelen å være modulær slik at den kan konfigureres på ulike måter og med forskjellig antall fingre i en utførelse optimal



Figur 3.2: Sandia Hand. Hentet fra [10].

for den gjenstanden den skal gripe om, vist i figur 3.2. Standardkonfigurasjonen har fire fingre, hver med tre frihetsgrader.

Hånden aktueres via elektromotorer i basen av fingrene som overfører moment til leddene via sener. Håndflatemodulen har 3D akselerometer, magnetometer og gyroskop for estimering av orientering og fart i håndens bevegelse. I tillegg har den taktile sensorer for å registrere at overflaten på fingrene berører noe.

3.1.4 Right Hand robotics ReFlex

Right Hand Robotics har utviklet flere en produktlinje med robotgripere kalt ReFlex [11]. ReFlex 1 er deres billigste alternativ med en prislapp på 3000 USD. Denne griperen har tre fingre, hver med ett bøyelig ledd som aktueres via en sene, hvor to av fingrene roterer. Dette gir til sammen fem frihetsgrader og muliggjør forskjellige innfallsvinkler for utførte grep.

Samtidig i ReFlex Plus og ReFlex TakkTile 2 versjonene har griperne sammenknyttet rotasjon mellom de to roterende fingrene. Noe som begrenser antallet frihetsgrader til fire. ReFlex 1 bruker 3 Dynamixel AX-12A og 2 Dynamixel XL-320 motorer som kjører på 12V likestrøm. Den dyreste versjonen, ReFlex TakkTile 2, har 14 taktile sensorer som muliggjør måling av berøringspunkter.

3.1.5 Highly biomimetic grasper

En høyst menneskelignende hånd er blitt utviklet av Zhe Xu ved University of Washington. Det som har muliggjort en høy grad av finmotorikk i denne robothånden er at det er blitt heklet kunstige muskler, sener og ledgbånd; 3D printede bein etter skannede modeller av en ekte skeletthånd og tynne gummiark er laserkuttet i et avansert design som gjør at den i høyeste grad kopierer den anatomiske oppbygningen i den menneskelige hånd [12]. Resultatet er en hånd som er kapabel til et vidt sortiment av forskjellige grep og mange finmotoriske interaksjoner med objekter.



Figur 3.3: Highly biomimetic grasper. Nederst til høyre: laserkuttede gummiark som fyller funksjonen til muskler. Bilde hentet og modifisert fra [12].

Hver finger har to festepunkter for to sener (bortsett fra tommelen som har tre) som hver er aktuert via en dynamixel servo motor. Senene overfører kraften til det ytterste og nest ytterste leddet i fingeren via talje-lignende laserkuttede ark festet til det 3D printede skjelettet. Gjennom bruk av gummiark som er tilpasset skjelettet får momentene fra hver av motorene en mer menneskelignende motstand.

3.1.6 Jamming gripper

Et mindre konvensjonelt design er en pneumatisk aktuert ballong [13]. Ved bruk av granulært materiale inni ballongen kan den omslutte et objekt før den suger luft ut av ballongen og griper rundt objektet, slik som i figur 3.4. Dette enkle designet fører til en endeffektor som kan gripe mange forskjellige gjenstander, men den vil likevel lett bli utkonkurrert av tradisjonelle robotmanipulatorer til å gripe spesifikke gjentander.



Figur 3.4: Pneumatisk aktuert ballong som griper en gjenstand. Hentet og modifisert fra [13]

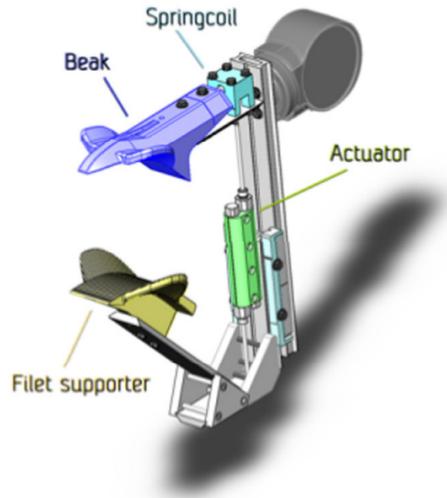
3.1.7 DLR-Hand II

Med et mål om kompakt design har DLR-Hand II, utviklet ved det tyske romfartsforskningssenteret, utviklet denne menneskelignende griperen med fullt integrerte aktuatorer i leddene i 1997 [14]. Aktueringsystemet består av børsteløse likestrømsmotorer, belter og harmonic drive gir for å gi kompakte ledd. Hver finger er utrustet med strekkapp-baserte momentsensorer og potensiometer med analoge tredje ordens filter. Leddenes posisjon er kalkulert basert på potentiometeravlesingene.

3.1.8 GRIBBOT

SINTEF sin egenlagde griper i iProcess prosjektet er en litt annerledes gripeinnretning, den forsøker å etterligne en menneskers grep under filetering og er utarbeidet som en simpel lineær føring av som åpner eller lukker grepet [15]. Denne har 3D syn og er kapabel til å lokalisere griepunktet på kyllingfileter, noe som muliggjør en filetering på under 4.75 sekunder. Den er spesiallagd for å kunne håndtere kyllingfileter og består av et ‘nebb’ og en filetgriper. Begge disse delene er 3D printet av utviklerne.

Denne griperen bruker trykkluft i kombinasjon med ventiler til å åpne og lukke grepet. Det er også inkorporert en spiralfjær (springcoil i figur 3.5), blant annet for å gjøre at kraften filetene utsettes for dempes. Det er ikke bygd inn sensorer i griperen, den er avhengig av det overordnede visjonssystemet for å utføre grep.



Figur 3.5: GRIBBOT, utviklet ved SINTEF. Hentet fra [15].

3.2 Typer aktueringssystem

Det kommer frem i den gjennomsøkte robotlitteraturen at det er et bredt spekter av måter å aktuere systemene på. De fleste bruker elektromotorer for drivkraft, men måten kraften overføres fra motoren til de bevegelige delene varierer.

3.2.1 Elektromotor via sener

På samme måte som i en menneskelig hånd hvor sener brukes for å overføre bevegelsen fra muskelsammentrekninger i overarmen ut til fingrene, kan snorer overføre momentet fra en elektrisk motor til fingrene. Ved å plassere en motor i basen av en griper kan den ene siden av en sene festes rundt akselen til motoren og den andre enden til et dreieende punkt i basen til leddet. Dette medfører en velkommen giroverføring. Det trengs nemlig en viss giring for å sørge for at leddet har kapabelt dreiemoment.

Om sener skal brukes til å overføre moment står man også ovenfor valget mellom en motor for begge dreieretninger, eller å feste senen på en slik måte at en motor kan dreie leddet i to retninger. Fordelen med det første er at det gir et litt mindre komplekst design, det å feste tråden på en slik måte at én motor kan kjøre i begge retninger kan vise seg vanskelig. På den annen side er fordelen med én motor at man sparer mye plass og reguleringen vil sannsynligvis bli noe lettere.

3.2.2 Elektromotor direkte i ledd

Motorer kan plasseres direkte i leddene, dette gjør åpenbart at griperen blir mye større og tyngre i fingrene, framfor å plassere aktuatorer en distanse borte fra leddene. Regulatoren for posisjon og kraft må da også kompensere for denne vekten, og det vil stilles et større krav til motorenes dreiemoment. Giring vil være vanskelig, da det øker størrelsen ytterligere.

3.2.3 Hybrid, drivkraft i ledd og via sener

Man kan kombinere metodene beskrevet i kapittel 3.2.1 og 3.2.2 for å lage en hybrid. Drivkraften kan overføres via sener i det ene leddet, mens det andre ledet aktueres direkte fra motorens aksel. På denne måten kan man redusere vekten ytterst i fingeren, mens man får fordelen av å slippe en av de to senene.

3.2.4 Air muscle-aktuering via sener

Alternativene er ikke begrenset til å bruke elektriske motorer. Trykkluft kan også brukes, og vil generelt gi raskere responstid enn bruk av elektriske motorer. Fremtreden av noe som minner om menneskelige muskler er en mulighet verdt å vurdere [16]. Disse består av et vevd materiale. Om man fyller de med luft trekker de seg sammen i lengde, om man suger ut luft og skaper et undertrykk på innsiden vil de komprimeres i radius, men strekke seg ut i lengde. Denne aktueringsmetoden kan også kombineres med sener for å aktuere ledenes bevegelse. Shadow Robot Company selger en slik løsning, nevnt i kapittel 3.1.1.

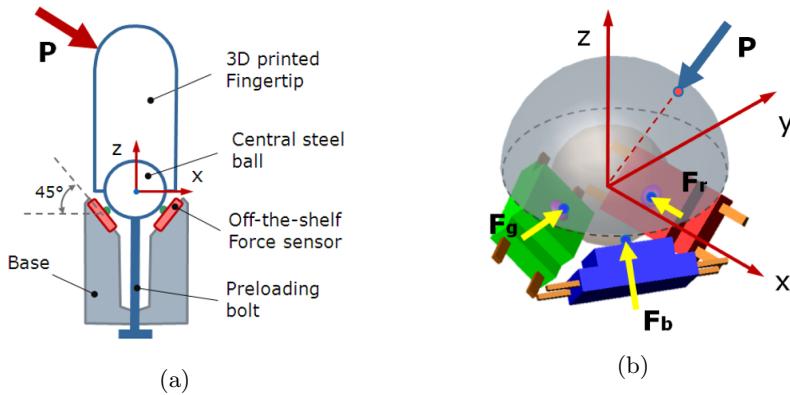
Det som taler mot denne metoden er at det krever en trykkluftbeholder, noe som kompliserer designet betydelig. Samtidig er det et designmål i dette prosjektet om at deler som brukes skal være lett tilgjengelige og være av relativ lav kostnad.

3.3 Sensorer i robotgripere

Det finnes en lang rekke sensorer som hyppig er brukt i anvendelser relatert til finmotoriske bevegelser av robothender, slik som vinkelsensorer, fart- og akse-lerasjonssensorer og gyrometer. Her presenteres noen litt mer ukonvensjonelle sensorsammensetninger.

3.3.1 3-axis Fingertip Sensor

Gjennom 3D printing er det blitt laget en finger som kombinerer tre Honeywell kraftsensorer i et sirkulært mønster [17]. Hver av de plassert med føleren inn mot midten hvor fingertuppens midtpunkt er montert. Prinsippet er visualisert i figur 3.6. Med en slik kombinasjon av tre sensorer kan man sammenligne verdiene og estimere retningen og størrelsen på påtrykt kraft.



Figur 3.6: (a): Oppbygning av 3-axis fingertip sensoren. (b): 3D modell av hvordan kraft tolkes fra stålkula i senter til sensorene. Hentet og modifisert fra [17].

3.3.2 BioTac Tactile Sensor

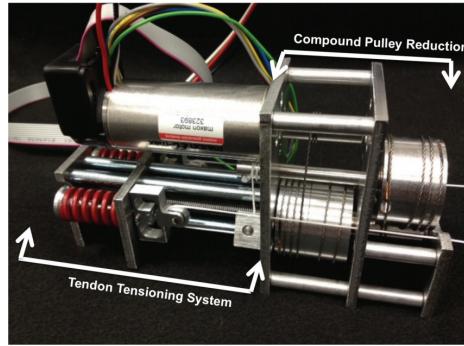
BioTac Tactile Sensor er en sensor plassert i en fingers ytterste ledd som muliggjør detaljert kraft-, mikrovibrasjon- og temperatursensordata [18]. Dette er den samme sensorikken som menneskefingre besitter og taktile sensorer brukes til å etterligne dette. Med denne informasjonen kan man gjennom signalbehandling estimere kontaktpunkter.

3.3.3 GelSight

GelSight er en MIT-utviklet taktil sensor som ved hjelp av et lite kamera og lys i tre farger måler deformasjon på en gjennomsiktig gelepute. Sensoren gir ut et topografisk bilde som kan prosesseres med generelle bildegenkjenningsmetoder for å gjenkjenne forskjellige teksturer og hvor langt inn i geléen objektet er i hver del av bildet [19]. Dette muliggjør estimering av kraft basert på hvor kraftig deformasjonen er, men også muligheten for å registrere hvilken retning kraften påtrykkes fra [20].

3.4 Reverserbar kjøring (back-driveable)

Et problem med robotgripere aktuert med elektriske motorer via gir er at om man gir dem et rykk mot sin kjøreretning kan deler som gir, motor eller deksel bli ødelagt eller falle ut av posisjon. Et forslag til en løsning på backlash-problemet med minimalt tap i giroverføring er gitt i [21]. Gjennom å bruke et aktueringssystem som har en to-stegs giroverføring med tråder oppnås en 12:1 giroverføringsratio, mens trådens grad av spenn kan justeres med en fjær for å nå en dynamikk hvor backlash absorberes i fjæra.



Figur 3.7: Aktueringssystem for robothånd med sener foreslått av Randall B. Hellman og Veronica J. Santos, hentet fra [21].

I figur 3.7 kan vi se hvordan systemet er satt sammen. Det som kanskje er bekymringsverdig er at systemet blir ganske stort med en slik komplisert girboks. Og om man skal ha opp til fire fingre, hver med to frihetsgrader, trenger man potensielt 8 slike overføringer.

Kapittel 4

Test av magnetsensor

Da mye av reguleringen avhenger av en pålitelig vinkelmåling direkte i de akutte leddene, har en magnetsensor blitt testet for bruk. Dette kapitlet tar for seg testing av en slik sensor.

4.1 Magnetsensor

Det ble tidlig ønsket å undersøke om en magnetsensor kunne oppfylle de spesifikasjonene som er ønsket for dette prosjektet og det ble sett på som nødvendig å bli bedre kjent med en slik enhet. Det ble derfor kjøpt en MA302 12-Bits, digital, kontaktløs vinkelsensor fra produsenten Monolithic Power.

4.1.1 Lodding

Magnetsensoren har en dimensjon på 3mm x 3mm og er en overflatemonterbar integrert krets. Derfor ble det valgt å lodde denne til en krets som har støtte for overflatemontering på den ene siden og hvor lederne føres over til DIP (Dual in-line package) på den andre siden (figur 4.1). Slik kan sensoren festes på et standard koblingsbrett for raskere prototyping.

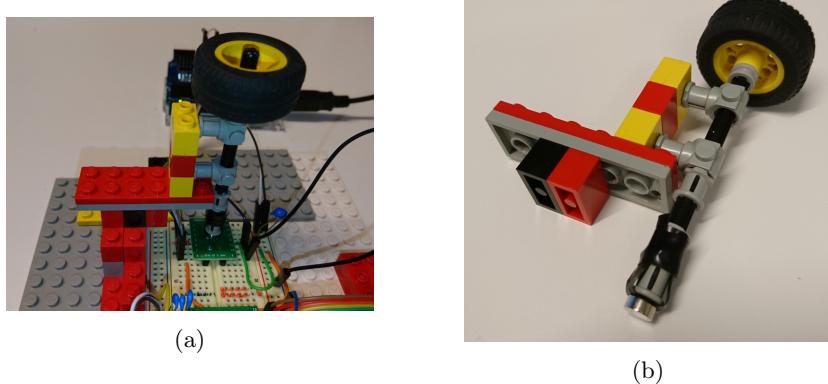
Loddingen ble gjort på verkstedet til teknisk kybernetikk på Gløshaugen. Ved å påføre loddepasta langs skinnene hvor sensoren skulle overflatemonteres og bruke varmluft på 350°C i tillegg til digitalt mikroskop var vi i stand til å få sensoren montert på kretskortet og verifisert at den fungerer.



Figur 4.1: Magnetsensoren overflatemontert på kretskort.

4.2 Testoppsett

For å teste sensoren ble de bygd et stativ rundt av Lego for å sørge for at sensoren sto så stille som mulig i forhold til magneten. Kanskje litt primitivt som man kan se i figur 4.2, men man bruker vel det man har tilgang på.



Figur 4.2: (a): Testoppsettet med magnetsensor i bunn og magnet montert på Lego-aksel. (b): Magneten i tuppen av legoakselen, festet med teip.

For å teste magnetsensoren ble et tilgjengelig bibliotek fra produsenten brukt. Koden ble kjørt på en Arduino Uno, et mikrokontrollerbrett som er godt tilpasset rask prototyping. Denne gjorde det mulig å kommunisere med den integrerte kretsen via SPI (Serial Peripheral Interface), en protokoll som bruker fire pins for å overføre en datapakke med vinkelen, i dette oppsettet i 16 bits format.

4.3 Resultater

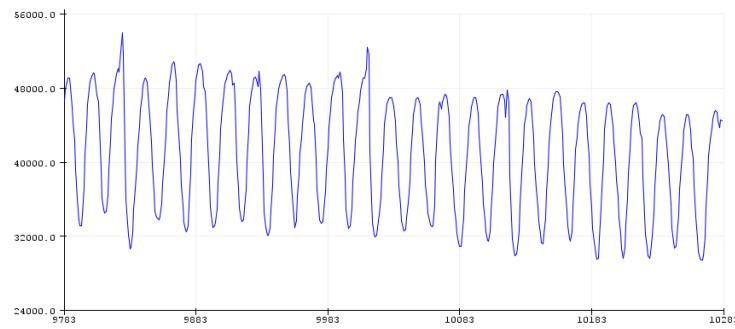
Magnetsensoren viste seg å være veldig lett å kommunisere med, den virker presis og gir stabile målinger over lengre tid. Testoppsettet fører til at det er en

del feilkilder, men det reelle resultatet vil nok være bedre enn det denne testen konkluderer med.

Figur 4.4 viser verdiene sensoren gir når magneten i testoppsettet vris med og mot klokka manuelt. Denne bevegelsen vil være nær den vi ønsker å oppnå med griperen som designes i dette prosjektet og vi ønsker derfor å ta med denne sensoren videre i designet.

```
1 #include <MagAlpha.h>
2 #define SPI_SCLK_f 10000000 // SPI Clock frequency
3 #define SPI_CS_PIN 7 // SPI Chip Select
4
5 MagAlpha magAlpha;
6
7 void setup() {
8     // Start i normalt modus
9     magAlpha.begin(SPI_SCLK_f, MA_SPI_MODE_3, SPI_CS_PIN);
10    Serial.begin(115200);
11 }
12
13 void loop() {
14     double angle = magAlpha.readAngleRaw();
15     Serial.println(angle, 5);
16     delay(25);
17 }
```

Figur 4.3: Kodesnutt med Arduino-kode for printing av magnetsensorverdier.



Figur 4.4: Plot av sensorens avlesninger når magneten vris med og mot klokka sporadisk.

Kapittel 5

Resultat og diskusjon

For å starte konstruksjonen av fingeren og deretter være klar til å produsere en hel griper er det her fremlagt et forslag til design. Designet er basert på den funksjonelle og tekniske spesifikasjonen, samt gjennomgangen av eksisterende robotgripere.

5.1 Designfokus

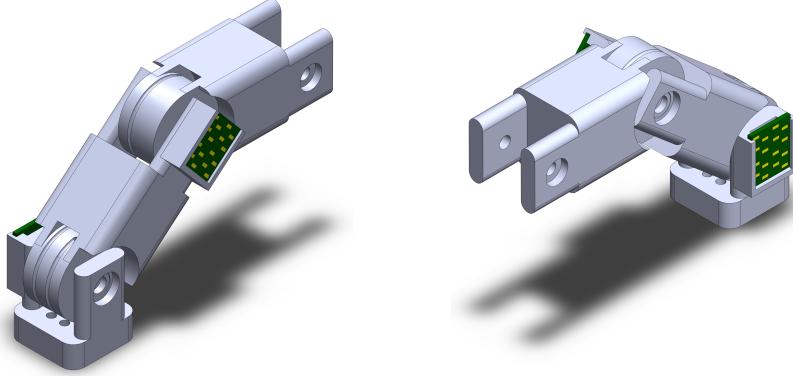
Designet dro inspirasjon fra den tilgjengelige litteraturen rundt robothender. Dette omfatter både industrielle manipulatorer og robotiske håndproteser. Industrielle manipulatorer viser seg gode i de oppgavene de har, nemlig å manipulere gjenstander ved å gripe, flytte og plassere, eller å endre form på gjenstander ved å kutte, skjære, stikke, rive, skrelle, osv. Mye inspirasjon til hvordan man kan utføre slike manipulative oppgaver er hentet herfra. Samtidig forteller litteraturen rundt robotiske håndproteser hvordan man kan lage en fingernem griper, men ettersom dette er robothender som skal festes på mennesker så betyr det at de skal utformes i begrenset størrelse og vekt.

Målet med dette prosjektet er å kombinere den kraften som eksisterer i griperne fra industrielle applikasjoner med den fingernemheten som finnes i robotiske håndproteser. Dette kan oppnås ved å bruke motorer i liten størrelse, men som fortsatt yter kraftig moment; sensorer som er små og smart fordelt utover griperen; men som likevel gir nøyaktig informasjon om omgivelsene; et «senesystem» som gjør det mulig å plassere motorene bort fra leddene, men gjennom smart giring gir tilstrekkelig moment; 3D printede ledd som åpner opp for å raskt lage nye revisjoner i liten vekt og et styresystem med basis i avanserte reguleringsmetoder som sørger for presis og rask styring.

5.2 Design

Én finger er utført i 7 deler, synlig i figur 5.1:

- Base
- Grunnfalang
- Midtfalang
- 4 pluggar

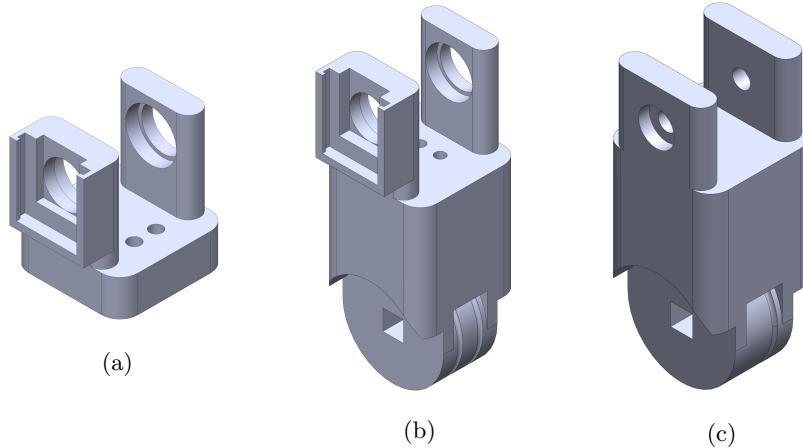


Figur 5.1: Forslag til fingerdesign fra to vinkler.

Basen, grunnfalangen og midtfalangen er utført som i figur 5.2. I tillegg brukes to magneter, fire kulelager med E-ring og to magnetsensorer med kretskort. Magnetenes funksjon er å gi vinkelmåling til kretskortet som skal sendes videre til styresystemet. Pluggene trengs for å montere hver del til neste ledd, og inkluderer en utskjæring med dimensjon som passer å plassere magneten i. Valget landet på børsteløse likestrømsmotorer for å kontrollere vinkelen på hvert av de to leddene som skal aktueres [6].

Egne pluggar er designet med tilpasset form for magnetene med diameter på 6mm på den ene siden og firkantet utforming på den andre siden for å rotete med leddet. Det er viktig at leddet som pluggen tres inn på roterer med magneten, derfor er det plassert kulelager mellom leddene, slik at de kan rotere med minimal friksjon. Kulelagrene har et indre diameter på 10mm og en ytre diameter på 14mm. Magnetsensoren plasseres nærmest sensoren ved å tre den ned på skinnen som er en del av konstruksjonen av basen og grunnfalangen.

Forslaget innebærer at dreiemomentet overføres gjennom sener fra motorene til leddene og at en motor driver hvert ledd i begge retninger som beskrevet i kapittel 3.2.1. Basert på gjennomgangen av designet av spesielt Shadow Dexterous Hand (kapittel 3.1.1), Right Hand ReFlex (kapittel 3.1.4) og Highly biomimetic grasper (kapittel 3.1.5) innebærer det en større fordel enn direkte aktuering i leddene som brukt i DLR-Hand II (kapittel 3.1.7). Den største fordelen er at



Figur 5.2: De tre hoveddelene. (a): Base. (b): Grunnfalang. (c) Midtfalang.

man slipper vekten av motorene i fingerleddene. For å omdanne dreiemomentet fra motoren til et optimalt bruksdreiemoment undersøkes muligheten for å gire dette gjennom en passende girboks i [6].

Systemet er designet slik at senene som kommer fra girboksen skal føres via fingeren og rundt leddet før den samme senen sendes tilbake til giret, det er én sammenhengende snor med andre ord. Den ene senen tres gjennom basen og deretter rundt det første leddet for å drive dette rundt. Den andre senen føres langsved det første leddet deretter opp igjennom hull i senter av grunnfalangen før det vendes rundt leddet på midtfalangen og gjennom hull der. Senene sikres fast i hullene gjennom rotasjonssylinderen med en liten plugg. Hvordan senene skal føres er tydelig i side 2 av vedlegg A som viser et snitt av fingeren langs der tråden til midtfalangen skal føres.

Senen som føres via det første leddet til det neste må helst ikke dras i av bevegelse i det første leddet, dette vil føre til at man mister ønsket posisjon. Det tas ikke høyde for dette i designet men ønsker å ta høyde for det i reguleringen, her vil det eksperimenteres med bevegelsen og dynamikken vil finnes for å vite hvor mye det andre leddet må dreie for å kompensere for bevegelse i det første leddet.

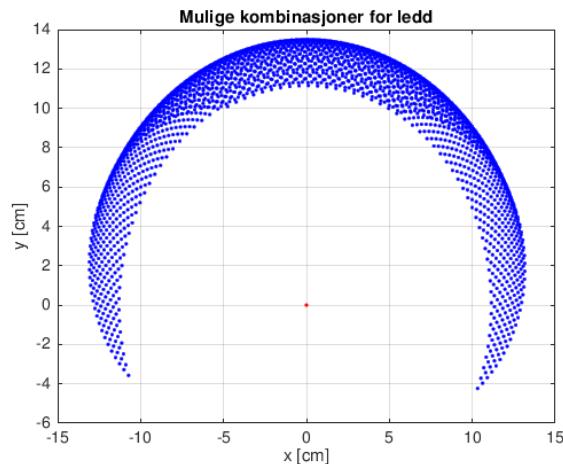
I og med at fingeren skal ha et ytterste passivt ledd (noe à la figur 5.3) innebærer forslaget å feste de to ytterste leddene via en bladfjær for å gi en bøyelig dynamikk med litt motstand. Dette leddet er ikke med i den presenterte modellen, men det er tatt høyde for at det skal plasseres ytterst. Gjennom tester skal dynamikken modelleres og gjøres kjent i reguleringsmodellen.

Fingeren er bygd slik at når den dreier vil den ha en mekanisk ytre grense for bevegelse. Begge leddene gir en yttergrense på $\pm 20^\circ$ i forhold til om leddet stakk rett ut fra det forrige. Med tre sammensatte deler på 5.5 cm på det innerste



Figur 5.3: Tommel 3D-printet ved SINTEF for bruk med GelSight sensor.

(grunnfalang), 5 cm på det neste (midtfalang) og en ytterste del på 3cm med passivt ledd som stikker rett ut fra forrige ledd blir mulig bevegelsesområde som gitt i figur 5.4. Plottet er laget ut fra koden i vedlegg B.



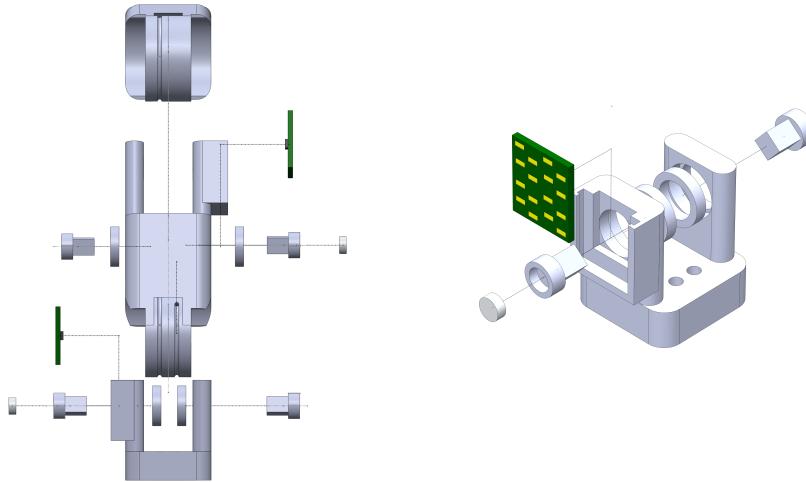
Figur 5.4: Mulig bevegelsesområde for fingerdesign. Plottet med MATLAB.

En magnetsensor er blitt testet i kapittel 4. Denne viser seg å være god til det formålet den skal fylle. Derfor er det valgt å gå videre og bruke denne flere steder i designet, både i den indre reguleringssløyfa med styring av motoren [6] og i den ytre sløyfa med regulering av vinkelen på de to aktuerte fingerleddene.

Mye tid er blitt brukt til å lære CAD-design slik at det ved oppstart på hovedoppgaven ikke vil være noe behov for det. Etter testing av dette designet vil revisjonen av en ny finger skje raskt. Gjennom å 3D printe deler kan man raskt lage nye prototyper og teste nye designforslag. I forbindelse med å lage deler som skal 3D printer er det verdt å nevne at det er tatt forhåndsregler for å unngå å lage for tynne deler i designet. Dette ville ført til at det ville vært umulig å printet designet eller det ville lett blitt ødelagt.

5.3 Montering

Fingeren monteres ved å først plassere kulelager med E-ring inn i basen, deretter føre grunnfalangen ned på basen slik at hullene står i flukt før pluggene kan tres inn gjennom basen og slik montere grunnfalangen. Magneten plasseres inn i pluggen, før magnetsensorkretsene sklis ned i sporet på basen. Neste ledd settes sammen i samme rekkefølge: kulelager, så neste ledd, deretter magnet og plugger og til slutt magnetsensorkort. Monteringen er illustrert i figur 5.5 og i vedlegg A "Konstruksjon".

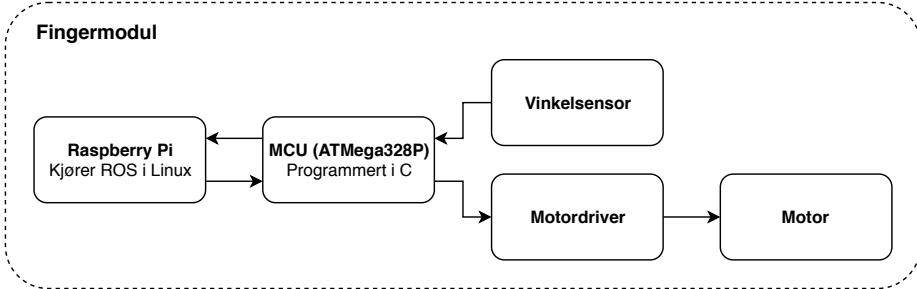


Figur 5.5: Montering av finger.

5.4 Styring og oppsett

Maxon motorene støtter et kommandobibliotek i C++, dette gjør at det blir et naturlig valg for styring av enheten. ROS (Robot Operating System) tenkes også brukt for å bidra i de kinematiske kalkulasjonene slik at styresystemet kan ha et best mulig estimat av griperens konfigurasjon.

Det foreligger et mål om å implementere en kinematisk modell for styring av griperen. Denne vil implementeres i ROS på en Raspberry Pi og vil inneholde den kinematiske modellen. Her vil den målte posisjonen til fingeren være kjent og det vil være denne enheten som tar inn nye koordinater og bevegelsesmønstre. Det vil kommuniseres til mikrokontrollerenheten (ATMega 328P) som vil lese vinkelsensorenes avlesning gjennom SPI og sende det tilbake til Raspberry Pi-enheten. Prinsippet er visualisert i figur 5.6. Ut ifra avlesningen og posisjonen til leddene gis et kontrollsignal til motordriveren, via mikrokontrollerenheten (mer om dette temaet i [6]).



Figur 5.6: Planlagt oppsett for kommunikasjon mellom enhetene i systemet.

5.5 Kostnad

I et prosjekt som dette burde man sammenligne kostnaden på det man designet opp mot kommersielle produkter. Om det er mulig å kjøpe et bedre produkt billigere enn å lage det selv er det naturligvis lurt å bare kjøpe det bedre produktet. I dette prosjektet skal nylig utviklede sensorer inkorporeres, noe som kan være vanskelig å kombinere med et arbitrært kommersielt produkt.

Robotgriperen ReFlex 1 fra Right Hand Robotics er, så langt som er oppdaget i denne rapporten, det tilgjengelige (på forhåndsbestilling) produktet som tilbyr mest funksjonalitet for pengene. Det er vanskelig å si at prosjektets framtid vil resultere i et system som konkurrerer i funksjonalitet og allsidighet, men det kommer sannsynligvis til å bli billigere og være bedre tilrettelagt for den gitte funksjonspesifikasjonen.

5.6 Kompleksitet satt opp mot funksjonalitet

Noe som lett skjer i et slik prosjekt er at man ønsker mer og mer funksjonalitet, noe som nærmest eksponentielt påvirker kompleksiteten til det som skal konstrueres.

Det kan diskuteres i hvor stor grad det er lurt å blindt kopiere den menneskelige håndens dynamikk om det man ute etter er god finmotorikk. På den ene side er det ingen utviklere av robothender som kan påberope seg å ha utviklet en hånd som utforder menneskehånden i alle scenarier, det utvalget som er gjennomgått i denne rapporten har alle sine sterke og svake sider. Zhe Xu sin robothånd, diskutert i kapittel 3.1.5, tar store steg for å lage et avansert design som kommer veldig nære den menneskelige hånden. Det som fremkommer i rapporten [12] er også at den kopierer menneskefingerens hystereselignende bevegelse. Der utstrekning av fingeren følger en annen bane enn den etterfølgende sammentrekningen.

5.7 Fremgang

Fremgangen så langt i dette prosjektet samstemmer ikke med tidsplanen som forelå før prosjektstart. Det overordnede målet for denne prosjektoppgaven var å produsere en aktuert finger som kunne testes og verifiseres opp mot en lastcelle for å kunne godtas som en fullgod løsning. Dette kan man i ettertid si var et urealistisk mål, prosjektet startet litt senere enn det som hadde vært optimalt. Det viste seg litt vanskelig å finne tid til å møtes og definere problemstilling og funksjonell spesifikasjon for både studentene og veilederne, i tillegg ble tidsresursene feil brukt da det ble ventet uforutsett lenge på bestilt motor.

Kapittel 6

Konklusjon

Gjennom dette prosjektet er det blitt utviklet et design for en finmotorisk robotfinger ut fra foreliggende funksjonskrav. Hvorvidt fingeren oppfyller funksjonskravene gjenstår å se og vil kreve at den fysisk printes, monteres og testes opp mot nevnte krav.

Det er blitt presentert et litteraturstudie for ulike konstruksjoner av robothender for å finne gode løsninger for hvordan et system burde bygges. Hovedfunnene etter gjennomgangen er å holde designet simpelt og kostnadseffektivt, bruke sener for å dreie begge aktuerte ledd i fingeren, bruke pålitelige vinkelsensorer i form av en magnet og magnetsensor og utføre fingeren i flere 3D printede deler for så å sette den sammen.

Arbeidet vil fortsette med at robotfingeren realiseres, styres og testes i en masteroppgave. Når dette er gjort vil designet revideres og hovedfokuset vil være på å få flere fingre til å samarbeide for å utgjøre et system for finmotorisk griping, med robothånd og styresystem.

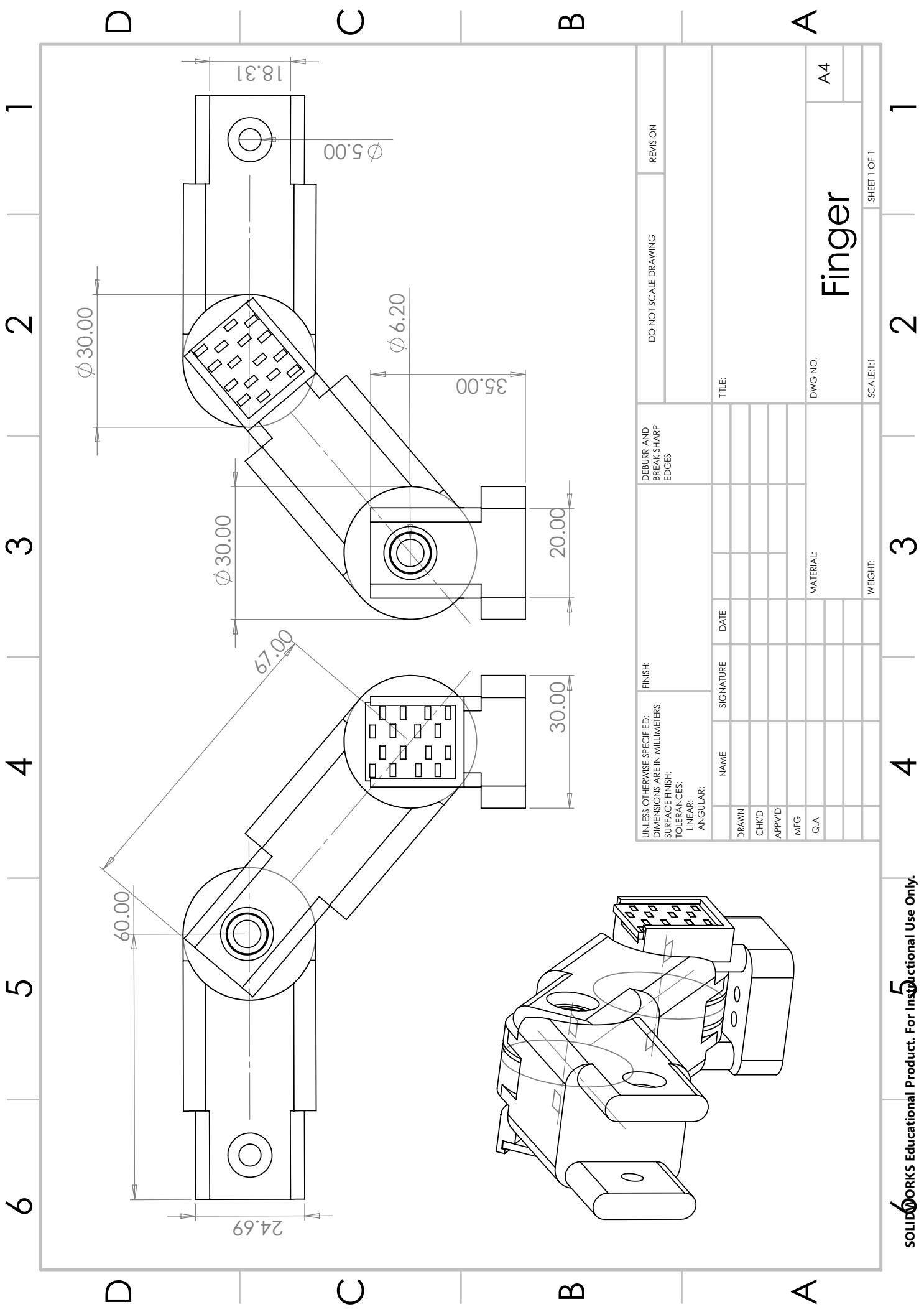
Bibliografi

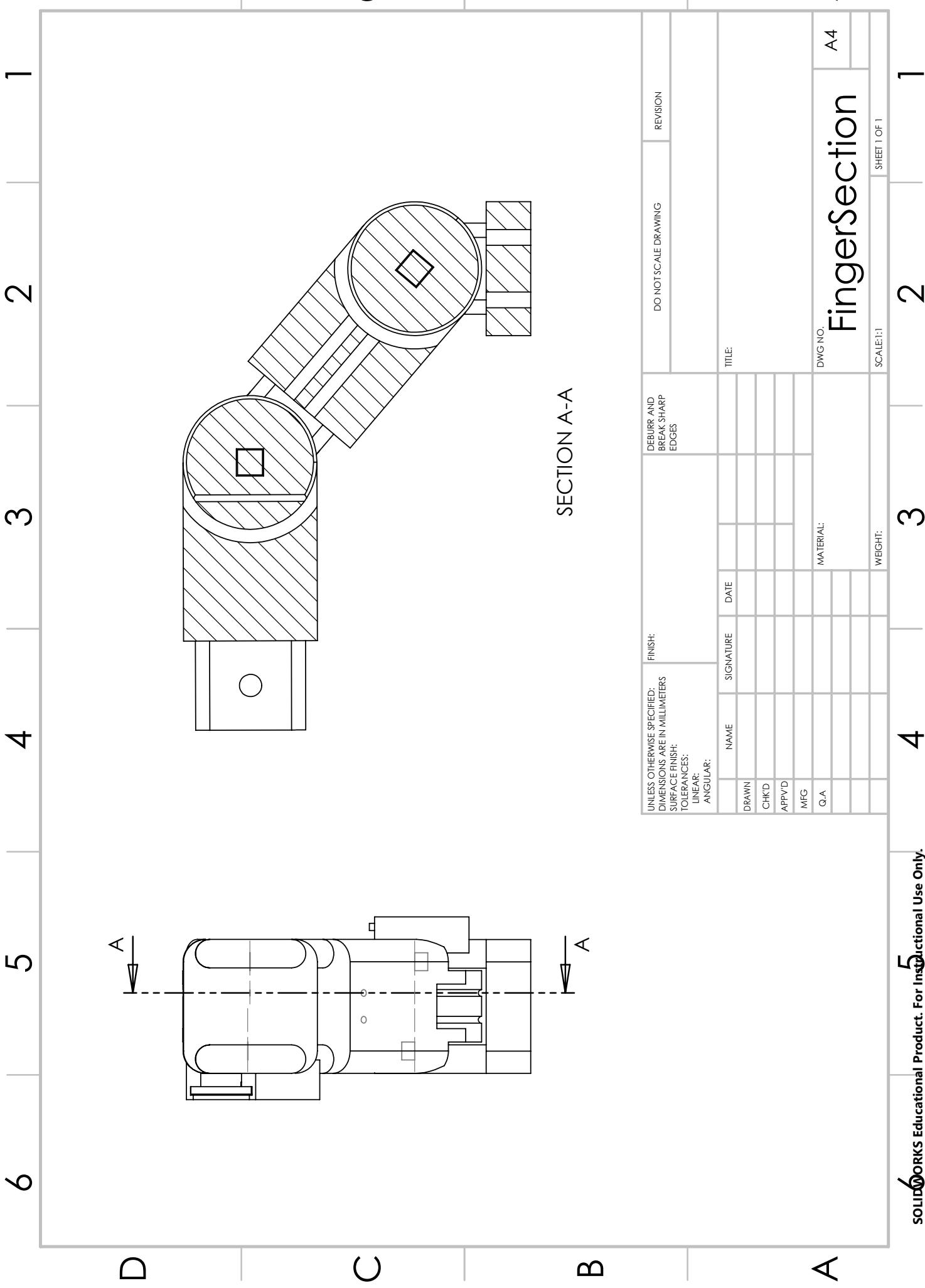
- [1] SINTEF, “Fremtidens teknologi for håndtering av pelagisk fangst om bord.” <https://www.sintef.no/prosjekter/fremtidens-teknologi-for-handtering-av-pelagisk-fa/>, Desember 2018.
- [2] SINTEF, “Ny teknologi for bedre fangsthåndtering (danteq).” <https://www.sintef.no/prosjekter/ny-teknologi-for-bredre-fangsthandtering-danteq/>, Desember 2018.
- [3] iProcess, “About us.” <http://iprocessproject.com/about/>, November 2018.
- [4] iProcess, “Robot grasping.” <http://iprocessproject.com/robot-grasping/>, November 2018.
- [5] A. Vøllestad, “Store norske leksikon - sild.” <https://snl.no/sild>, November 2018. Hentet 30. November, 2018.
- [6] R. Winsjansen, “Low-level control of actuator for robotic finger,” 2018.
- [7] R. Greenhill and H. Elias, “Shadow hand bulb large alpha.” https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Shadow_Hand_Bulb_large_Alpha.png, Oktober 2018.
- [8] S. R. Company, “Shadow dexterous hand, technical specification.” https://www.shadowrobot.com/wp-content/uploads/shadow_dexterous_hand_technical_specification_E_20150827.pdf, Oktober 2018.
- [9] S. R. Company, “Shadow modular grasper.” <https://modular-grasper.readthedocs.io/en/latest/>, Oktober 2018.
- [10] S. N. Laboratories, “The sandia hand factsheet.” https://www.sandia.gov/research/robotics/advanced_manipulation/Sandia_Hand.html, November 2018.

- [11] R. H. Robotics, “Reflex robotic gripper.” <https://www.labs.ighthandrobotics.com/reflexhand/>, November 2018.
- [12] Z. Xu and E. Todorov, “Design of a highly biomimetic anthropomorphic robotic hand towards artificial limb regeneration,” in *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 3485–3492, May 2016.
- [13] E. Brown, N. Rodenberg, J. Amend, A. Mozeika, E. Steltz, M. R. Zakin, H. Lipson, and H. M. Jaeger, “Universal robotic gripper based on the jamming of granular material,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 107, no. 44, pp. 18809–18814, 2010.
- [14] J. Butterfass, M. Grebenstein, H. Liu, and G. Hirzinger, “Dlr-hand ii: next generation of a dexterous robot hand,” in *Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.01CH37164)*, vol. 1, pp. 109–114 vol.1, May 2001.
- [15] E. Misimi, E. Ruud Øye, A. Eilertsen, J. Reidar Mathiassen, O. Berg, T. B. Gjerstad, J. Buljo, and Skotheim, “Gribbot – robotic 3d vision-guided harvesting of chicken fillets,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 121, pp. 84–100, 02 2016.
- [16] B. Tondu, “Modelling of the mckibben artificial muscle: A review,” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 23, no. 3, pp. 225–253, 2012.
- [17] Z. Xu, S. Kolev, and E. Todorov, “Design, optimization, calibration, and a case study of a 3d-printed, low-cost fingertip sensor for robotic manipulation,” in *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 2749–2756, May 2014.
- [18] B. M. Jeremy Fishel, Gary Lin and G. Loeb, *BioTac® Product Manual*. syntouch, 20 ed., March 2015.
- [19] R. Li and E. H. Adelson, “Sensing and recognizing surface textures using a gelsight sensor,” in *2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 1241–1247, June 2013.
- [20] R. Li, R. Platt, W. Yuan, A. ten Pas, N. Roscup, M. A. Srinivasan, and E. Adelson, “Localization and manipulation of small parts using gelsight tactile sensing,” in *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3988–3993, Sept 2014.
- [21] R. B. Hellman and V. J. Santos, “Design of a back-driveable actuation system for modular control of tendon-driven robot hands,” in *2012 4th IEEE RAS EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob)*, pp. 1293–1298, June 2012.

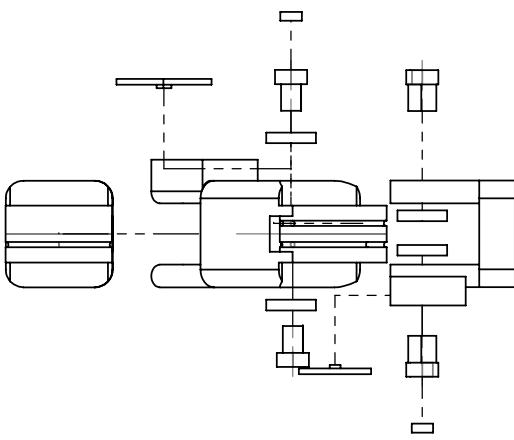
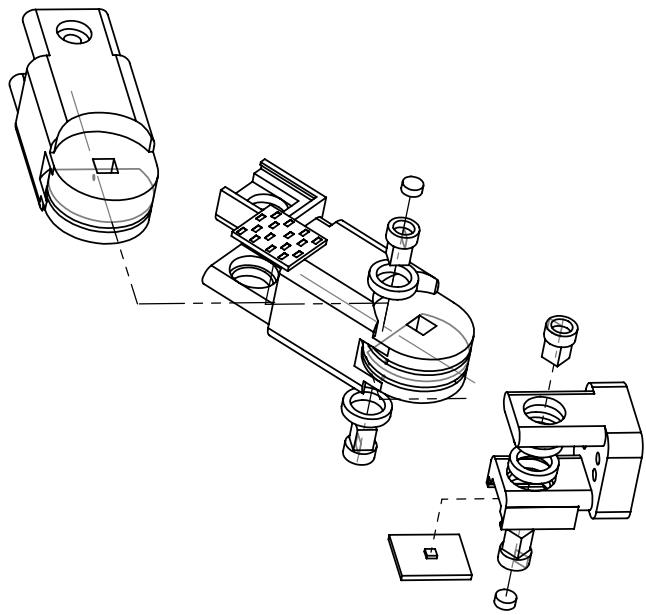
Tillegg A

Arbeidstegninger for konstruksjon av finger





UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:	FINISH:	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS				
SURFACE FINISH:				
TOLERANCES:				
LINEAR:				
ANGULAR:				
NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN				
CHK'D				
APP'D				
MFG				
Q.A				
MATERIAL:				
WEIGHT:				



A **B** **C** **D**

1 2 3 4 5 6

A **B** **C** **D**

1 2 3 4

Konstruksjon

DWG NO. A4

SCALE:1:2 SHEET 1 OF 1

REV. A4

1
2
3
4
5
6

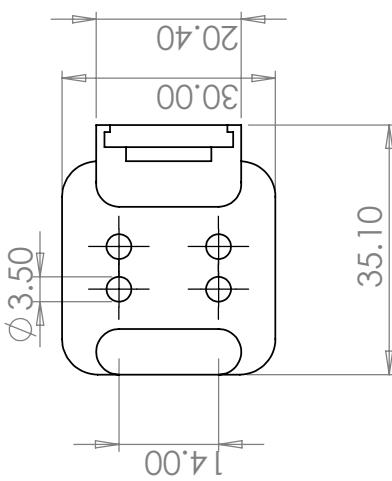
1

Base

A4

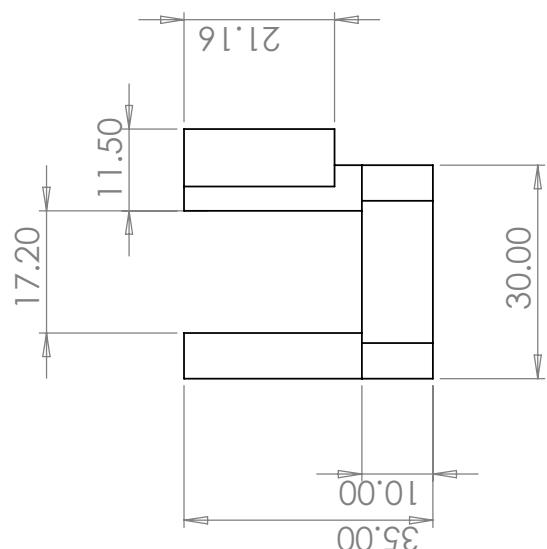
SHEET 1 OF 1

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:	FINISH: DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
			TITLE:
DRAWN	NAME	SIGNATURE	DATE
CHK'D			
APP'D			
MFG			
Q.A			
	MATERIAL:	WEIGHT:	DWG NO.
			SCALE:1:1

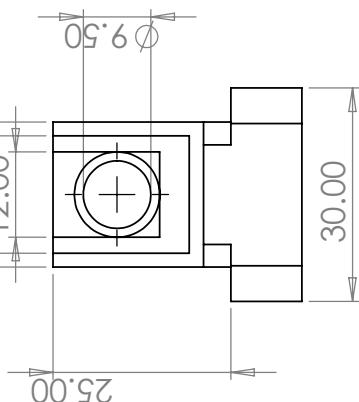


A

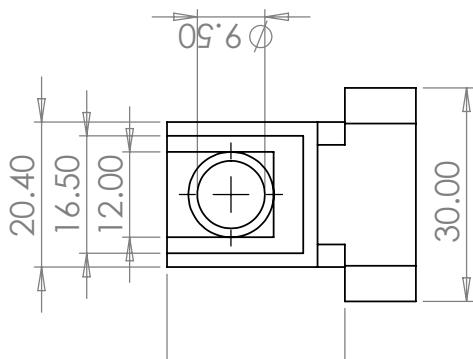
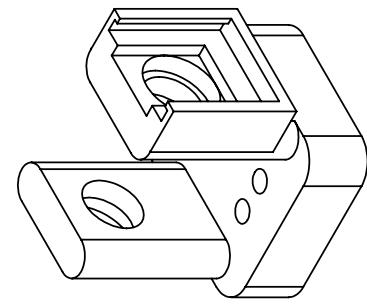
1
2
3
4
5
6



D



D
C
B
A



D
C
B
A

A

Grunnfalang

SHEET 1 OF 1

1

REVISION

DO NOT SCALE DRAWING

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

TITLE:

DWG NO.

SCALE:1:1

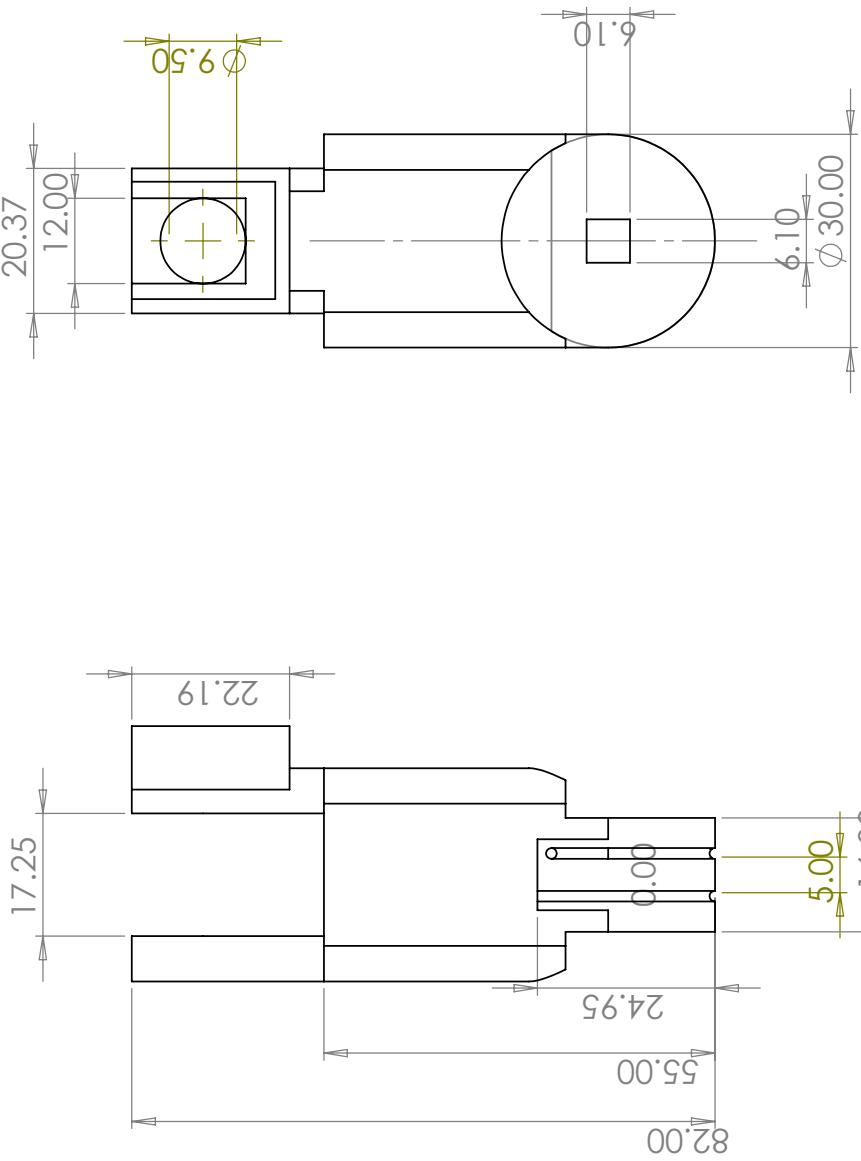
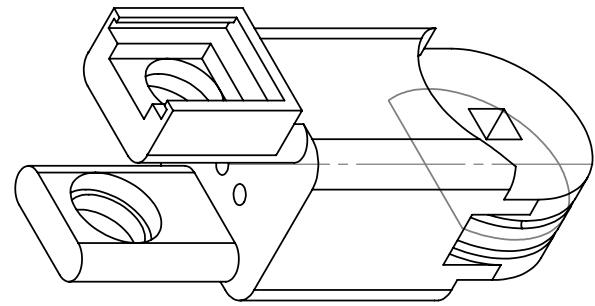
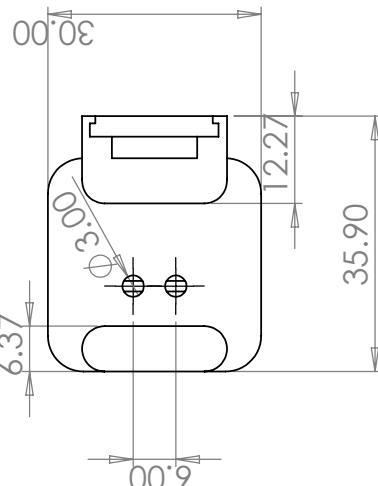
3

4

5

6

SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

1
2
3
4
5
6

D

C

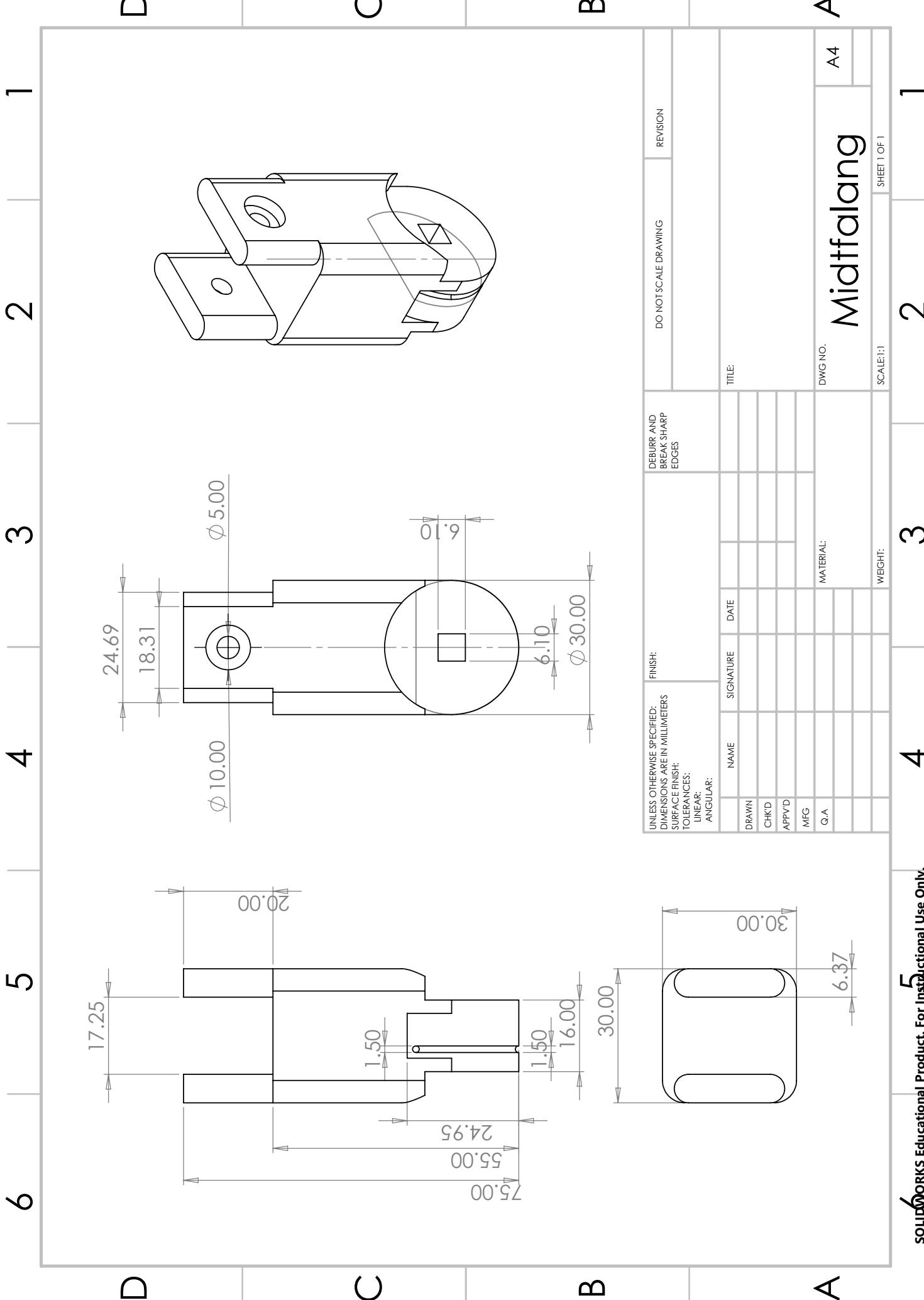
B

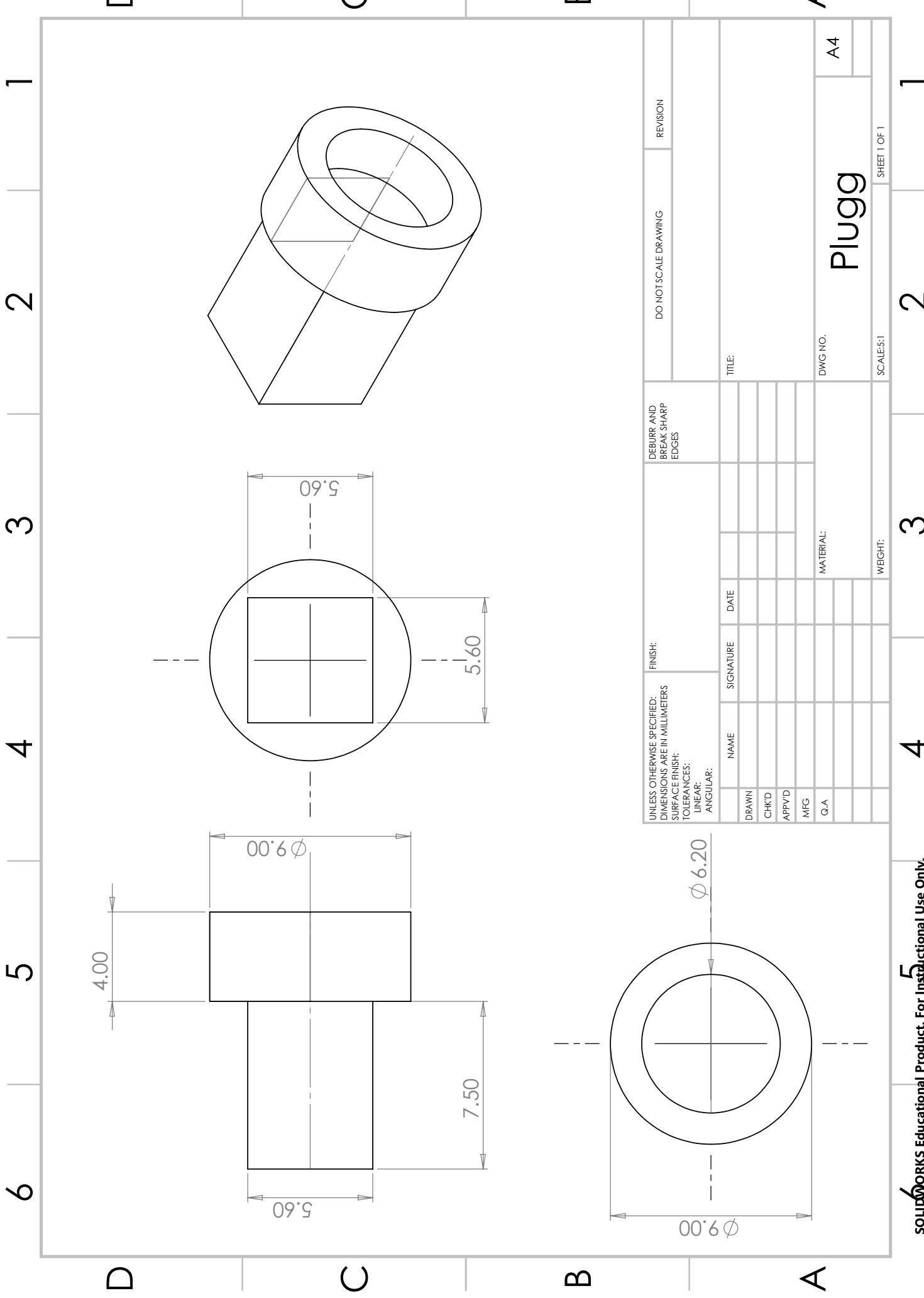
D

C

B

A





Tillegg B

Matlabkode for kalkulering bevegelsesområde

```
1 L1 = 5.5; % første ledd
2 L2 = 8; % andre ledd + passivt ledd
3
4 theta1 = 0.35:0.05:pi-0.35; % mulige MCP-
      vinkler
5 theta2 = -(pi/2)+0.35:0.05:(pi/2)-0.35; % mulige PIP-
      vinkler
6
7 [THETA1,THETA2] = meshgrid(theta1,theta2);
8
9 x = L1 * cos(THETA1) + L2 * cos(THETA1 + THETA2); %
      vinkel -> x koordinat
10 y = L1 * sin(THETA1) + L2 * sin(THETA1 + THETA2); %
      vinkel -> y koordinat
11
12 plot(x(:),y(:), 'b.');
13 xlabel('x [cm]')
14 ylabel('y [cm]')
15 grid
16 title('Mulig bevegelsesomrde for ytterste ledd')
17 hold on
18 plot(0,0, 'r.') % origo
19 hold on
```