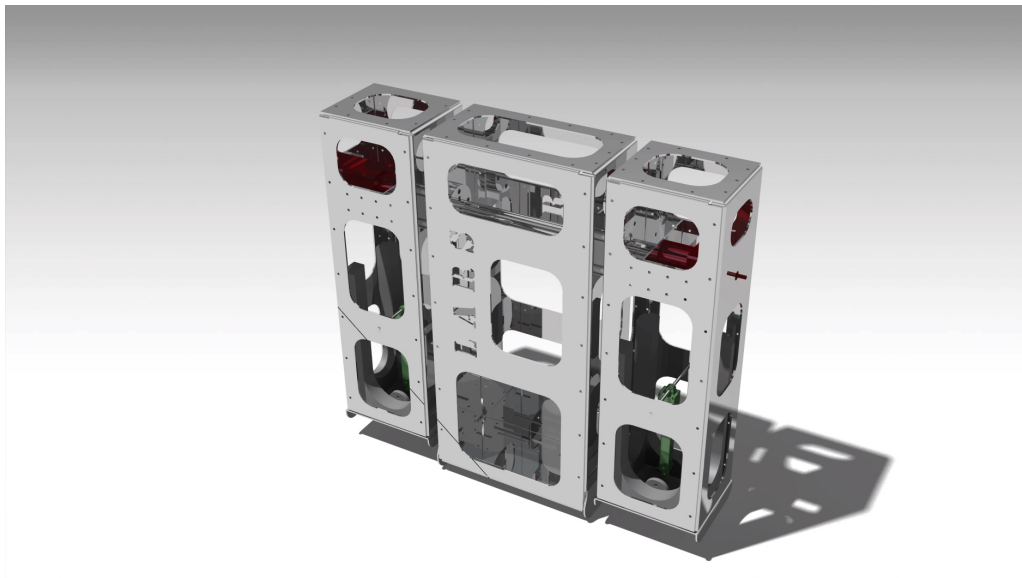




CHALMERS

Kandidatarbete LARS

Gestaltning och konstruktion av en robot inspirerad av TARS från filmen
Interstellar



Lejla Crnic
Sebastian Hafström
Simon Johansson
Daniel Olsson
Erik Sätterskog
Hanna Winblad

Grupp: EENX15-18-89

*Institutionen för Elektroteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige, VT 2018
Examinator: Nikolce Murgovski
Handledare: Adrian Ilka*

Förord

Denna rapport behandlar ett kandidatarbete på avdelningen för System- och Reglerteknik (SysCon) på Institutionen för Elektroteknik vid Chalmers tekniska högskola. Projektet utförs av sex studenter med ingenjörsbakgrunder inom Automation och Mekatronik, Datateknik samt Maskinteknik under våren 2018.

Projektgruppen vill tacka handledaren Adrian Ilka för vägledningen genom hela arbetet och hjälp med utvecklingen av reglersystemet, Jan Bragee, Reine Nohlborg och Göran Stiegler för konsultation och hjälp med konstruktionen i Prototyplaboratoriet, Rebecka Andersson för inköp av komponenter samt Chalmers Robotförening för förvaringsutrymme och rådgivning vid utvecklingen av det elektriska systemet. Slutligen riktas även ett tack till examinatorn Nikolce Murgovski som uppmuntrat gruppen till att få projektet att utvecklas.

Abstract

This report describes a work done at *Chalmers University of Technology* by six students during the spring of 2018. The goal of the project was to create a robot inspired by the robot TARS from the movie *Interstellar* (2014). TARS consists of four cuboids as legs that rotate around an adjustable axis. Furthermore, the robot in the movie has arms that can fold out and has a possibility to communicate both through a display and through speech. TARS is able to move in various ways but was controlled by a human during the shooting of the movie (Acuna, 2015).

The project's milestones in the execution consisted of a concept selection process followed by the creation of CAD modeling, purchase of components, construction of the robot and a verification phase. To make the robot functional and stable the creation of an electrical circuit, a mathematical model, several simulations and a control system took place and various test were executed on the robot. These processes resulted in a functional robot and simulations that could be compared. The robot is at the time of writing able to walk a few steps while being controlled wirelessly through a mobile application. It is built using aluminum plates, reaches 450 mm tall, weighs 6,6 kg and consists of three legs. Due to the constraints of a budget of 5000 SEK and time the project did not fulfill all goals, but it has provided a solid base for further development of the robot, given the robust hardware and large development potentials in the software.

Sammandrag

Rapporten beskriver ett arbete som utförts vid *Chalmers tekniska högskola* av sex studenter under vårterminen 2018. Målet med projektet var att skapa en robot inspirerad av roboten TARS i filmen *Interstellar* (2014). TARS består av fyra rätblock till ben som roterar runt en justerbar axel. Dessutom har roboten i filmen armar som kan fällas ut samt en möjlighet att kommunicera både med hjälp av en skärmdisplay och genom tal. TARS kan i filmen röra sig på flertalet olika sätt, men förflyttades vid inspelningarna med hjälp av en människas fysiska påverkan (Acuna, 2015).

Projektets milstolpar i genomförandet bestod av en konceptvalsprocess följt av skapande av CAD-modellering, inköp av komponenter, konstruering av en fysisk robot och en verifieringsfas. För att göra roboten funktionell och stabil skapades en elektrisk krets, en matematematisk modell, flertalet simuleringar, ett teoretiskt reglersystem samt genomfördes tester av roboten. Alla dessa processer resulterade i en fungerande robot och simuleringar som kunde jämföras. Roboten kan i skrivande stund gå ett par steg med hjälp av trådlös styrning via en mobilapplikation. Den är byggd av aluminiumplåt, är ca 450 mm hög, väger totalt ca 6,6 kg och består av tre ben. På grund av begränsningar inom budget på 5000 SEK och tid lyckades inte projektet uppnå alla mål, men det har skapat en bra grund för vidareutveckling av roboten, då den har stabil hårdvara och stora utvecklingsmöjligheter inom mjukvaran.

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syftesformulering	2
1.3	Problemformulering	2
1.3.1	Design	3
1.3.2	Statik	3
1.3.3	Kommunikation	3
1.3.4	Dynamik	3
1.4	Avgränsningar	3
1.5	Metodbeskrivning	4
1.6	Verifiering	4
1.6.1	Fysiska tester	4
1.6.2	Enkätundersökning	4
1.6.3	Teoretisk utvärdering	5
2	Teori	6
2.1	Stabilitet	6
2.1.1	Statisk stabilitet	6
2.1.2	Dynamisk stabilitet	7
2.2	Pendelteori	9
2.2.1	Bipedalism	9
2.2.2	Dubbelpendel	10
2.2.3	Tröghetsmoment	12
3	Konceptval	13
3.1	Beskrivning av process	13
3.2	Slutgiltigt koncept	13
4	Konstruktion av robot	14
4.1	CAD-modellering	14
4.2	Val av komponenter	16
4.2.1	Stegmotorer	16
4.2.2	Linjära aktuatorer	19
4.2.3	Mikrokontroller	21
4.2.4	Extern kommunikation	22
4.2.5	Sensorer	23
4.2.6	Drivkort för stegmotor	23
4.2.7	Batteri	24
4.2.8	Spänningsregulator	25
4.3	Kopplingsschema	26
4.3.1	Stegmotorer	27
4.3.2	Linjära aktuatorer	27
4.3.3	Mikrokontroller	27
4.3.4	Extern kommunikation	27
4.3.5	Sensorer	28
4.3.6	Drivkort för stegmotor	28
4.3.7	Spänningsregulator	29
4.4	Byggnadsprocess	29
4.4.1	Ram av aluminiumplåt	29
4.4.2	Axelkoppling	29
4.4.3	Kullagerhus	30
4.4.4	Axelfästning med Kilförband	30
4.5	Hållfasthetsberäkningar på kritiska komponenter	30
4.5.1	Axelkoppling	30
4.5.2	Stegmotorer	31

4.5.3	Kilförband	32
4.6	Mjukvaruutveckling	32
5	Reglering	34
5.1	Tyngdpunkt och tröghetsmoment	34
5.2	Simulering och reglering av roboten	35
6	Resultat	37
6.1	LARS egenskaper och fysiska tester	38
6.2	Enkätundersökning	40
6.3	Teoretisk utvärdering	40
6.3.1	Skaderisk	40
6.3.2	Montering, demontering och underhåll	40
6.3.3	Batteriförsöjning	41
6.4	Dimensioneringskontroll av ställdon	41
6.5	Reglering	41
6.5.1	Fysisk test av LARS som dubbelpendel	41
6.5.2	Simulering utan reglering	42
6.5.3	Simulering med reglering	43
6.6	Budget	46
7	Diskussion	47
7.1	Fysiska tester	47
7.2	Estetik	48
7.3	Mjukvaruutveckling	48
7.4	Reglering	48
7.5	Budget	49
7.6	Samhälleliga och etiska aspekter	50
8	Slutsatser	51
	Litteraturförteckning	52
A	Konceptgenerering	i
A.1	Funktionsträd	i
A.2	Morfologiskamatriser	i
A.3	Koncept	iii
A.4	Elimineringsmatris	xi
A.5	Pughmatris	xii
B	Ritningar av komponenter	xiii
B.1	Helhet	xiii
B.2	Axelkoppling	xiv
B.3	Lagerhus	xv
B.4	Kilspårförband	xvi
B.5	Axel	xvii
B.6	Yttre sida av ytterbenet	xviii
B.7	Övre plåtdel av ytterbenet	xix
B.8	Insida av ytterben	xx
B.9	Fram- och baksida av ytterben	xxi
B.10	Baksida av mittenben	xxii
B.11	Bottenplåt av mittenben	xxiii
B.12	Framsida av mittenben	xxiv
B.13	Sida av mittenben	xxv
B.14	Toppdel av mittenben	xxvi
B.15	Fotfäste	xxvii

C	Produktblad	xxviii
C.1	Stegmotorer	xxviii
C.2	Linjära aktuatorer	xxx
C.3	Mikrokontroller	xxxiv
C.4	Sensorer	xxxvi
C.5	Drivkort	xlii
C.6	Batteri	xlvi
C.7	Spänningsregulator	xlvi
D	Programkod	xlix
E	MATLAB-kod	li
E.1	LQR	li
E.2	Simulering av mekanisk modell	liii
E.3	Tyngpunktsuträkning	liv
E.4	Enkätprogram	lvi
E.5	Vinkelprogram	lvii
F	Simulink	lix
F.1	Dubbelpendels rörelse	lix
F.2	LQR	lxi
G	Enkät	lxii

1 Inledning

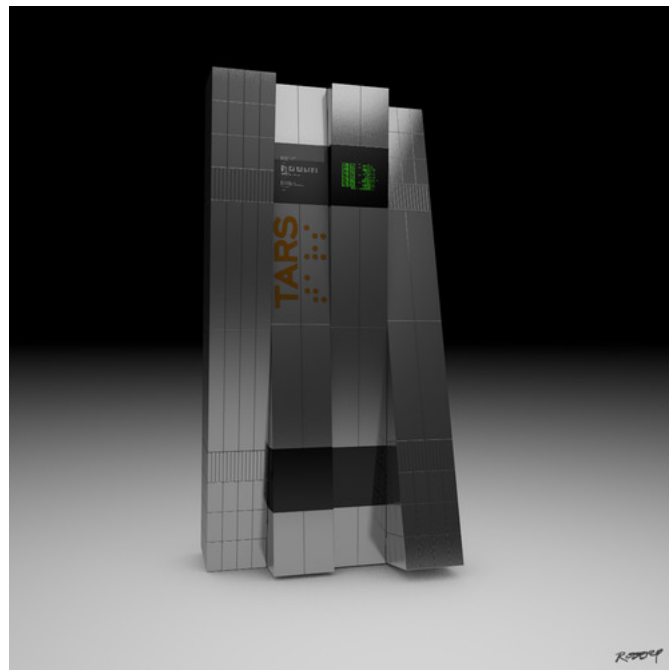
Det här kapitlet beskriver motivet till projektet, genom en förklaring av bakgrunden, syftes- och problemformulering, avgränsningar och metodbeskrivning.

1.1 Bakgrund

Implementering av robotar i dagens samhälle blir allt vanligare i en stor mängd av områden, i allt från hushållsaperatur till rymdteknik. Robotteknik underlättar arbetet i många olika miljöer, till exempel används robotar inom fordonsindustrin för deras styrka vid tunga lyft och för deras höga effektivitet. Det finns dock fortfarande många arbeten som kräver fysisk ansträngning eller vistelse i farliga miljöer. Många av dessa arbeten skulle kunna utföras av robotar vilket skulle leda till att inga människor behöver utsätta sig för fara. En färdigutvecklad robot som TARS skulle kunna fylla en sådan plats i samhället.

Interstellar är en science fiction-film som hade världspremiär 2014 och visar ett framtida samhälle där jorden inte längre är beboelig för människor (Kermode, 2014). Mänskligheten tvingas därför resa ut i rymden för att hitta en ny lämplig planet för bosättning. Under detta uppdrag får expeditionen hjälp av en robot som kallas TARS, se Figur 1. Robotens kropp består av fyra rektangulära block vilket tillåter den att röra sig på flera olika sätt. TARS hjälper till med många uppgifter, till exempel med att bära tunga föremål samt att rädda personer i nöd. Roboten har även artificiell intelligens och kommunicerar med mänsklig röst.

TARS har en design som utstrålar enkelhet och effektivitet. Tack vare sina olika gångstilar är roboten flexibel vilket ger den många användningsområden och egenskaper, samtidigt som designen är väldigt robust. Att bygga en robot som kan röra sig på olika koordinerade sätt kan bana väg för nya möjligheter inom robottekniken och lösa tidigare svåra problem. Trots den enkla designen finns det mycket teori bakom dynamiken som möjliggör rörelsen.



Figur 1: TARS från *Interstellar* konstruerad av Kotla (2015)

En intressant fråga är om det är möjligt att få en robot att gå på flera olika sätt trots robotens enkla form. En annan fråga kan vara i vilka områden som roboten är användbar och om det finns aspekter av roboten som har potential till vidareutveckling. En av de stora fördelarna med en

robot designad som TARS kan tänkas vara ur tillverkningsynpunkt, TARS har en robust och enkel design utan allt för komplicerade komponenter, samtidigt som den bibehåller sin potentiella funktionalitet. Det komplicerade ligger i dynamiken och hur roboten kan balansera sig på ett bra sätt. Om detta problem kan lösas är konstruktionen av roboten relativt enkel jämfört med till exempel humanoida robotar¹.

Sedan *Interstellar* hade premiär har flera robotfantaster försökt skapa TARS-liknande robotar. Då skaparna av filmen låter roboten styras av en människa så finns det ingen given lösning på den komplicerade dynamiken för TARS gång. På grund av komplexiteten har bara ett fåtal lyckats skapa en vettig och fungerande prototyp. Ett av de mest lyckade projekten är *TARS from Interstellar: A Walking Robot Invention* (Higaki, 2017) där roboten har ett TARS-liknande utseende och använder en enkel metod för att röra sig framåt. Roboten lyfter och sänker på de inre och yttre benparen för att skapa en höjdskillnad som sedan gör det möjligt att rotera benen och på så vis gå. Roboten rör sig lite ostabilt, vilket gör att den kan ha svårt att röra sig längs en rak linje. Trots vissa brister är detta en av de bästa efterlikningarna av TARS. En annan intressant variant är *Cornell Ranger* (Ruina, 2011). Detta är en robot som är gjord för att gå långt snarare än att efterlikna TARS. Då dess sätt att gå kan ses som ett av sätten som TARS går på är den ändå relevant att ta inspiration från, ett gångsätt som den lyckats gå 65,2 km med. Utöver dessa projekt finns det inget större antal projekt som liknar TARS konstruktion, vilket medför en avsaknad av beprövade metoder att vidareutveckla.

Att efterlikna en robot från en känd film och sedan visa upp den för allmänheten kan resultera i att fler människor får upp ögonen för robotteknik. Om fler människor introduceras till området och prövar egna idéer och koncept kommer den allmänna kunskapen inom området att öka. Att visa upp en känd robot kan även locka fler människor till att börja studera vilket skulle ge positiva effekter på samhället i stort.

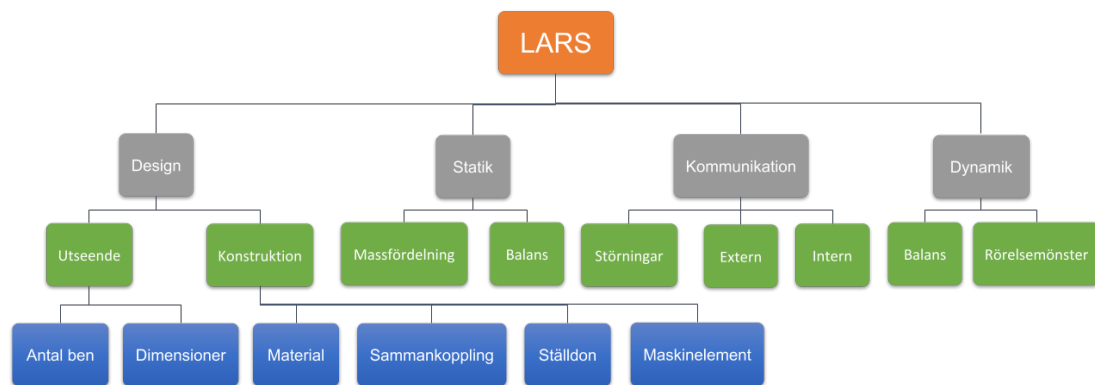
1.2 Syftesformulering

Projektet syftar till att konstruera en robot, LARS, som i största möjliga mån efterliknar TARS från science fiction-filmen *Interstellar*, både till utseende och funktion. Utvärdering av projektets resultat utgår enligt den funktionsbaserade kravspecifikationens huvudfunktioner, se Avsnitt 1.6 Figur 3, från robotens förmåga att kunna förflytta sig framåt, styras trådlöst samt allmän konsensus om dess fysiska efterliknelse.

1.3 Problemformulering

Ett träd-diagram ger överblick över hur problemet delas upp enligt Figur 2. Huvudmålet, markerat i orange, att konstruera en robot som efterliknar TARS delades in i mindre problemområden. Problemområdena grupperades i fyra kategorier, markerat med grått, som identifierades till: *Design*, *Statik*, *Kommunikation* och *Dynamik*. Dessa diskuteras närmare nedan.

¹En humanoid robot är designad med en kroppsform som liknar en människa (Nyström, 2017)



Figur 2: Träddiagram - Nedbrytning av problemet till delproblem

1.3.1 Design

Designproblemet innefattar alla frågor kopplade till hur LARS ska gestaltas och konstrueras för att klara hållfasthetskraven och samtidigt röra sig enligt syftesformuleringen. Det innefattar frågeställningar som materialval, dimensioner, vilka komponenter som skulle användas och hur de kopplas samman. Följande problem behöver hanteras: val av antal ben, vilka dimensioner benen ska ha, materialval, sammankoppling av komponenter, val av ställdon och vilka maskinelement som ska användas.

1.3.2 Statik

Det statiska problemet är kopplat till hur roboten skulle kunna behålla balansen när den står stilla, samt hur robotens massfördelning kommer att inverka på detta. Projektet behöver hantera hur massan ska fördelas för att skapa balans i statiskt tillstånd, samt hur balansen ska bibehållas vid störningar i statiskt tillstånd.

1.3.3 Kommunikation

Kommunikationsproblemet innebär intern såväl som extern kommunikation. Den interna kommunikationen behandlar hur ställdon kommunicerar med mikroprocessorn medan den externa kommunikationen behandlar fjärrstyrning av roboten från en användare. Problemen som hanteras är hur den externa kommunikationen mellan robot och användare ska ske, hur den interna kommunikationen mellan de olika delarna i roboten ska ske och hur störningar inom kommunikationen kan motverkas.

1.3.4 Dynamik

Det sista delproblemet, dynamik, behandlar hur roboten ska röra sig och hur systemet behöver modelleras för att motsvara reella förhållanden. Problemen i detta område innefattar hur roboten ska behålla balansen under rörelse och på vilket sätt roboten ska förflytta sig.

1.4 Avgränsningar

Projektet avgränsades till att bygga en robot som kan balansera och förflytta sig kontinuerligt på plan horisontell mark i inomhusmiljö. Roboten konstrueras inte för att hantera yttre störningar i form av pålagda laster när den rör sig. Projektet har en budget på 5000 SEK, exklusive materialkostnader på 2000 SEK hos Prototyplaboratoriet.

1.5 Metodbeskrivning

Arbetet började med att genomföra ett konceptval. Det koncept som vann utvecklades därefter på detaljnivå med bland annat CAD-modellering och komponentval. Parallellt utfördes dessutom hållfasthetsberäkningar på olika kritiska komponenter. Beräkningar samt simuleringar på konceptet gjordes för att öka förståelsen för hur konceptet fungerar för implementering av reglersystem och mjukvara.

När komponenter var inköpta byggdes den fysiska roboten. Bygget delades upp i att konstruera det mekaniska systemet, det elektriska systemet och sedan att integrera dessa två delsystem med hjälp av mjukvaruutveckling. Slutligen utfördes tester på den färdiga roboten för att verifiera hurvida projektet har uppfyllt sitt syfte.

1.6 Verifiering

Ett antal undersökningar genomfördes för att verifiera att LARS uppfyller de krav och önskemål som ställs i den funktionsbaserade kravspecifikationen, se Figur 3. Krav och önskemål presenteras punktvis (1.1)-(4.4) och verifieringen av dem beskrivs mer ingående nedan i samband med de tre olika testtyperna: *Fysiska tester*, *Enkätundersökning* och *Teoretisk utvärdering*

Funktionsbaserad kravspecifikation		LARS - Gestaltning och konstruktion av en robot inspirerad av TARS från filmen Interstellar						
Utfärdad av: EENX15-18-89	Skapad: 2018-01-30	Funktioner	Storhet	Enhet	Målvärde	Referens	Verifieringsmetod	Krav och önskemål
1.	Huvudfunktion							
	1.1	Förflytta sig framåt	Sträcka	m	5	Nikolce Murgovski	Test	K
	1.2	Efterlikna TARS	Andel	%	50	Nikolce Murgovski	Enkät	Ö
	1.3	Styras trådlöst	-	Ja/Nej	Ja	Nikolce Murgovski	Test	K
2.	Tilläggfunktioner							
	2.1	Tilltala användaren estetiskt	Andel	%	75	EENX15-18-89	Enkät	Ö
	2.2	Medge montering	-	Ja/Nej	Ja	EENX15-18-89	Utvärdering	Ö
	2.3	Medge demontering	-	Ja/Nej	Ja	EENX15-18-89	Utvärdering	Ö
	2.4	Tillåta underhåll	Andel	%	75	EENX15-18-89	Utvärdering	Ö
	2.5	Inneha säkerhetsfunktion	-	Ja/Nej	Ja	EENX15-18-89	Test	Ö
3.	Stödfunktioner							
	3.1	Återuppfå balans	-	Ja/Nej	Ja	EENX15-18-89	Test	K
	3.2	Fixera benpar	Antal	St	1	Nikolce Murgovski	Test	Ö
	3.3	Försörjas med drivmedel	Effekt	kW	1	EENX15-18-89	Beräkning	K
4.	Oönskade funktioner							
	4.1	Orsaka egenväldad skada	-	Ja/Nej	Nej	EENX15-18-89	Utvärdering	Ö
	4.2	Orsaka omgivning skada	-	Ja/Nej	Nej	EENX15-18-89	Utvärdering	Ö
	4.3	Skapa oljud	Ljudvolym	dB	50	EENX15-18-89	Test	Ö
	4.4	Förbruka drivmedel	Effekt	W	500	EENX15-18-89	Beräkning	Ö

Figur 3: Funktionsbaserad kravspecifikation

1.6.1 Fysiska tester

Ett bantest genomfördes genom att markera upp en raksträcka på fem meter och låta roboten gå på den. Tiden och sträckan från start tills den ramlar eller gått hela banan mättes (1.1). Robotens förmåga att hålla ytterbenen parallella studerades samtidigt visuellt (3.2) samt en decibelmätning gjordes för att undersöka hur mycket ljud som roboten producerar (4.3). Banan användes även för att testa om användaren kunde styra roboten trådlöst (1.3). Tester av inbyggt balanssystem planerades utföras genom att simulera yttre störningar när roboten står stilla (3.1). Säkerhetsfunktionen planerades testas genom att simulera ett scenario då roboten har fallit eller kolliderat med hinder (2.5). De två senare testen beskrivs närmre i diskussionen i Kapitel 7.

1.6.2 Enkätundersökning

För att bedöma subjektiva egenskaper hos roboten delades en enkät ut till 50 personer. Besvararen fick betygsätta både hur mycket LARS liknar TARS (1.2) och hur estetiskt tilltalande LARS är på en skala 1-10 (2.1).

1.6.3 Teoretisk utvärdering

Utöver de andra undersökningarna gjordes en utvärdering från byggnadsfasen för att studera hur väl roboten medgav montering, demontering och underhåll (2.2-2.4). En utvärdering genomfördes även för att bedöma risken för att roboten kunde orsaka egenvållad skada eller skada på omgivningen (4.1-4.2). För de valda elektriska komponenterna beräknades ett teoretiskt effektbehov (4.4) samt batteriets kapacitet (3.3).

2 Teori

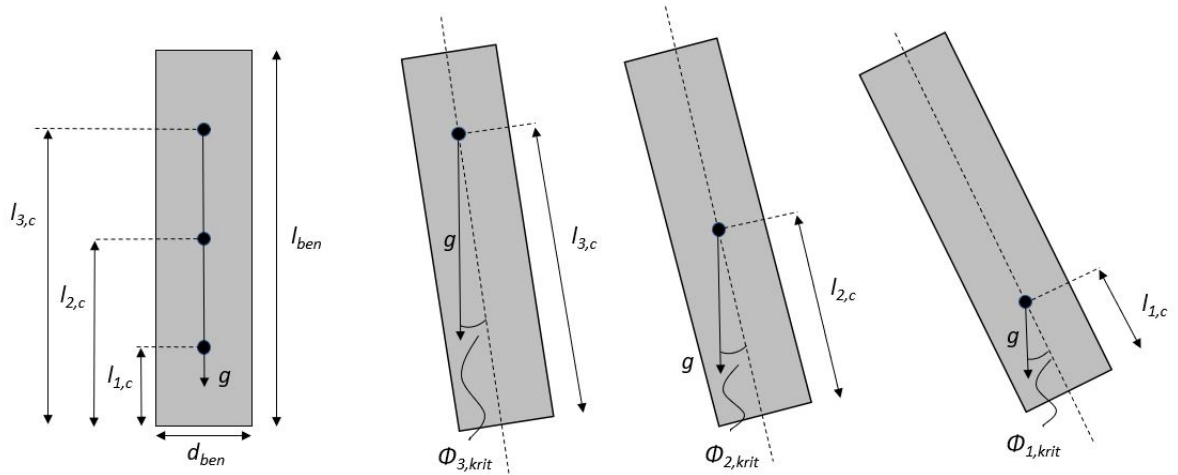
Kapitlet förklarar teori som är grundläggande genom hela projektet. Områden som tas upp är stabilitet och pendelteori som under arbetet används för att sätta upp matematiska modeller för LARS.

2.1 Stabilitet

Med stabilitet menas i denna rapport att roboten håller sig i upprätt läge. Händelsen när roboten rör på sig, dynamiskt tillstånd, samt händelsen när den står stilla, statiskt tillstånd, diskuteras var för sig då komplexiteten skiljer sig åt åt händelserna emellan.

2.1.1 Statisk stabilitet

För att roboten i statiskt tillstånd ska kunna återgå till upprätt läge vid en störning, exempelvis en knuff, krävs att robotens tyngdpunkt ligger på rätt sida av fotens kontaktpunkt med marken. Tyngdpunktens placering, l_c , djupet på benen, d_{ben} , och benens längd, l_{ben} , är variabler som påverkar vilken lutning roboten kan ställas i förhållande gravitationsvektorn, g , och fortfarande klara av att återgå till stabilt läge. I Figur 4 illustreras tre olika placeringar av tyngdpunkten, $l_{n,c}$, och den kritiska vinkeln, $\alpha_{n,krit}$, som den aktuella placeringen av tyngdpunkten ger upphov till. $n = 1, 2, 3$ är indexet för placeringen.

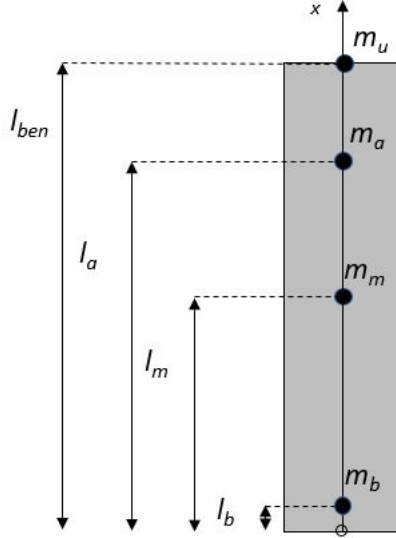


Figur 4: LARS kritiska vinkel innan instabilitet uppstår vid tre placeringar av tyngdpunkten

För att beräkna vad den kritiska vinkeln är för att stabilitet ska behållas ställs ekvationen nedan upp med hjälp av trigonometri (Ekh, Hansbo & Brouzoulis, 2015).

$$\begin{aligned} \tan(\phi_{n,krit}) &= \frac{d_{ben}/2}{l_{n,c}} \\ \Rightarrow \phi_{n,krit} &= \tan^{-1}\left(\frac{d_{ben}}{2l_{n,c}}\right) \end{aligned} \quad (1)$$

Tyngdpunkten för benen beräknas i sin tur med hjälp av att känna till de olika massorna på komponenterna i benen samt vilken höjd de sitter på vilket visas i Figur 5. Variablerna för höjderna får indexen uppe, u , axelhöjd, a , mitten, m , samt botten, b .



Figur 5: Placeringar av massor i höjddled

Ekvationen nedan används för att beräkna benets tyngdpunkt i x-led relativt origo, l_c , vilket är placerat i underkant av innerbenet (Ekh m. fl., 2015).

$$l_c = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^n m_k l_k \quad (2)$$

2.1.2 Dynamisk stabilitet

Att erhålla dynamisk stabilitet för en robot med två ben är något som undersökts under lång tid. Många robotar med knäleder brukar ofta förenklas i uträkningar som robotar med ben som kan sträckas ut, teleskopiska ben (Kajita, Matsumoto & Saigo, 2001).

Det svåra med bipedalisk gång² är att konceptet går ut på att roboten konstant faller men hinner ta emot sig i tid. Misslyckas den så går det inte att rädda situationen, vilket leder till att göra gången så lätt som möjligt är av stor prioritet. Hastigheten som fås av pendelns fall används för att räkna ut nästa steg.

Med hjälp av MathWorks Simulink samt biblioteken Simscape Multibody Multiphysics Library³ och Simscape Multibody Contact Forces Library⁴ skapades en förenklad modell av en TARS-liknande robot bestående av fyra solida ben med varsin solid fot som går upprätt på en plan yta som föreställer mark. Med hjälp av modellen simulerades tre olika gångsätt inspirerad från TARS (Nolan & Nolan, 2014), som fick namnen Kong-walk, Human-walk och Trotting. Den dynamiska stabiliteten testas med öppen styrning⁵.

Kong-walk illustreras av Figur 6 och fick sitt namn då modellen ser ut som gorillan King Kong när den använder detta sätt att gå. Gångsättet karaktiseras av att innerbenen agerar som ett ben och att ytterbenen rör sig synkroniserat. Roboten endast har tre frihetsgrader då den kan röra sig framåt och bakåt, uppåt och nedåt samt falla framåt eller bakåt. Det blir då en gångstil som

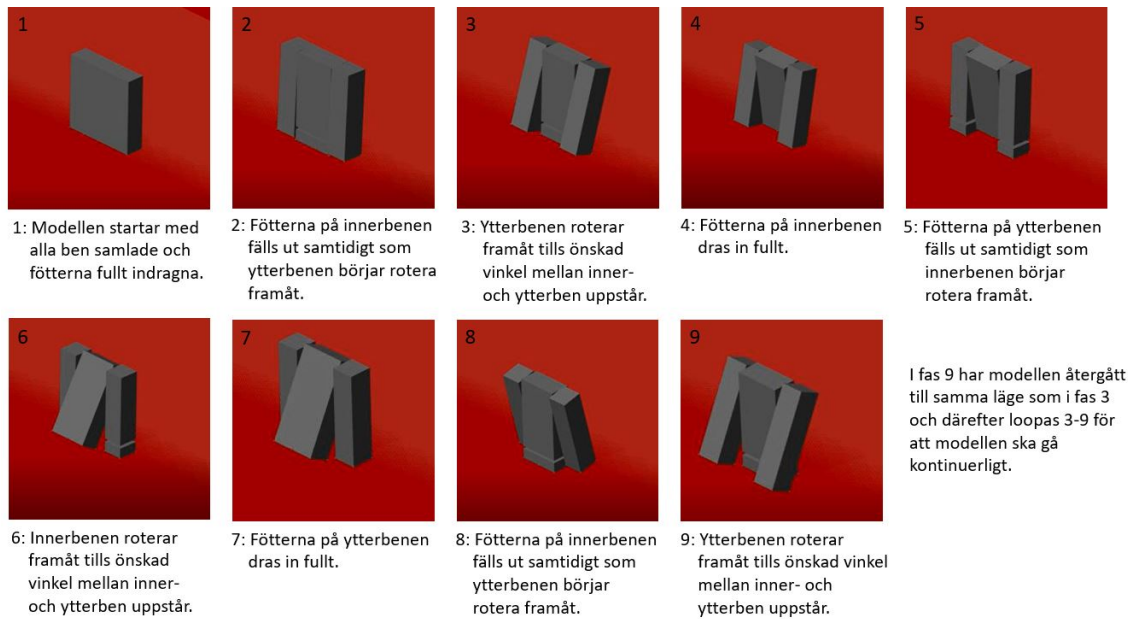
²Bipedalisk gång innebär gång med två ben som kan liknas som pendlar, förklaras närmre i Avsnitt 2.2

³Bibliotek som ger möjlighet att förste 3D-modeller med vissa fysiska effekter (Miller, 2018b)

⁴Bibliotek med funktioner som gör det möjligt att skapa kontaktkraft mellan kroppar i 2D- och 3D-miljöer (Miller, 2018a)

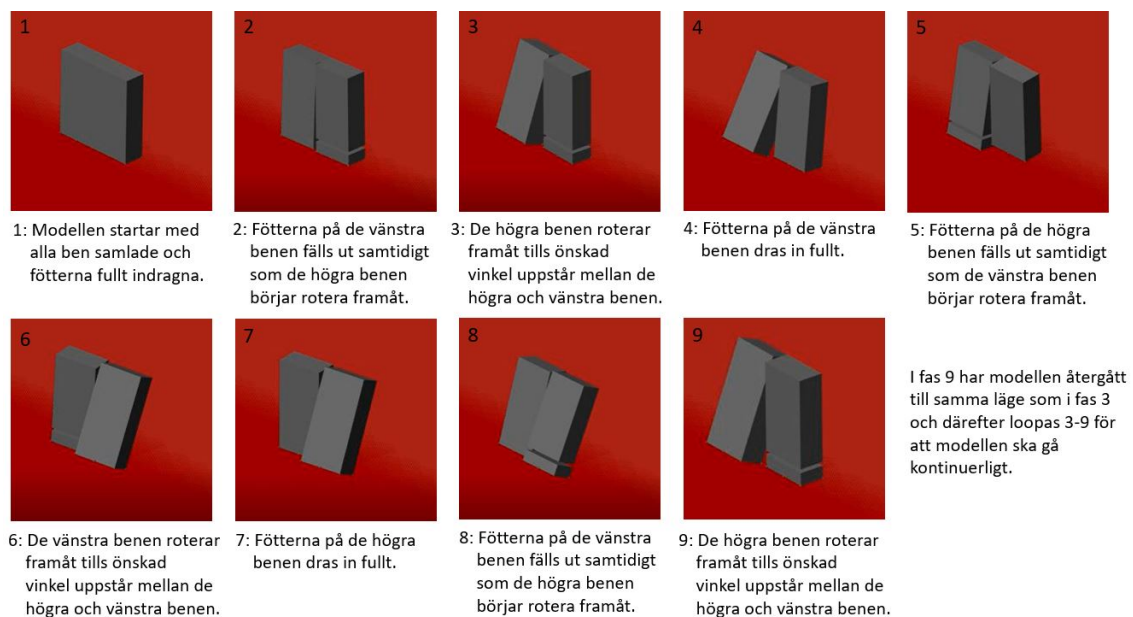
⁵Styrning utan återkoppling

kan simplificeras som 2D bipedalisk gång. Med denna gångstil kan modellen som används gå nästan fyra steg innan den ramlar.



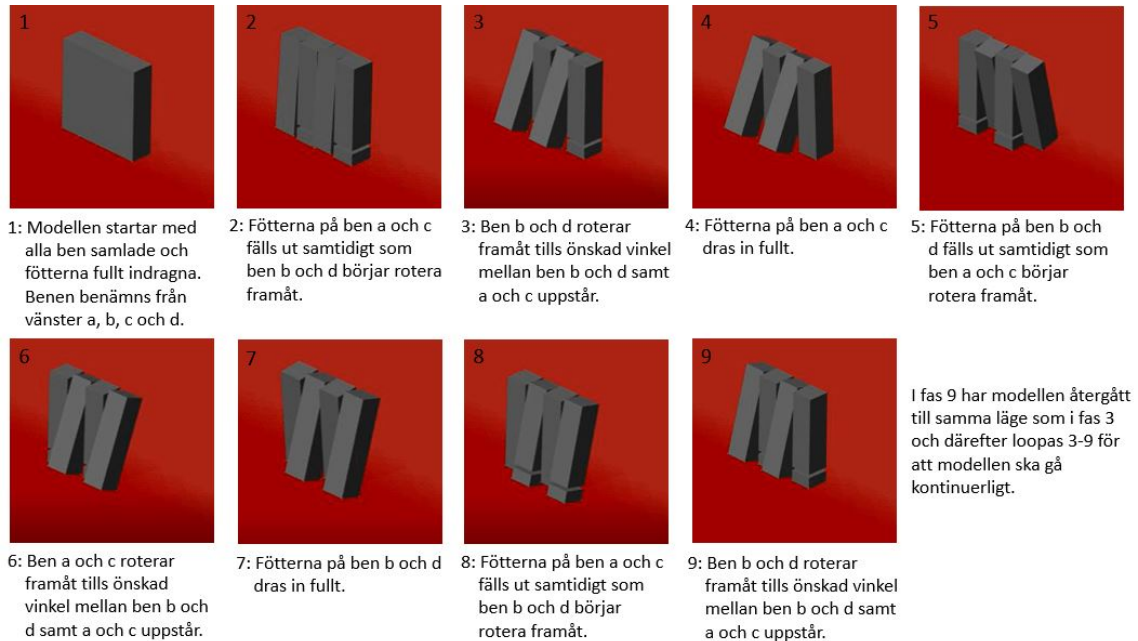
Figur 6: Bilder från simulering av gångsättet Kong-walk

Human-walk visas av Figur 7 och är det gångsätt som mest liknar hur en människa går, därav dess namn. Gångsättet karaktäriseras av att de två benen som är på samma sida om centrum agerar som ett gemensamt ben, där enbart den ena sidan är i kontakt med marken åt gången. Medan ett ben är i marken så fungerar roboten som en inverterad pendel. Till skillnad från Kong-walk har Human-walk fem stycken frihetsgrader, då den även kan välta åt sidan samt rotera runt sin vertikala axel. Med denna gångstil kan modellen som används gå nästan två steg innan den ramlar.



Figur 7: Bilder från simulering av gångsättet Human-walk

De tredje gångsättet påminner om när en häst travar och namngavs därför till Trotting och visas i Figur 8. Gångsättet karakteriseras av att varannat ben rör sig synkroniserat relativt varandra. Roboten får även med Trotting tre frihetsgrader, då den inte kan välta åt sidan eller rotera runt sin vertikala axel. Med denna gångstil kan modellen som används gå nästan två steg innan den ramlar.



Figur 8: Bilder från simulering av gångsättet Trotting

2.2 Pendelteori

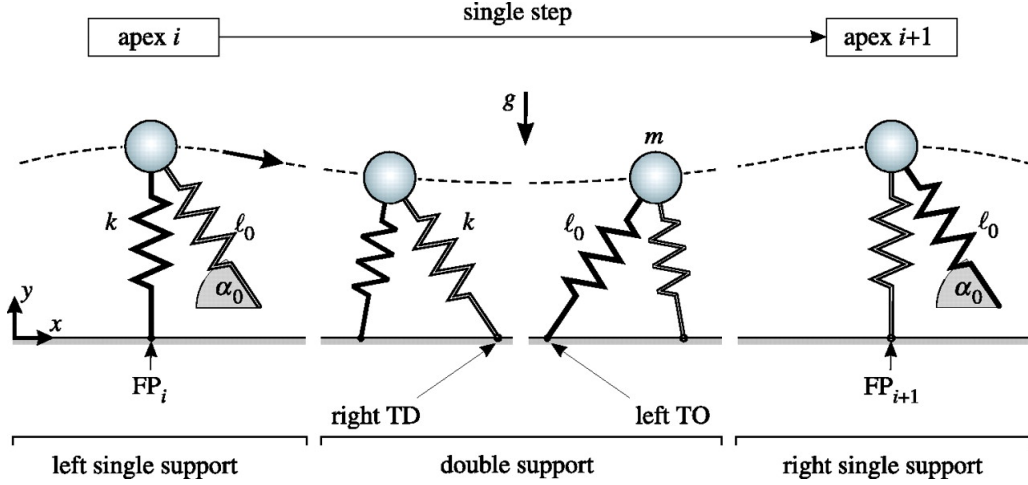
LARS ben kan liknas vid pendlar för att kunna skapa en matematisk modell av roboten för bland annat utvecklandet av reglersystem. I det här avsnittet skapas en teoretisk bakgrund runt bipedalism och dubbelpendlar som senare kommer att anpassas efter LARS.

2.2.1 Bipedalism

Då roboten går kan två närliggande ben ses som ett bipedaliskt system, vilket är ett system som bygger på att två pendlar är den framåt drivande mekanismen. En stor del av forskningen som har gjorts på bipedalism är gjord på människor och olika typer av tvåbenta djur, men har de senaste decennierna använts för att utveckla robotar som efterliknar den zoologiska rörelsen⁶.

En stegfrekvens för en massa med bipedalisk fjädring kan ses i Figur 9 (Geyer, Seyfarth & Blickhan, 2006). Rörelsen i positivt x-led initieras av att den ena pendeln förs framåt. Massan följer efter och när tyngtpunkten förflyttats över det främre benet börjar kroppen falla framåt. För att inte kroppen ska slå i marken används nu det bakre benet till att förflytta sig längst fram istället, och den potentiella energin omvandlas till rörelseenergi istället. Detta upprepas för kontinuerlig gång.

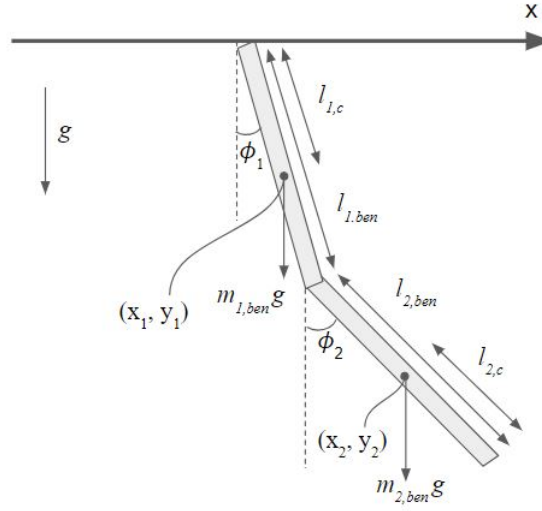
⁶Den bipedaliska gångstilen som använder sig av knäled



Figur 9: Massa med bipedalisk fjädring under en stegsekvens

2.2.2 Dubbelpendel

En dubbelpendel är en modell av två seriekopplade pendlar. Genom att likna roboten med en dubbelpendel enligt Figur 10 blir det möjligt att ställa upp en matematisk modell över ett system med två ben som får indexen 1 och 2. Beroende på det antal ben och gångsättet som roboten använder sig av kan sedan modellen dupliceras eller anpassas för att beskriva hela systemet.



Figur 10: Fritt upphängd dubbelpendel

I enlighet med *Control of Double Inverted Pendulum First Approach* (Dareini & Dabreteau, 2015) användes Lagranges mekanism för att ställa upp ekvationer som beskriver det olinjära dynamiska systemet för en dubbelpendel. Lagranges funktion, L , enligt ekvationen nedan beskriver skillnaden mellan benens totala kinetiska energi, E_k , och totala potentiella energi, E_p och kan härledas ur Newtons rörelselagar (Whittaker, 1917).

$$L = E_k - E_p \quad (3)$$

Den kinetiska energin kan delas upp i translationsenergi, E_k och rotationsenergi, E_r , enligt ekvationen nedan.

$$E_k = E_{2,k} + E_{1,k} + E_{2,r} + E_{1,r} \quad (4)$$

Translationsenergin är den energi som uppstås av kropparnas rörelse i rummet och beskrivs av ekvationen nedan.

$$\begin{aligned} E_{1,k} &= \frac{m_1}{2} |\vec{r}_1|^2 \\ E_{2,k} &= \frac{m_2}{2} |\vec{r}_2|^2 \end{aligned} \quad (5)$$

Där m är benets vikt, se Figur 10, och $|\vec{r}|$ är rörelsevektorn för benets tyngdpunkt vilket kan beräknas enligt nedan med ϕ som benets vinkel relativt gravitationsvektorn.

$$|\vec{r}_1| = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l_{1,c} \sin(\phi_1) \\ -l_{1,c} \cos(\phi_1) \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$|\vec{r}_2| = \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l_{1,ben} \sin(\phi_1) + (l_{2,ben} - l_{2,c}) \sin(\phi_2) \\ -l_{1,ben} \cos(\phi_1) - (l_{2,ben} - l_{2,c}) \cos(\phi_2) \end{pmatrix} \quad (7)$$

Då det som söks i ekvation 5 är $|\vec{r}_1|^2$ och $|\vec{r}_2|^2$ bestäms dessa enligt nedanstående ekvationer.

$$|\vec{r}_1|^2 = l_{1,c}^2 \dot{\phi}_1^2 \quad (8)$$

$$|\vec{r}_2|^2 = l_{1,ben}^2 \dot{\phi}_1^2 + (l_{2,ben} - l_{2,c})^2 \dot{\phi}_2^2 + 2l_{1,ben}l_{2,ben}\dot{\phi}_1\dot{\phi}_2\cos(\phi_1 - \phi_2) \quad (9)$$

Insättning av ekvation 8 och 9 i ekvation 5 ger nedanstående ekvation.

$$\begin{aligned} E_{1,k} &= \frac{m_1}{2} l_{1,c}^2 \dot{\phi}_1^2 \\ E_{2,k} &= \frac{m_2}{2} (l_{1,ben}^2 \dot{\phi}_1^2 + (l_{2,ben} - l_{2,c})^2 \dot{\phi}_2^2 + 2l_{1,ben}l_{2,ben}\dot{\phi}_1\dot{\phi}_2\cos(\phi_1 - \phi_2)) \end{aligned} \quad (10)$$

Rotationsenergin är energin som krävs för vardera benens rotation kring axeln med avseende på deras tyngdpunkter och beräknas enligt nedan.

$$\begin{aligned} E_{1,r} &= \frac{J_1}{2} \dot{\phi}_1^2 \\ E_{2,r} &= \frac{J_2}{2} \dot{\phi}_2^2 \end{aligned} \quad (11)$$

Där J är tröghetsmomentet för benen som beräknas enligt ekvation 21. Insättning av ekvation 10 och 11 i ekvation 4 ger ekvationen nedan.

$$E_k = \frac{m_1}{2} l_{1,c}^2 \dot{\phi}_1^2 + \frac{m_2}{2} (l_{1,ben}^2 \dot{\phi}_1^2 + (l_{2,ben} - l_{2,c})^2 \dot{\phi}_2^2 + 2l_{1,ben}l_{2,ben}\dot{\phi}_1\dot{\phi}_2\cos(\phi_1 - \phi_2)) + \frac{J_1}{2} \dot{\phi}_1^2 + \frac{J_2}{2} \dot{\phi}_2^2 \quad (12)$$

Den potentiella energin fås genom att addera de benens potentiella energi, $E_{1,p}$ och $E_{2,p}$, vilka fås från efterföljande ekvationer.

$$\begin{aligned} E_{1,p} &= m_1 g y_1 = -m_1 g l_{1,c} \cos(\phi_1) \\ E_{2,p} &= m_2 g y_2 = -m_2 g (l_{1,ben} \cos(\phi_1) + (l_{2,ben} - l_{2,c}) \cos(\phi_2)) \end{aligned} \quad (13)$$

Den totala potentiella energin fås genom att lägga ihop den potentiella energin för benen enligt nedan.

$$E_p = E_{1,p} + E_{2,p} = -m_1 g l_{1,c} \cos(\phi_1) - m_2 g (l_{1,ben} \cos(\phi_1) + (l_{2,ben} - l_{2,c}) \cos(\phi_2)) \quad (14)$$

Lagranges funktion kan nu tecknas genom att använda ekvation 12 och 14 i 3 vilket ger följande uttryck.

$$\begin{aligned} L &= \frac{m_1}{2} l_{1,c}^2 \dot{\phi}_1^2 + \frac{m_2}{2} (l_{1,ben}^2 \dot{\phi}_1^2 + (l_{2,ben} - l_{2,c})^2 \dot{\phi}_2^2 + 2l_{1,ben}l_{2,ben}\dot{\phi}_1\dot{\phi}_2\cos(\phi_1 - \phi_2)) \\ &\quad + \frac{J_1}{2} \dot{\phi}_1^2 + \frac{J_2}{2} \dot{\phi}_2^2 + m_1 g l_{1,c} \cos(\phi_1) + m_2 g (l_{1,ben} \cos(\phi_1) + (l_{2,ben} - l_{2,c}) \cos(\phi_2)) \end{aligned} \quad (15)$$

För att få en enklare ekvation att arbeta med byts alla variabler som inte är relaterade till vinkeln ut mot konstanter och följande blir kvar

$$L = k_1 \dot{\phi}_1^2 + k_2 \dot{\phi}_2^2 + k_3 \dot{\phi}_1 \dot{\phi}_2 \cos(\phi_1 - \phi_2) + k_4 \cos(\phi_1) + k_5 \cos(\phi_2) \quad (16)$$

där konstanterna $k_1, \dots, k_5$ fås av Tabell 1.

Tabell 1: Konstanterna $k_1, \dots, k_5$ i ekvation 16

Konstant	Värde
k_1	$\frac{1}{2}(m_1 l_{1,c}^2 + m_2 l_{1,ben}^2 + J_1)$
k_2	$\frac{1}{2}(m_2 (l_{2,ben} - l_{2,c})^2 + J_2)$
k_3	$m_2 l_{1,ben} l_{2,ben}$
k_4	$g(m_1 l_{1,c} + m_2 l_{1,ben})$
k_5	$m_2 g(l_{2,ben} - l_{2,c})$

Vidare kan systemets rörelse beräknas med hjälp av Euler-Lagranges ekvationen nedan, där $n = 1, 2$ då systemet har två pendlar.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\phi}_n} \right) - \frac{\partial L}{\partial \phi_n} = 0 \quad (17)$$

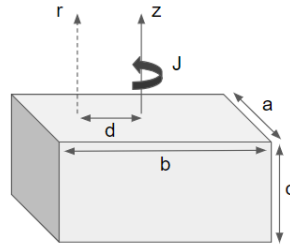
Genom att använda ekvation 17 tillsammans med 16 fås följande två ekvationer som beskriver hur benen rör sig.

$$k_4 \sin(\phi_1) + 2k_1 \ddot{\phi}_1 + k_3 \ddot{\phi}_2 \cos(\phi_1 - \phi_2) + k_3 \dot{\phi}_2^2 \sin(\phi_1 - \phi_2) = 0 \quad (18)$$

$$k_5 \sin(\phi_2) + 2k_2 \ddot{\phi}_2 + k_3 \ddot{\phi}_1 \cos(\phi_1 - \phi_2) - k_3 \dot{\phi}_1^2 \sin(\phi_1 - \phi_2) = 0 \quad (19)$$

2.2.3 Tröghetsmoment

Tröghetsmomentet, J , säger hur mycket moment som krävs för att skapa en given skillnad i rotationshastighet per tidsenhet för en kropp runt en given axel. För ett rätblock enligt Figur 11 beräknas tröghetsmomentet runt Z-axeln enligt ekvationen nedan (Ekh m. fl., 2015).



Figur 11: Tröghetsmoment för rätblock med förflyttad referensaxel från masscentrum.

$$J_z = \frac{1}{12} \cdot m(a^2 + b^2) \quad (20)$$

Steiners sats, även känd som parallellaxelteoremet, beskrivs av ekvationen nedan och används vid förflyttning av tröghetsmomentet till en ny referensaxel som inte går genom kroppens masscentrum (Ekh m. fl., 2015).

$$J_r = J_z + md^2 \quad (21)$$

3 Konceptval

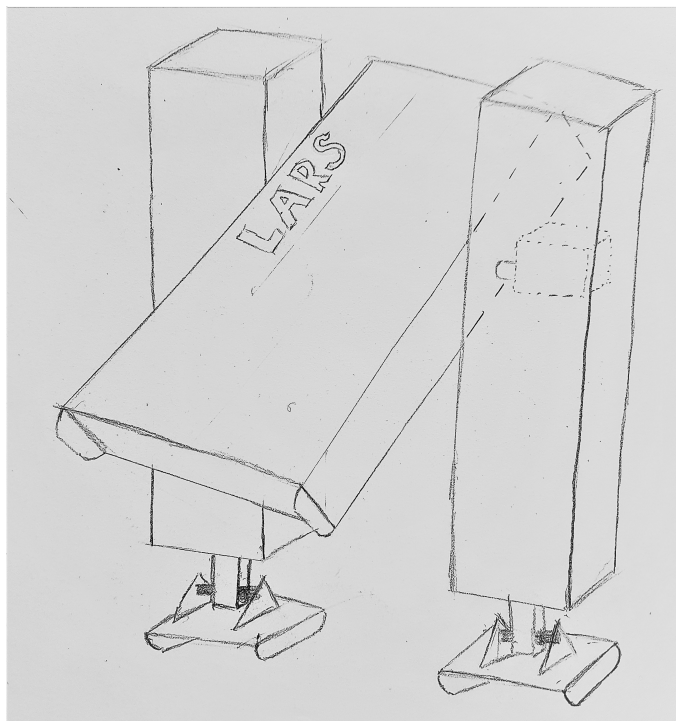
Konstruktionen av en robot som imiterar TARS inleddes med en produktutvecklingsprocess innehållande flera processteg. I det här kapitlet presenteras det koncept som efter processen ansågs vara bäst lämpat för projektet.

3.1 Beskrivning av process

Arbetet började med att genomföra en funktionsanalys för att undersöka vilka uppgifter som roboten behöver lösa, vilka sammanställdes i ett funktionsträd, se Appendix A.1. Flertalet möjliga dellösningar genererades som lösningar på funktionerna i funktionsträdet. Med hjälp av fyra morfologiska matriser kombinerades dellösningarna till hela koncept, se Appendix A.2 respektive A.3. Koncepten utvärderades sedan mot varandra i en elimineringsmatris samt en Pughmatris tills endast det koncept som ansågs ha störst potential var kvar, se Appendix A.4 respektive A.5. Detta koncept utvecklades sedan ytterligare och resulterade i ett slutgiltigt koncept, vilket beskrivs i Avsnitt 3.2.

3.2 Slutgiltigt koncept

Konceptet som valdes består av tre ben som roteras i förhållande till varandra med hjälp av två stegmotorer och visas i Figur 12. Axeln som benen roterar runt placerades på tre fjärdedelar av robotens höjd från marken. De två ytterbenen görs kortare än innerbenet samt förses med varsin fot, som höjs upp och ner med hjälp av linjära aktuatorer. Längdskillnaden på benen har som funktion att möjliggöra rotation av benen framåt utan att de slår i marken. Fötterna skapas med en avrundning för att minska ryckigheten i gången. En fördel med att konceptet har tre ben istället för fyra är att det krävs färre komponenter. Konstruktionen är anpassad för gångsättet Kong-walk⁷, vilket är det gångsätt som medger störst stabilitet vid öppen styrning. Innerbenet beskrivs i resterande rapport med indexet i och ytterbenet med indexet y .



Figur 12: Konceptskiss av det slutgiltiga konceptet

⁷se Kong-walk i Figur 6, Avsnitt 2.1.2

4 Konstruktion av robot

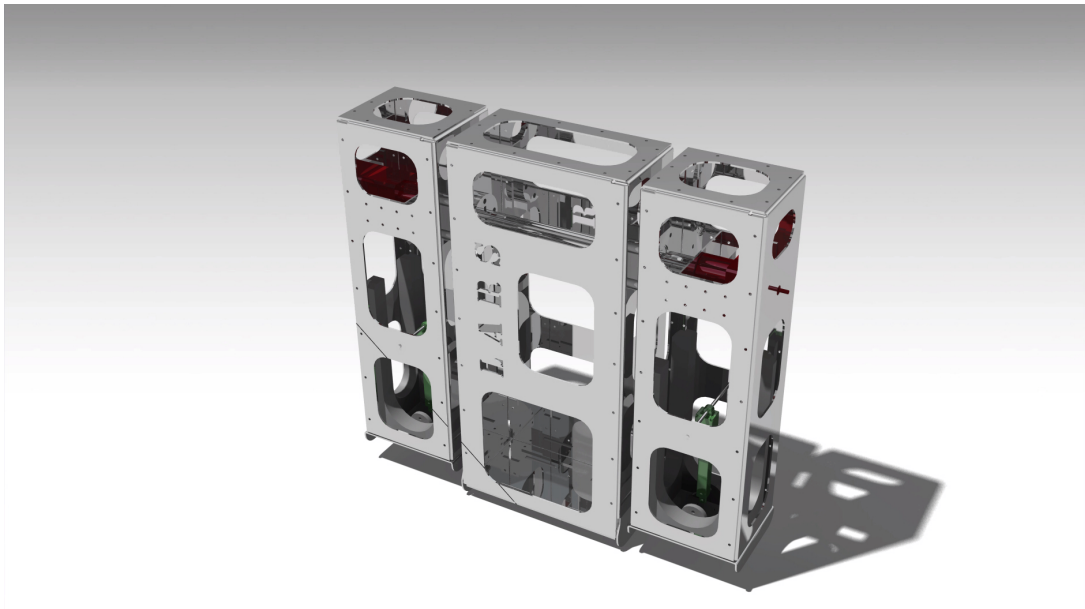
Kapitlet beskriver vidareutvecklingen från det slutgiltiga konceptet till en färdigbyggd robot. Avsnitt som behandlas är CAD-modellering, val av komponenter, kopplingschema, hållfasthetsberäkningar på kritiska komponenter, byggnadsprocessen och mjukvaruutveckling. Samtliga ritningar på egen-gjorda komponenter finns bifogade i Appendix B.

4.1 CAD-modellering

För att skapa en förståelse över hur alla delar ska sitta ihop och fungera tillsammans skapades en CAD-modell med vertyget *CATIA V5* (Systèmes, 2018). CAD-modellen belyste även potentiella problem, vilket förhindrade att drastiska konstruktionsförändringar skulle ske i senare utvecklingsstadier. Denna modell står som grund för hur roboten sedan ska byggas. Samtliga delar som ska tillverkas för hand tillverkades först som CAD.

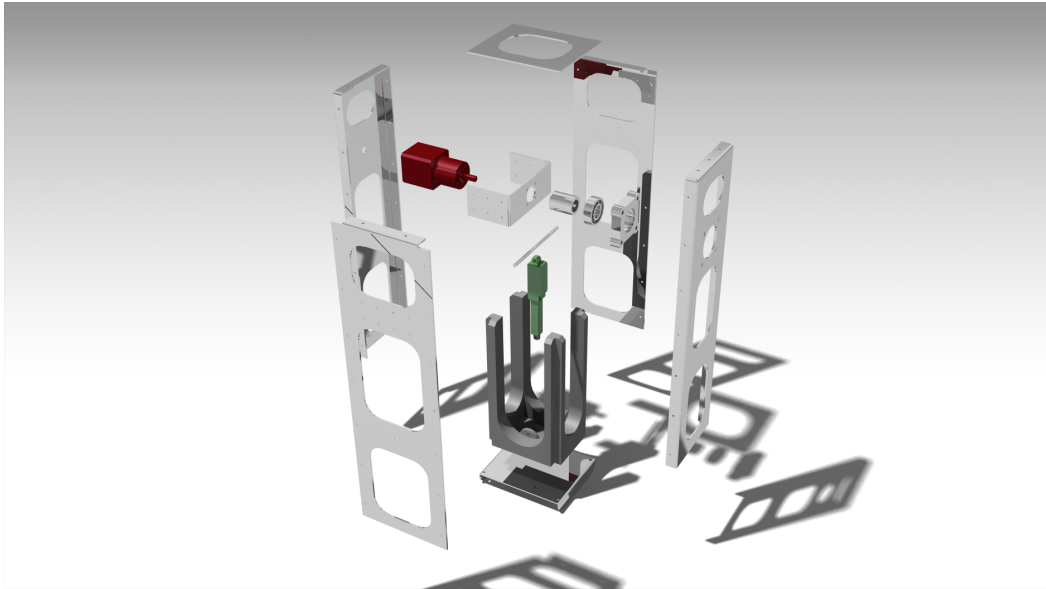
CAD-modellen användes i första hand för att bestämma dimensioner och funktioner som alla delar behövde ha. Beslutet togs att bygga större delen av roboten av aluminiumplåt. Varje sida av vardera ben är en separat plåt som popnitas fast i varandra genom att bocka sidorna på plåtarna. Plåtarna designades för att kunna användas på så många ben som möjligt för att förenkla produktionen. Det bestämdes att lätthål⁸ skulle användas för att minska robotens massa, samt för att underlätta montering, demontering och justeringar inuti roboten.

Genom att använda Catias *generative sheet metal design* kunde plåt formas och bockas i programmet. Samtliga delar designades för att kunna användas på flera platser på roboten, till exempel är fram- och baksidorna på bägge ytterbenen identiska. Detta gjordes främst för att spara tid och för att underlätta byggandet. Delar försöktes även göras symmetriska så bockningsriktningen kunde ändras efter utskrift av plåten. I Figur 13, 14 och 15 visas hela CAD-modellen framifrån, en exploderad vy av ett ytterben och en exploderad vy av mittenbenet.

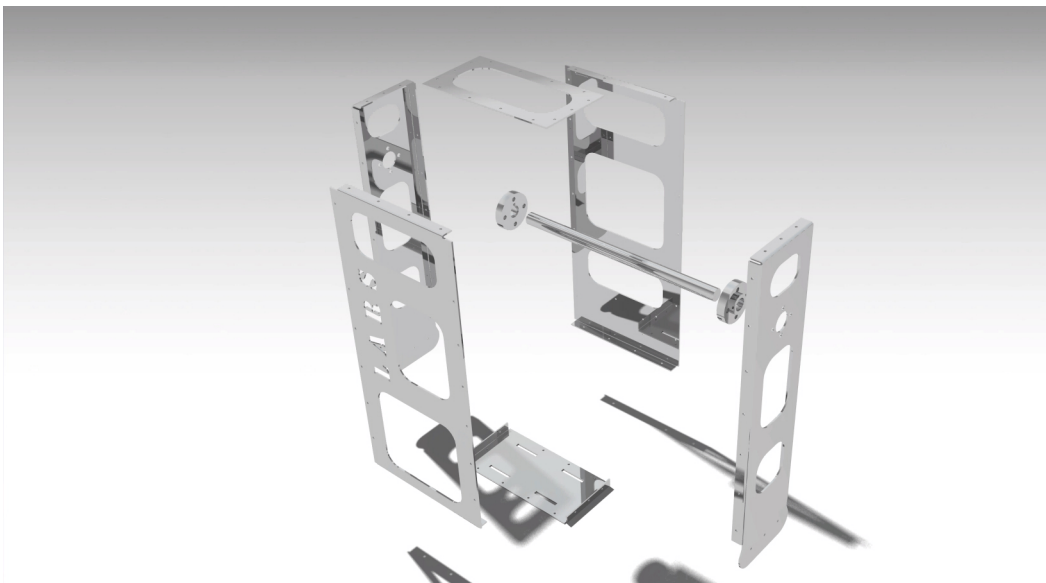


Figur 13: Bild på CAD-modell av hela konceptet

⁸Lätthål: utskärningar i plåt för att göra en nödigt dimensionerad plåt lättare och möjliggöra montering



Figur 14: Bild på exploderad vy av ytterbenet



Figur 15: Bild på exploderad vy av mittenbenet

Från CAD-modellen fås delmassor för roboten vilket ger vikten på robotens innerben och ytterben, $m_{i,chassi}$ respektive $m_{y,chassi}$, och sammanställs i Tabell 2.

Tabell 2: Delmassor från CAD-modell

	Innerben		Ytterben	
Komponent	Vikt (Kg)		Vikt (Kg)	
Topp	0,057		0,040	
Botten	0,119		0,394	
Höger sida	0,248		0,212	
Vänster sida	0,248		0,205	
Framsida	0,286		0,150	
Baksida	0,314		0,150	
Aktuatorstång			0,004	
Axel	0,462			
Axelkoppling	0,026·2			
Kilförband	0,047·2			
Kullager	0,044·2			
Kullagerhus			0,135	
Motorfäste			0,047	
Totalt	$m_{i,chassi}$	1,968	$m_{y,chassi}$	1,337

Även mått på benen fås ur CAD-modellen och presenteras i Tabell 3. När beräkningar genomförs med variablerna $l_{y,a}$ och $l_{y,m}$ görs en förenkling. Med tanke på att variablernas värden är intervall som beror på om benen är indragna eller utskjutna kommer istället medelvärdet av dessa att användas. Detta bedöms ge en tillräckligt noggrann bild av de problem som ställts upp.

Tabell 3: Mått från CAD-modell

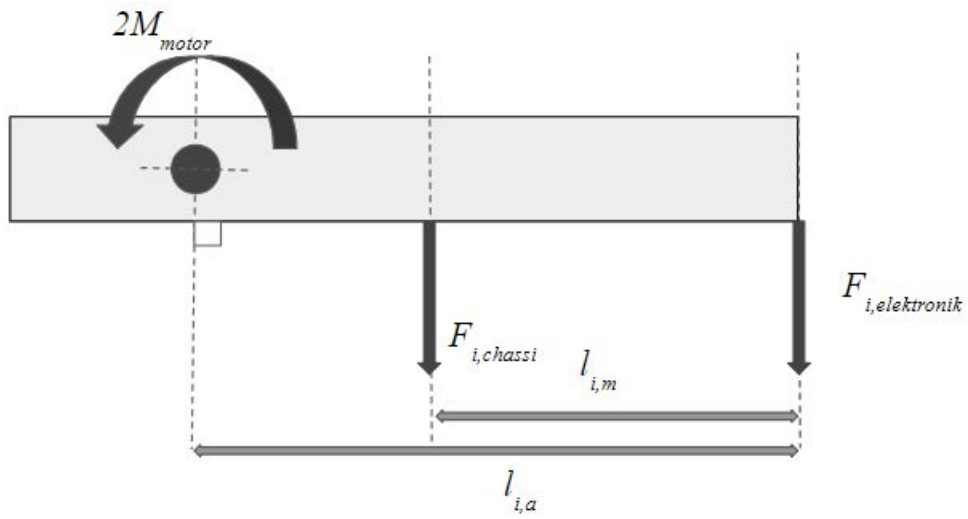
Mått	Variabelnamn	Längd (m)
Underkant fot - axel, innerben	$l_{i,a}$	0,340
Underkant fot - axel, ytterben	$l_{y,a}$	0,315-0,365
Djup ben	d_{ben}	0,108
Bredd ben, innerben	$b_{i,ben}$	0,206
Bredd ben, ytterben	$b_{y,ben}$	0,126
Längd ben, innerben	$l_{i,ben}$	0,452
Längd ben, ytterben	$l_{y,ben}$	0,427 - 0,477
Längd till mitten från marken, innerben	$l_{i,m}$	0,226
Längd till mitten från marken, ytterben	$l_{y,m}$	0,214-0,239

4.2 Val av komponenter

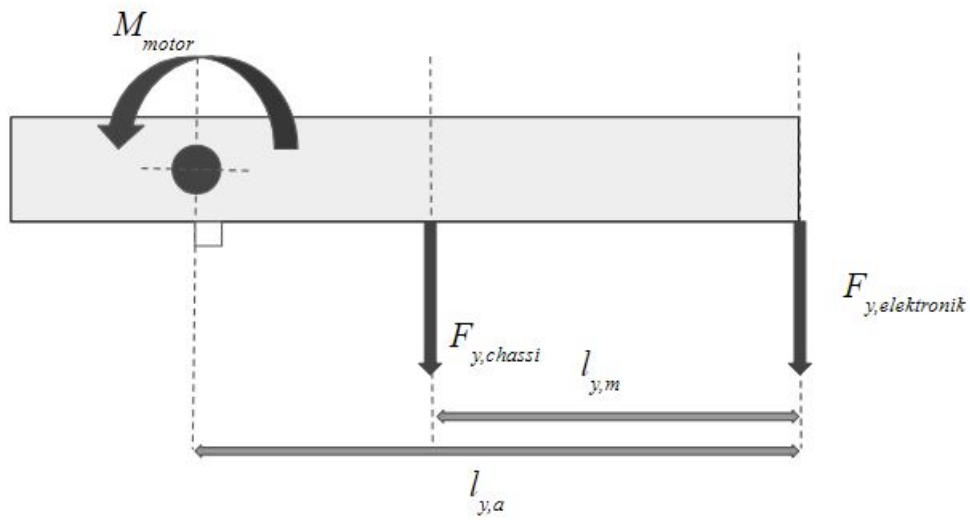
Detta kapitel beskriver processen för hur alla komponenter valdes genom att ta hänsyn till vikter och dimensioner så att roboten fick rätt förutsättningar för att uppfylla kraven.

4.2.1 Stegmotorer

För att få en uppfattning om hur starka stegmotorer som behövs utnyttjades CAD-modellens mått och uppskattade vikter på robotens benen, $m_{i,chassi}$ och $m_{y,chassi}$, samt en uppskattad vikt på de ingående elektriska komponenterna, $m_{i,elektronik}$ och $m_{y,elektronik}$. Två statiska jämviktsekvationer ställdes upp när roboten håller sitt innerben respektive ytterben utsträckta med en vinkel på 90 grader enligt Figur 16 och Figur 17. Mindre vinklar kommer användas vid gång, men eftersom detta är extremfallet kommer LARS klara alla vinklar om den klarar 90 graders vinkel. Detta ger även marginal till de vinklar som kommer användas. Notera att vikterna och placeringen på elektroniken endast är uppskattade, då dessa inte var kända vid tidpunkten för beräkningarna.



Figur 16: Friläggning av innerbenet vid 90°



Figur 17: Friläggning av ytterbenet vid 90°

De olika komponenternas tyngdkrafter beräknades med hjälp av Newtons andra lag (Ekh m. fl., 2015),

$$F = ma \quad (22)$$

där den enda inverkan accelerationen är tyngdkraftsaccelerationen som är $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Krafterna sammanställdes i Tabell 4.

Tabell 4: Vikter och krafter genererade av ingående komponenter

Variabel, massa	Vikt (kg)	Variabel, kraft	N
$m_{i,chassi}$	1,968	$F_{i,chassi}$	19,306
$m_{y,chassi}$	1,337	$F_{y,chassi}$	13,116
$m_{i,elektronik}$	1,000	$F_{i,elektronik}$	9,810
$m_{y,elektronik}$	0,500	$F_{y,elektronik}$	4,905

För att beräkna momentet användes följande ekvation (Ekh m. fl., 2015)

$$\sum M = J\ddot{\phi} \quad (23)$$

vilket för ytter och innerbenen kan skrivas som:

$$\begin{aligned} \sum M_i &= J_i\ddot{\phi}_{i,a} \\ \sum M_y &= J_y\ddot{\phi}_{y,a} \end{aligned} \quad (24)$$

Här gjordes förenklingen att vinkelaccelerationen, $\ddot{\phi}$, kan försummas då den är väldigt låg. Detta innebär att $\ddot{\phi}_{i,a} \approx 0$ för innerbenet och $\ddot{\phi}_{y,a} \approx 0$ för ytterbenet. Alltså kan ekvation 24 istället skrivas som

$$\begin{aligned} \sum M_i &= 0 \\ \sum M_y &= 0 \end{aligned} \quad (25)$$

För att få fram de statiska momentbidragen till ekvation 25 krävdes avstånden till de olika delarna. Dessa togs fram ur CAD-modellen och redovisades i Tabell 3. Längderna tillsammans med krafterna från Tabell 4 gjorde det möjligt att ställa upp bidragen i ekvation 25 så att följande erhöles för innerbenet:

$$\begin{aligned} -2M_{motor} + F_{i,chassi}(l_{i,a} - l_{i,m}) + F_{i,elektronik}l_{i,a} &= 0 \\ \Rightarrow M_{motor} &= 2,7681 \text{ Nm} \end{aligned} \quad (26)$$

Samma princip utfördes för ytterbenen enligt nedan.

$$\begin{aligned} -M_{motor} + F_{y,chassi}(l_{y,a} - l_{y,m}) + F_{y,elektronik}l_{y,a} &= 0 \\ \Rightarrow M_{motor} &= 3,1564 \text{ Nm} \end{aligned} \quad (27)$$

Med hjälp av de moment som krävs kunde stegmotorer väljas. Motorerna som valdes är NEMA-17 Geared Bipolar Stepper Motor och visas i Figur 18.



Figur 18: NEMA-17 Geared Bipolar Stepper Motor från Phidgets (Robotshop, 2018)

Motorns maxhastighet är 120° per sekund vilket är bra med tanke på att robotens ben kommer hålla rotationsvinkel inom 90° och alltså kunna rotera ut fullt på under en sekund. Motorn rekommenderas att användas på minst 12 V men kan användas upp till 30 V. För varje signal roterar motoraxeln $0,067^\circ$ på grund av växellådans utväxling, vilket motsvarar ungefär 5373 steg per varv. Specifikationerna sammanfattas i Tabell 5.

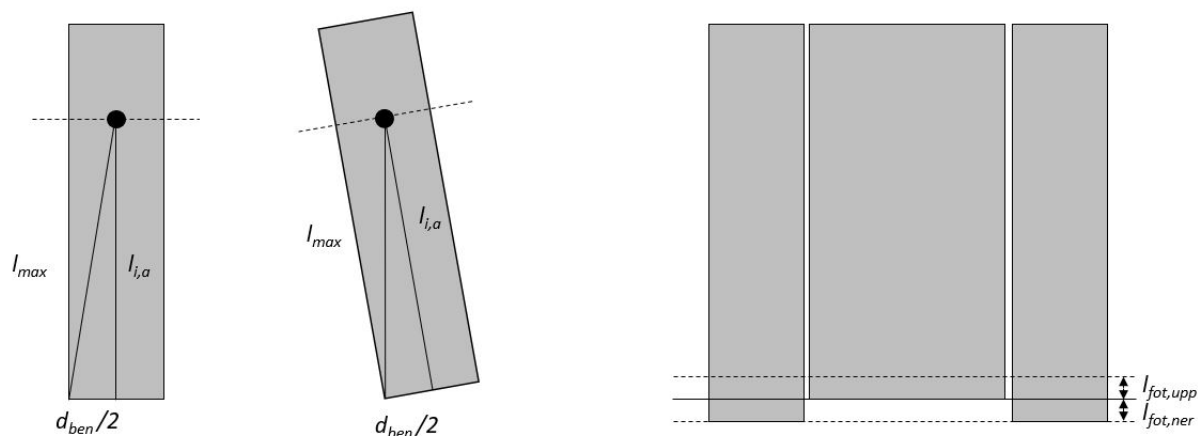
Tabell 5: Specifikationer för valda stegmotorer

Motorspecifikationer	Värde	Enhet
Stegvinkel efter växellåda	0,067	°
Hållmoment	2,94	Nm
Märkvridmoment	2,94	Nm
Hastighet	max 174	rpm
Elektriska egenskaper	Värde	enhet
Rekommenderad spänning	12-30	V
Märkström	1,7	A
Spolresistans	1,7	Ω
Fysiska egenskaper	Värde	Enhet
Bakre axeldiameter	8	mm
Vikt	0,503	kg
Växellåda	Planetväxel	-
Utväxling	$26 \frac{103}{121} : 1$	-

Motorn klarar av ett hållmoment på 2,94 Nm, vilket innebär att det är nära till extremfallet på 3,15 Nm. Med tanke på att detta är ett extremfall och att motorn under en kort period kan leverera ett max moment på 7,7 Nm betraktas ändå motorn vara tillräcklig. Extremfallet garanterar motorerna väl mot överbelastningar, vilket medför att det fortfarande möjlighet att flytta omkring komponenter för att förändra momentet och tyngdpunkten i LARS om det bedöms förmånligt eller nödvändigt. För ytterligare specifikationer se Appendix C.1.

4.2.2 Linjära aktuatorer

För att LARS skulle förflytta sig framåt krävs en lyftanordning, vilken implementeras med hjälp av att ytterbenen konstrueras kortare än innerbenen samt att ytterbenen tillverkas med varsin fot som kan sänkas upp och ner med hjälp av linjära aktuatorer. För att beräkna hur långt de linjära aktuatorerna behöver sträckas ut ställs en modell upp enligt Figur 19.



Figur 19: Modell av LARS vid fotlyft

Med hjälp av modellen kan beräkningar göras på hur mycket fötterna måste vara utsträckta för att innerbenet ska kunna rotera utan att slå i marken. Den kritiska punkten är när bakre kanten av innerbenets fot befinner sig rakt under rotationsaxeln, detta avstånd ses i bilden som l_{max} . $l_{i,a}$ är avståndet från axelns centrum till botten av benet.

Höjden som fötterna behöver vara utsträckta vid detta tillstånd, $l_{fot,ner}$, beräknas enligt ekvationen nedan,

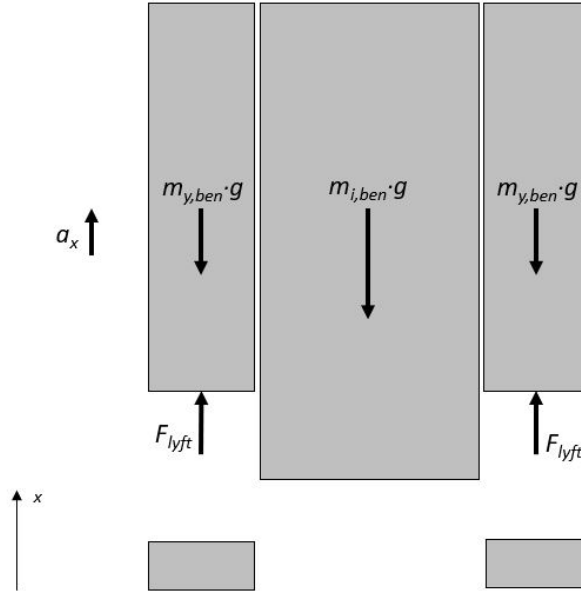
$$l_{fot,ner} = l_{max} - l_{i,a} \quad (28)$$

där l_{max} beräknas med hjälp av Pythagoras sats enligt,

$$l_{max} = \sqrt{l_{i,a}^2 + \left(\frac{d_{ben}}{2}\right)^2} \quad (29)$$

Insättning av värden från Tabell 3 i ekvation 28 och 29 fås att foten måste sänkas minst 4,5 mm. För att skapa ett avstånd mellan innerbenets fot och marken läggs det på ytterligare en centimeter, vilket gör att utstäckningen behöver vara 14,5 mm. På grund av konstruktionen ska foten kunna föras både upp och ner, vilket gör att kravet på den linjära aktuatorn blir det dubbla, alltså 29 mm.

För att dimensionera vilken lyftkraft de linjära aktuatorerna behöver klara av görs en friläggning av LARS enligt Figur 20.



Figur 20: Friläggning av LARS vid fotlyft.

F_{lyft} är kraften som skapas av en linjär aktuatorer för att motverka tyngdaccelerationen, g , samt accelerera roboten med accelerationen a_x . Massorna för respektive ben döps till $m_{i,ben} = m_{i,chassi} + m_{i,elektronik}$ och $m_{y,ben} = m_{y,chassi} + m_{y,elektronik}$. Med hjälp av friläggningen kan en jämviktsekvation enligt Newtons andra lag, ekvation 22, ställas upp. Detta görs i positiv x-riktning enligt nedan.

$$\begin{aligned} 2F_{lyft} - m_{i,ben}g - 2m_{y,ben}g &= m_{i,ben}a_x + 2m_{y,ben}a_x \\ \Rightarrow F_{lyft} &= \left(\frac{m_{i,ben}}{2} + m_{y,ben}\right)(a_x + g) \end{aligned} \quad (30)$$

Accelerationen i x-led, a_x , försummas då foten ska skjutas ut cirka 15 mm på ungefär 2 sekunder vilket motsvarar en acceleration på under 0.01 m/s^2 . Med insättning av massor enligt Tabell 4 i ekvation 30 beräknas $F_{lyft} = 31,67 \text{ N}$, vilket är minimikravet på kraften som varje linjär aktuator måste klara av att lyfta. Notera att den vertikala friktionskraften mellan foten och benet har försumrats från då de bedöms vara små.

Med kravet på minimikraft och minimiutsträckning väljs den linjära aktuatoren L16 Actuator 50 mm 63:1 6 V RC Control från Actuonix, Figur 21.



Figur 21: L16 Actuator 50 mm 63:1 6 V RC Control från Actuonix (Robotshop, 2018)

De linjära aktuatorerna som valdes är lättviktiga men kan ändå generera en maximal kraft på 75 N vid hastigheten 7 mm/s. Eftersom roboten kommer att använda två aktuatorer kan en maximal vertikalkraft på 150 N genereras. Denna kraft begränsar i sin tur att robotens maxvikt kan vara drygt 15 kg, vilket innebär att det finns en god marginal även när det kommer till vikten. Aktuatorerna kan sträckas ut 50 mm, vilket är över det beräknade kravet på 29 mm. En insignal med pulsbredden 1 ms ger maximal utsträckning och en signal med pulsbredden 2 ms ger maximal indragning. Den maximala hastighet som aktuatorerna har då de inte är belastade är 20 mm/s. Några av de viktigaste specifikationerna sammanställs i Tabell 6. För ytterligare specifikationer se Appendix C.2.

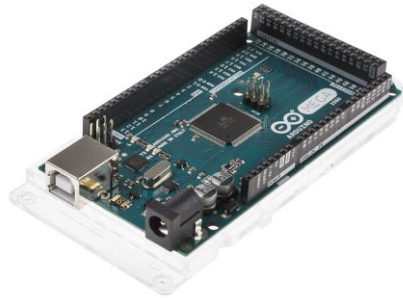
Tabell 6: Specifikationer för vald linjär aktuator

Variabel	Värde	Enhet
Utväxling	63:1	-
Maximal kraft	75	N
Maximal statisk kraft	250	N
Maximal fart (Utan last)	20	mm/s
Stråklängd	50	mm
Vikt	0,074	kg
Spänning	6	V
Ström vid fullt arbete	0,4	A
Upprepningsfel	0,4	mm
Mekaniskt glapp	0,25	mm

4.2.3 Mikrokontroller

För att kunna styra robotens komponenter och delsystem krävs en mikrokontroller. Valet av mikrokontroller är vitalt för att uppnå önskad funktion utan att begränsa robotens möjligheter. Mikrokontrollern drivs av en processor, och valet här är viktigt för att inte begränsa robotens prestation. En för långsam processor kommer göra att beräkningar och instruktioner i programkoden inte processeras tillräckligt fort. Utöver alla dessa faktorer är det väldigt viktigt att valet av mikrokontroller klarar av att kopplas samman med alla de andra komponenterna i systemet.

I projektet valdes MEGA 2560 från Arduino, Figur 22, som är ett utvecklingskort baserat på arkitekturen ATmega2560.



Figur 22: MEGA 2560 från Arduino (RSComponentsAB, 2018)

Anledningen till att ett utvecklingskort från Arduino valdes att arbetas med är att det är ett väl etablerat märke som används i många hobbyarbeten så som enklare maskiner och robotar av olika slag. Med en bred användarbas och mycket öppen källkod kommer utvecklingen av mjukvaran förenklas. Valet av MEGA 2560 gjordes med några attribut i åtanke som listas i Tabell 7. För ytterligare specifikationer se Appendix C.4.

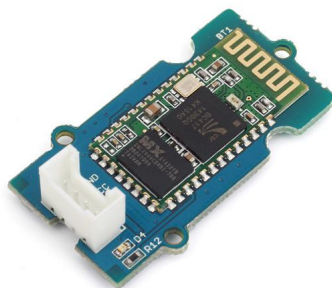
Tabell 7: Specifikationer för valda mikrokontroller

Specifikation	Värde	Enhet
Digital portar	54	-
Digitala portar med PWM	14	-
Analoga portar	16	-
Portar för hårdvaruavbrott	2, 3, 18, 19, 20, 21	-
Strömförsörjning	6-20 (7-12 rekommenderad)	V
Lagring	256	KB
Processorhastighet	16	MHz
Max strömåtgång I/O port	40	mA
Max strömåtgång 5V/3.3V/GND port	50	mA

4.2.4 Extern kommunikation

För att kunna kommunicera med roboten via en extern styrkontroll, antingen en mobiltelefon eller en annan handkontroll, behöver det etableras en trådlös kommunikation. Den lösning som bedömdes enklast och mest prisvärd var Bluetooth. Bluetoothmoduler är väl använda inom robot-tillverkningsindustrin och det finns flertalet olika modeller och tekniker. Syftet med den trådlösa styrningen är inte att fullt ut kontrollera robotens rörelse, utan snarare ge den enkla instruktioner som att gå framåt eller stanna.

Då Bluetoothmodulen skulle kunna fästas i roboten med enkelhet valdes Grove - Serial Bluetooth v3.0 från Seeds Inc., Figur 23. Bluetoothmodulen är fäst på en platta som kan monteras direkt i robotens chassi och den kommer komplett med tillhörande kablar.

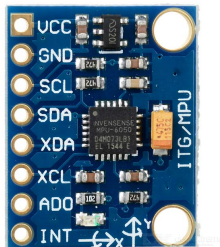


Figur 23: Grove - Serial Bluetooth v3.0 (SeedStudio, 2018)

4.2.5 Sensorer

I allmänhet är det viktigt att under konstruktionen av en robot diskutera hur roboten ska kunna utföra samma funktioner upprepade gånger. Detta kan lösas genom att implementera ett regler-system som kompenserar om roboten gör avvikande rörelser. Sensorer kan användas för att mäta systemets rörelser och mäta av omgivningen roboten befinner sig i. Genom att koppla samman sensorerna med mikrokontrollern kan data läsa av från sensorerna och sedan användas i styrningen roboten.

Till LARS valdes två sensorer av modellen GY-521, Figur 24, vilka består av varsin rörelsesensor av typen MPU-6050. MPU-6050 är en accelerometer med tre frihetsgrader och ett gyroskop med tre frihetsgrader som kan avläsa hur en kropp rör sig. Datan som sensorerna gav kunde sen tolkas och utge en grund för regelsystemet. För ytterligare specifikationer se Appendix C.5.



Figur 24: GY521 MPU-6050 Module 3 Axis Gyroscope Accelerometer Module (Microsolutions, 2018)

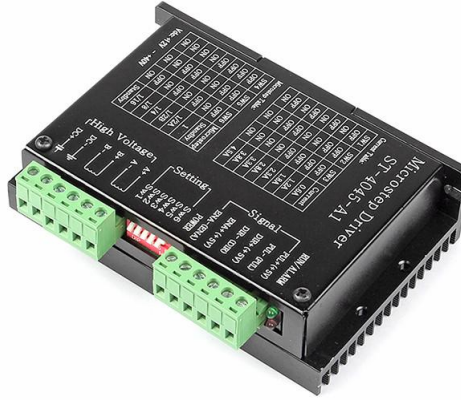
4.2.6 Drivkort för stegmotor

För strömkrävande komponenter, exempelvis stegmotorer, behövs extern strömförsörjning då en Arduino Mega endast kan förse en spänning på maximalt 5 V, medan stegmotorerna kräver en spänning på 12 V. För att uppnå tillräcklig strömförsörjning ansluts drivkortet mellan mikrokontrollern och stegmotorerna, som i sin tur drivs av ett starkt externt batteri. Genom att koppla drivkort mellan mikrokontrollern och stegmotorerna möjliggörs även en enkel styrning av motorn med hjälp av drivkortets inbyggda krets.

Drivkortet som valdes är två stycken TB6600 Stepper Motor Driver, se Figur 25. Dessa drivkort stödjer styrning av bipolära stegmotorer med en inspanning upp till 4 A och klarar av en inspanning på 9-42 V, vilket gör att motorerna kommer ha gott om kraft för att kunna driva robotens ben. Drivkortet möjliggör exakt styrning både av motorernas riktning och hastighet genom pulsbreddsmodulering⁹, men korten har även en funktion där varje steg motorn tar kan delas upp

⁹En metod för att variera spänning genom att slå av och på spänningen väldigt fort

i så kallade *micro steps* för att möjliggöra ytterligare frihet när det kommer till hur motorerna ska styras. Slutligen innehåller drivkorten skyddskretsar som skyddar mot kortslutning, överhettning och att för stor ström skickas igenom. Några viktiga specifikationer redovisas i Tabell 8. För ytterligare specifikationer se Appendix C.7.



Figur 25: Single-Axis CNC Stepper Motor Driver Controller, TB6600 (SainSmart, 2018)

Tabell 8: Specifikationer för valda drivkort

Specifikation	Värde	Enhet
Ingångsström	0-5	A
Utgångsström	0,5-4	A
Ingångsspänning	9-42	V

4.2.7 Batteri

Eftersom de andra elektriska komponenterna i LARS tillsammans drar en hög ström, $I_{elektronik}$, cirka 5,7 A enligt ekvation 31, så krävs det ett batteri som kan ge en hög ström med tillräcklig hög spänning och samtidigt kan räkna tillräckligt länge så det inte behövs laddas för ofta. Aktuatorerna drar 400 mA per aktuator, $I_{aktuator}$, enligt Tabell 6. Motorerna drar 1,7 A, I_{motor} , per motor enligt Tabell 5. Arduinon uppskattas till 1 A, $I_{arduino}$, då varje strömförsörjande port kan ge ut 50 mA och varje I/O-port kan ge ut 40 mA enligt Tabell 7 C.3, siffran är med säkerhet mindre i verkligheten. Detta ger en strömförbrukning som redovisas nedan.

$$I_{elektronik} = 2_{motor} + 2_{aktuator} + I_{arduino} = 2 \cdot 1,7 + 2 \cdot 0,4 + 1 = 5,2 \text{ A} \quad (31)$$

För att ha en god marginal för oförutsedda förluster så valdes ett batteri med 2800 mAh. Batteriet heter Turnigy Bolt 2800mAh 4S 15.2V LiHV. Batteriet bör då räkna cirka 30 minuter enligt ekvationen nedan. Drivkorten har möjlighet att hantera spänningar upp till 42 V, dock ökar storleken och kostnaden på batterier desto mer spänning de kan leverera. Detta gjorde att valet blev ett batteri med tillräckligt hög spänning men som även var tillgängligt och prisvärt.

$$\frac{2800 \text{ mAh}}{5,2 \text{ A}} = 0,538 \text{ h} \approx 30 \text{ min} \quad (32)$$

Ett problem som kan uppkomma är att batteriet inte kan ge en tillräcklig hög ström. Batteriet är gjort för modellflygplan och har därför en hög maximal urladdningshastighet på 65 C. Beräkningar för batteriets maximala urladdningshastighet görs enligt nedan.

$$1/65 \cdot 60 \text{ min} \approx 55 \text{ s} \quad (33)$$

Givet uppskattad strömåtgång och spänningen på batteriet kan robotens totala teoretiska effekt räknas ut enligt nedan. Även den totala effekten som batteriet kan leverera beräknas nedan givet urladdningshastigheten, batterikapaciteten och batterispänningen (Ekh m. fl., 2015).

$$5,2 \text{ A} \cdot 15,2 \text{ V} = 79,04 \text{ W} \quad (34)$$

$$\frac{2,8 \text{ Ah} \cdot 3600}{55 \text{ s}} \cdot 15,2 \text{ V} = 2785,75 \text{ W} \quad (35)$$

Den maximala urladdningshastigheten för batteriet innebär att batteriet kan laddas ur på 55 s vid maximal effekt, vilket motsvarar en effekt på 2,79 kW. Eftersom att roboten endast kommer kräva en effekt på 79,04 W, vilket motsvarar en urladdningstid på ca 45 minuter av drift, så innebär detta att urladdningshastigheten inte är något problem. Batteriets maximala effekt är alltså med god marginal högt över den behövda effekten. Batteriet har specifikationer enligt Tabell 9. För vidare specifikationer se Appendix C.6.

Tabell 9: Specifikationer för valt batteri

Variabel	Värde	Enhet
Kapacitet	2800	mAh
Spänning	15,2	V
Maximal urladdningshastighet	65	C
Vikt	0,312	kg
Dimensioner	143 x 45,5 x 25	mm

4.2.8 Spänningsregulator

Batteriet ger ut en spänning på 15,2 V, vilket innebär att spänningen behöver regleras till de olika komponenterna i systemet. Motorerna förses med ström från drivkortet och även om de kräver 12 V kommer drivkortet att hantera den konverteringen. Mikrokontrollern behöver en spänning mellan 6-20 V, men fungerar som bäst med en spänning mellan 7-12 V, vilket behöver regleras. De linjära aktuatorerna behöver en spänning mellan 5,7-7 V och detta kan uppnås med en till spänningsregulator.

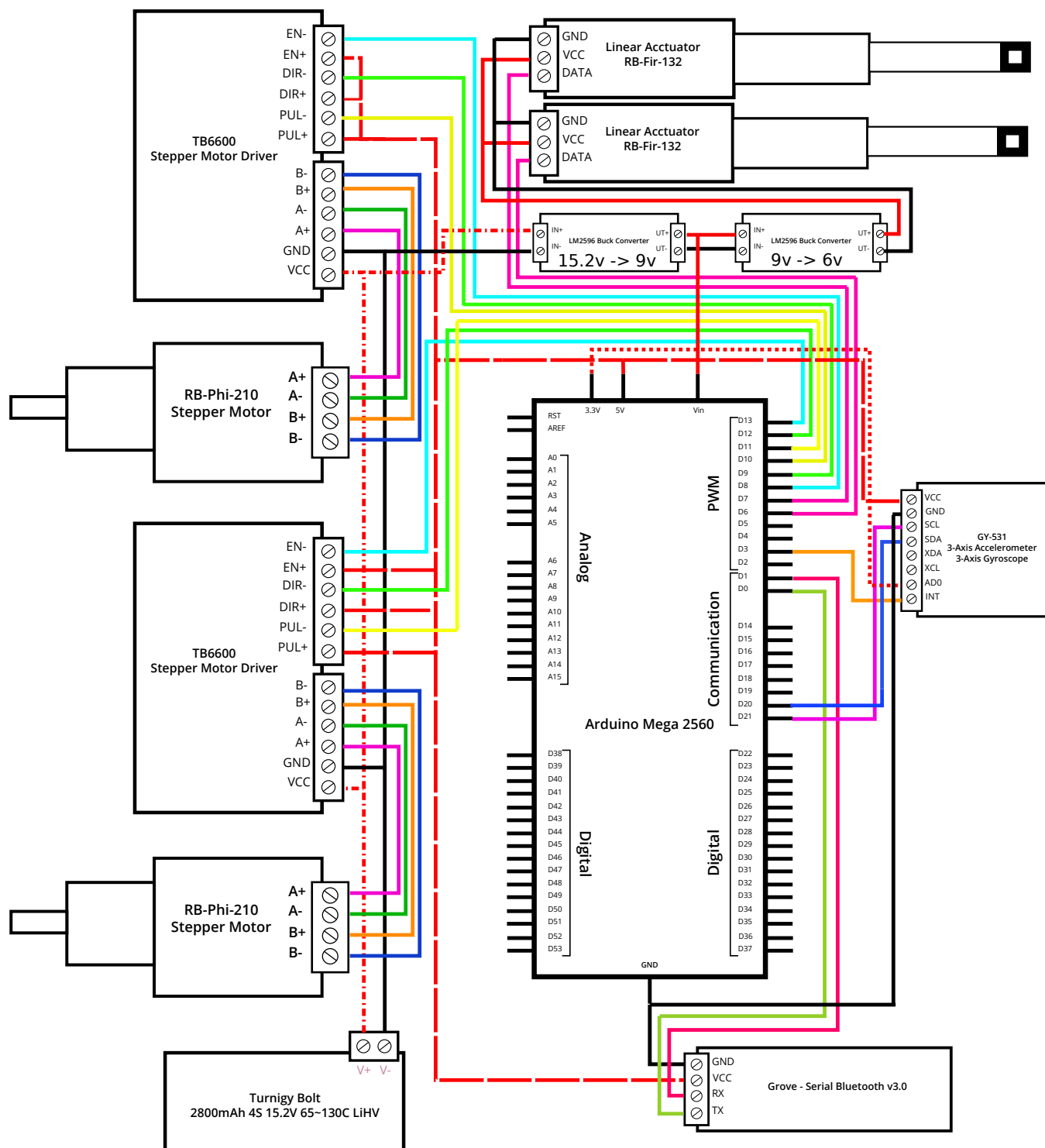
Spänningsregulator som användes var av modell LM2596, Figur 26, och tillhandahölls av Chalmers Robotförening. Fördelen med dessa är att de är ställbara, alltså att de kan ändra utspänningen ifall det skulle vara nödvändigt i framtiden. För specifikationer se Appendix C.7.



Figur 26: Spänningsregulator LM2596 från CRF (KjellCompany, 2018)

4.3 Kopplingsschema

I detta avsnitt förklaras hur hela kretsen kopplas samman. Se Figur 27 för en detaljerad bild av kretsen. I kommande underkapitel redovisas in- och utgående portar för de olika komponenterna.



Figur 27: Bild på hur komponenterna är sammankopplade

4.3.1 Stegmotorer

Stegmotorerna kopplas till drivkorten och styrs med hjälp av spänningskillnader mellan den positiva och den negativa ingången till varje spole i motorn. En översikt av stegmotorernas portar fås i Tabell 10.

Tabell 10: Förklaring av ingångar på stegmotorerna

Ingång	Förklaring
A+	Positiv spänning spole A
A-	Negativ spänning spole B
B+	Positiv spänning spole A
B-	Negativ spänning spole B

4.3.2 Linjära aktuatorer

De linjära aktuatorerna styrs från mikrokontrollern med hjälp av en digital signal och förses med ström direkt från batteriet efter spänningreglering från de två spänningsregulatorerna. En översikt av de linjära aktuatorernas portar fås i Tabell 11.

Tabell 11: Förklaring av ingångar på de linjära aktuatorerna

Ingång	Förklaring
VCC	6 V spänning från batteriet
GND	Jord
DATA	Digital signal för att styra position

4.3.3 Mikrokontroller

Mikrokontrollern agerar som den centrala hjärnan i systemet och det är den som alla andra komponenter är kopplade till. Mikrokontrollern består av en stor mängd olika portar, både digitala och analoga samt portar för strömförsörjning. En översikt över mikrokontrollerns portar får i Tabell 12.

Tabell 12: Förklaring av portar på mikrokontrollern

Port	Förklaring
D0-D53	Digitala portar för att läsa och skriva digitala signaler.
A0-A15	Analoga portar för att läsa och skriva analoga signaler.
3.3V	Utspanning 3,3 V
5V	Utspanning 5 V
Vin	Inspänning för att strömförsörja mikrokontrollern
GND	Jord

4.3.4 Extern kommunikation

Bluetooth-modulen drivs av ström från mikrokontrollern och är även kopplad direkt till mikrokontrollern för att skicka och ta emot data. RX-porten används för att ta emot data från mikrokontrollern för att antingen skicka data på Bluetooth-bandet, eller för att konfigurera Bluetooth-modulen. TX-porten används för att skicka data från Bluetooth-bandet eller Bluetooth-modulen till mikrokontrollern, till exempel data från en styrenhet för att styra i vilken riktning roboten ska gå. Dataportarna kopplas till en av mikrokontrollerns fyra olika seriella bussar. En översikt av Bluetoothmodulens portar fås i Tabell 13.

Tabell 13: Förklaring av ingångar och utgångar på Bluetooth-modulen

Ingång	Förklaring
VCC	5 V spänning från mikrokontrollern
GND	Jord
RX	Receive, används för att ta emot data från mikrokontrollern
Utgång	Förklaring
TX	Transmission, används för att skicka data till mikrokontrollern

4.3.5 Sensorer

Sensorerna är de mest komplicerade komponenterna i roboten och bygger på en teknik där datan från sensorerna skapar avbrott i programmet som körs på mikrokontrollern. När data finns tillgängligt hos sensorn skickas en signal från sensorns INT-port till en port på mikrokontrollern som används för hårdvaruavbrott. Då vet mikrokontrollern att det finns data tillgänglig och läser av datan från sensorns SDA-port. AD0-porten på sensorn används när två olika sensorer används tillsammans med en mikrokontroller som bara har ett gränssnitt för I²C (Inter-Integrated Circuit). Genom att skicka en signal på 3,3 V till AD0-porten sätts sensorns address till 0x68, medan en låg signal (0 V) sätter adressen till 0x69. På detta sätt kan två olika sensorer adresseras på samma gränssnitt. En översikt av sensorns portar fås i Tabell 14.

Tabell 14: Förklaring av ingångar och utgångar på sensorerna

Ingång	Förklaring
VCC	5 V spänning från mikrokontrollern
GND	Jord
SCL	Seriell klocka
AD0	Address
Utgång	Förklaring
SDA	Seriell data
INT	Avbrott

4.3.6 Drivkort för stegmotor

Genom att mikrokontrollern skickar digitala signaler till tre av drivkortets ingångar kan mikrokontrollerna styra om motorerna ska vara på eller bromsande, samt vilken riktning de ska rotera i. Hastigheten på motorerna styrs genom pulsbreddsmodulering och måste skickas från en utport på mikrokontrollern som stödjer denna teknik. De tre andra inportarna på drivkortet kopplas till 5 V porten på mikrokontrollern vilket skapar en spänningsskillnad mellan alla ingångsparen på drivkortet, till exempel EN- och EN+. Utportarna kopplas till motsvarande portar på stegmotorerna. En översikt av drivkortens portar fås i Tabell 15.

Tabell 15: Förklaring av ingångar och utgångar på drivkorten

Ingång	Förklaring
EN+	Off-line Control Enable +
EN-	Off-line Control Enable -
DIR+	Riktning +
DIR-	Riktning -
PUL+	Pulsstyrning +
PUL-	Pulsstyrning -
GND	Jord
VCC	Inspänning från batteri
Utgång	Förklaring
A+	Positiv spänning spole A
A-	Negativ spänning spole B
B+	Positiv spänning spole A
B-	Negativ spänning spole B

4.3.7 Spänningsregulator

För att kunna förse hela systemet med ström från ett och samma batteri behöver spänningen regleras och anpassas till de olika komponenterna. Först kopplas en spänningsregulator till batteriet och reglerar spänningen ner till 9 V som kan användas till mikrokontrollern. Sedan kopplas ytterligare en i serie med den första och reglerar spänningen från 9 V till 6 V som ska driva de linjära aktuatorerna. En översikt av portarna får i Tabell 16.

Tabell 16: Förklaring av ingångar och utgångar på spänningsregleraren

Ingång	Förklaring
IN+	Positiv spänning som ska reglerats
IN-	Negativ spänning som ska reglerats
Utgång	Förklaring
UT+	Positiv spänning som har reglerats
UT-	Negativ spänning som har reglerats

4.4 Byggnadsprocess

De komponenter som behövde byggas skapades i Prototyplaboratoriet efter ritningarna från CAD-modelleringen.

4.4.1 Ram av aluminiumplåt

Med hjälp av CAD-ritningarna kunde tvådimensionella ritningar kompatibla med Prototyplaboratoriets vattenskärare skapas med hjälp av sakkunniga i Prototyplaboratoriet. Totalt skars 22 delar ut från 2 mm aluminiumplåt. Då sidorna av de utskurna plåtarna var vassa, slipades dessa ner något innan de kunde bockas. Bockningen gjordes för hand. Då CAD-ritningen inte överensstämde helt med verkligheten behövde vissa hörn sågas av då de krockade vid bockningen. Detta gav dock inga nämnvärda påföljder.

4.4.2 Axelkoppling

Det tillverkades två stycken identiska axelkopplingar genom att svarva en massiv aluminiumstång till en diameter av 26 mm och längd på 30 mm. Ett hål borrades sedan rakt igenom cylindern med en diameter på 8 mm, där elmotorns axel ska passa. Ännu ett hål borrades från ena sidan med 16 mm i diameter där axeln ska passa, detta hål borrades till ett djup på 15 mm, halvvägs genom axelkopplingen. Med hjälp av fyra stycken hål som borrades i toppen av axelkopplingen som sedan gängades så ska axlarna fixeras mot varann med två stycken skruvar som håller fast vardera axel. Se Appendix B.2 för ritning på axelkoppling och Avsnitt 4.5.1 för validering av konstruktion.

4.4.3 Kullagerhus

Kullagerhuset tillverkades genom att svarva en aluminiumstång till en diameter på 80 mm och tjockleken 12 mm. Ett hål borrades och brotschades¹⁰ i mitten av kullagerhuset som passar kullagret med yttermättet 34 mm med ett visst passningsfel för klämmtryck. En ansats¹¹ gjordes som passade i plåtens hål och fyra hål borrades med fräsmaskin för att kunna fästa kullagerhuset i plåten. Se Appendix B.3 för ritning.

4.4.4 Axelinfästning med Kilförband

Problemet med att fixera axelns rotation i mittenbenet löses genom att använda kilförband. Först designas en hylsa som kan fixeras mot innerchassit. Denna svarvas till korrekt storlek utvändigt och invändigt för att passa med axeln. I hylsan görs ett jack och i axeln görs ett hål där en kil passar in. Genom att föra in kilen mellan dessa låses axeln till chassit i rotationsled och således kan benen röra sig relativt varandra. Se ritning i Appendix B.4.

4.5 Hållfasthetsberäkningar på kritiska komponenter

Detta avsnitt behandlar de hållfasthetsberäkningar som genomfördes på de mekaniska komponenter i roboten som är kritiska för funktionaliteten. Här redovisas handberäkningar i hållfasthet, överväganden i design och konstruktionens robusthet. De komponenter som utvärderas är: axelkoppling, stegmotor och kilförband.

Angående kullagrena som även de anses kritiska räcker hållfasthetsbeskrivningen från tillverkare eftersom att den med god marginal överskrider de uppskattade axiella belastningarna. Kullagrena är dimensionerade till dynamisk bärighet¹² på 8,06 kN (Kullagret.com, 2018), vilket motsvarar en statisk last på ungefär 820 kg.

4.5.1 Axelkoppling

För att möjliggöra överföring av vridmoment från stegmotorerna till robotens axel krävs en koppling, detta för att röra robotens ben i förhållande till varandra. Axelkopplingen är en stel koppling med skruvförband som fixerar axeln genom tryck.

Kopplingen konstrueras i aluminium och kopplar samman två ingående axlar med diametern 8 mm respektive 16 mm och med djupet 15 mm vardera, se Appendix B.2. Det pålagda vridmomentet är stegmotorns maximala praktiska hållmoment vid arbetspunkten på 2,94 Nm som fås från Tabell 5. Vid strömpikar från batteri kan däremot motorns moment enligt tillverkaren, Appendix ??, under en kort stund stiga upp mot 7,7 Nm, $M_{motor,max}$. Eftersom detta moment är det största tänkbara används det i beräkningarna för dimensionering. Vid beräkningarna används också det mindre hålet på 8 mm eftersom detta ger en mindre mantelarea och därmed större krafter vid pålagd last enligt ekvation 36.

De kritiska komponenterna i kopplingen är M4-skruvarna som spänner fast axeln i kopplingen på grund av deras tunna dimensionering. Dessa är tillverkade i legerat stål med sträckgräns¹³, $\sigma_{stål,s}$, 460 MPa och löper störst risk för brott, ty de stora lasterna, se Tabell 17. Samtliga formler presenterade nedan kan hittas i formelsamlingen (Ekh m. fl., 2015).

Ekvationen nedan visar sambandet mellan pålagd kraft, F , kontaktyta, A , och spänning, σ .

$$F = \frac{\sigma}{A} \quad (36)$$

¹⁰Brotsch: skärande verktyg som används för att utrymma hål som ska hålla ett mycket exakt mått med en mycket bra yta

¹¹En utstickande form på lager som har till uppgift att styra komponenten i hål

¹²En belastning av denna storlek ger en säker livslängd på en miljon varv

¹³Sträckgräns: gränslast vid begynnande plasticering

Mantelaren för hålet, $A_{h\grave{a}l}$ beräknas enligt nedan.

$$A_{h\grave{a}l} = \pi \cdot d_{h\grave{a}l} \cdot l_{h\grave{a}l} \quad (37)$$

Följande ekvation visar beräkningen av kontaktytan mellan en M4-skruvs plana yta och axelns avplaning.

$$A_{skruv} = \pi \cdot r_{skruv}^2 \quad (38)$$

Ekvation 39 visar beräkningen av den maximala kraften, $F_{h\grave{a}l,max}$, som uppkommer vid maximalt moment, $M_{motor,max}$, på radien, $r_{h\grave{a}l}$, till följd av strömpikar i motorn. Detta följs av den uppkomna maxspänningen, $\sigma_{h\grave{a}l,max}$, i ekvation 40.

$$F_{h\grave{a}l,max} = \frac{M_{motor,max}}{r_{h\grave{a}l}} \quad (39)$$

$$\sigma_{h\grave{a}l,max} = \frac{F_{h\grave{a}l,max}}{A_{h\grave{a}l}} \quad (40)$$

Vid beräkningarna antas maxspänningen fördelas lika på de två skruvarna enligt nedan.

$$\sigma_{skruv} = \frac{\sigma_{h\grave{a}l,max}}{2} \quad (41)$$

Följande beräkning visar den totala skruvkraften i vardera skruv vid maximalt pålagt moment från motorn.

$$F_{skruv} = \sigma_{skruv} \cdot A_{skruv} \quad (42)$$

Resultaten utifrån ekvation 36-42 redovisas i Tabell 17 och visar att spänningen under maxbelastning, σ_{skruv} , blir mycket mindre än sträckgränsen, $\sigma_{st\grave{a}l,s}$, och skruven är alltså säker att använda. Rekommenderad förspänning för förband kan av tillverkare ofta vara optimerade upp mot 70-75% av sträckgränsen (Mägi & Melkersson, 2012) för att säkerställa funktionsduglighet. I detta fall med de i sammanhanget relativt små belastningarna är det med största sannolikhet nog med en lösare åtdragning.

Tabell 17: Värden på variabler vid beräkningar av hållfasthet på axelkoppling

Storhet	Variabelnamn	Värde	Enhet
Sträckgräns stål	$\sigma_{st\grave{a}l,s}$	460	MPa
Innerdiameter hål	$d_{h\grave{a}l}$	0,008	m
Djup hål	$l_{h\grave{a}l}$	0,015	m
Innerradie hål	$r_{h\grave{a}l}$	0,004	m
Mantelarea hål	$A_{h\grave{a}l}$	377	mm ²
Tvärsnittsytas skruv	A_{skruv}	12,6	mm ²
Maximalt vridmoment	$M_{motor,max}$	7,7	Nm
Maximal kraft	$F_{h\grave{a}l,max}$	1925	N
Maximal spänning	$\sigma_{h\grave{a}l,max}$	5,1	MPa
Spänning skruv	σ_{skruv}	2,55	MPa
Förspänning skruv	F_{skruv}	32,1	N

4.5.2 Stegmotorer

Stegmotorerna är bland de viktigaste komponenterna i systemet eftersom det är de som möjliggör rörelse. Det är alltså viktigt att motorn inte utsätts för större belastningar än vad tillverkaren rekommenderar eftersom att det innebär långa ledtider och stora kostnader med att få en ny. Risker med för höga belastningar kan resultera i att motorn hoppar över steg och får nedsatt precision samt att den kan vridas sönder. Störst risk löper växellådan som förstörs vid allt för stora radiella eller axiella krafter.

Rekommenderad maxlast från tillverkaren är axiellt på 49,1 N och radiellt på 98,1 N, se Appendix C.1. Detta motsvarar tyngder av 5 kg respektive 10 kg.

Den speciellt överlagda konstruktionen av roboten hindrar motorn från att någonsin utsättas för belastningar av dessa magnituder. Designen förutsätter att kullagerhuset tillsammans med kilspårförbandet fixerar axeln radiellt och tar upp dess laster. Axiellt fixerar axelns mellanliggande låsringar all sidrörelse och därmed minimerar eventuell förskjutning. Genom att konstruera på detta sätt krävs det i sammanhanget mycket stora laster för att deformera och förskjuta komponenter så pass mycket att motorn överbelastas.

4.5.3 Kilförband

Kilförbandets funktion är att fixera robotens axeln i innerbenet, se Appendix B.4. Den är tillverkad i svensk standardaluminium¹⁴ med en sträckgräns, $\sigma_{aluminium,s}$, på cirka 190 MPa och ska absorbera momentet som krävs för att fixera axeln och innerbenet stillastående relativt varandra. Förbandet och axeln fixeras genom en inklämd kil i motsvarande komponents spår. Det kritiska med denna komponent är att spåret på vadera del kan plasticeras vid uppnådd sträckgräns eller att kilen av stål kan klippas av. Sidan som riskerar plasticera först är sidan mot aluminiumförbandet, se återigen Appendix B.4, eftersom den har lägre sträckgräns än stål och utsätts för större vridmoment på grund av det längre avståndet, $r_{häv}$, från axelns rotationspunkt enligt ekvation 44.

Ekvation 43 visar den kraft, $F_{kil,s}$, vid begynnande plasticering. A_{kil} är den kontaktytan på vilket kilen i axeln trycker på förbandet.

$$F_{kil,s} = \sigma_{aluminium,s} \cdot A_{kil} \quad (43)$$

Ekvation 44 visar det moment $M_{kil,s}$ vid begynnande plasticering, där, $r_{häv}$, är det maximala avståndet från axelns centrum på vilket kraften verkar.

$$M_{kil,s} = F_{kil,s} \cdot r_{häv} \quad (44)$$

Som presenteras av beräkningarna i Tabell 18 motstår förbandet krafter upp mot 8770 N utan att plasticeras. Detta överskrider vida robotens behov med en säkerhet på upp mot faktor 20.

Tabell 18: Värden på variabler vid beräkningar av hållfasthet på kilförband

Storhet	Variabel	Värde	Enhet
Sträckgräns aluminium	$\sigma_{aluminium,s}$	190	MPa
Kontaktyta	A_{kil}	24	mm ²
Maximal hävarm	$r_{häv}$	9	mm
Maximal kraft	$F_{kil,s}$	8770	N
Maximalt moment	$M_{kil,s}$	79	Nm

4.6 Mjukvaruutveckling

Vid framtagningen av mjukvaran för LARS fanns det tre delar som var viktig att ta hänsyn till. Dessa var hur motorerna styrs, hur de linjära aktuatorerna styrs och hur LARS ska kommuniceras med trådlöst. Då det inte sågs möjligt att hinna implementera någon form av reglering på själva roboten, har gången som LARS ska utföra blivit hårdkodad till mikrokontrollern och följer en tidsbestämd slinga som exekverar förbestämd programkod i serie.

Mjukvaran är utvecklad med hjälp av utvecklingsverktyget Arduino IDE (Inc., 2017) samt med hjälp av standardbibliotek från Arduino. Mjukvara specifikt anpassad till olika komponenter är försedd av återförsäljaren av komponenterna och därefter anpassad för att passa LARS.

De två stegmotorerna som används styrs av två stycken drivkort, se Avsnitt 4.2.6, som skickar digitala signaler till motorerna. För varje steg som LARS tar skickas en mängd digitala pulssignaler från mikrokontrollern till drivkortet. Drivkortens *micro steps*-funktion används och är inställd

¹⁴Aluminiumlegering 5754 H111

på 16, vilket innebär att varje steg för motorn är uppdelat i 16 lika små steg och för att motorn ska rotera x antal steg behöver x*16 pulser skickas till Drivkorten för varje iteration. Eftersom ytterbenen agerar som ett ben och de rör sig parallellt med varandra skickas samma mängd pulser till båda motorerna. Dock är LARS uppbyggd på sådant sätt att vad som är en riktning för ena motorn är motsatt riktning för den andra, och riktningen på de olika motorerna behöver alterneras. Nedan följer ett kodavsnitt som visar hur mikrokontrollen styr stegmotorerna och får LARS att ta ett steg.

```
for (int i=0; i<stepLength; i++) // This for-loop runs for each step
{
    digitalWrite(DIR,LOW); //Set the direction for one motor
    digitalWrite(DIR2,HIGH); //Set the opposite direction
                             //of the other motor
    digitalWrite(PUL,HIGH); // Start sending a pulsesignal
                             //to one of the motors
    digitalWrite(PUL2,HIGH);
    delayMicroseconds(50); //Delay of 50 ms to create signal
    digitalWrite(PUL,LOW); //Stop sending pulsesignal
    digitalWrite(PUL2,LOW);
    delayMicroseconds(50);
}
```

De linjära aktuatorerna styrs som servomotorer och är relativt enkla att styra. Vid mjukvaruutvecklingen var det extra viktigt vilka olika värden som skulle skickas till de linjära aktuatorerna för att skapa frihöjd mellan de olika benen. Eftersom stegmotorerna rör sig klart snabbare än vad de linjära aktuatorerna gör är det vitalt att frihöjden är hög nog för att fötterna inte ska ta emot i marken när benen rör på sig, men inte heller för hög att gången påverkas av att den nya positionen inte har nåtts i tid. Nedan visas ett kodavsnitt som först sätter ytterbenen fria och sedan sätter mittbenet fritt i luften genom att skicka olika förbestämda värden till de linjära aktuatorerna.

```
LinAktu.write(posIn);
LinAktu2.write(posIn);
delay(3000);
LinAktu.write(posOut);
LinAktu2.write(posOut);
```

Den trådlösa styrningen implementerad på LARS är relativt enkel och baseras på den redan utvecklade mobila applikation LED Controller (Girish, u. å.). I mjukvaran skapas en seriell kommunikation mellan mikrokontrollern och Bluetooth-modulen där flödet av data går från applikationen till Bluetooth-modulen och sedan till mikrokontrollern. Mjukvaran väntar tills det finns data tillgänglig för att läsa från Bluetooth-modulen, läser sedan datan och beroende på datans värde tar roboten ett steg eller gör ingenting. Om siffran "1" skickas kommer programmets huvudslinga kalla på funktionen *walk* som flyttar LARS ett steg framåt, annars ligger huvudslingan kvar och väntar på nästa kommando. Nedan följer huvudslingan för programmet.

```
void loop() {
    if(Serial.available() > 0) // If data is available
    {
        data = Serial.read(); //Read incoming data
        if(data == '1'){
            walk();
        }
    }
}
```

Fullständigt programkod finns i Appendix D.

5 Reglering

För att roboten inte ska ramla krävs det att den rör sig på ett sätt som är säkert. Genom att skapa en modell av roboten kan det förutspås vad som kommer hända med roboten i en viss situation och motverka ett potentiellt fall. I detta kapitel visas hur en modell skapas anpassad för LARS.

5.1 Tyngdpunkt och tröghetsmoment

För att räkna ut tyngdpunktens placering används ekvation 2 som beskrivs i Avsnitt 2.1.1. Massorna för robotens olika komponenter fås från Tabell 2, 5, 6 och 9. Resterande elektriska komponenters massor försummas då dessas placering går att förflytta samt massorna är relativt små. Massorna fördelades på de olika höjderna beskrivna i Figur 5 med värden från Tabell 3, för att bestämma tyngdpunkterna för tillståndet då fötterna på ytterbenen är halft utsträckta, då de är lika långa som innerbenet, vilket sammanställs i Tabell 19.

Tabell 19: Massfördelningen i inner- respektive ytterbenen. I kolumn 1 redovisas placering i höjddel med botten som utgångspunkt. I kolumn 2 och 3 redovisas vilka komponenter som bidrar till den totala massan på den relaterade placeringen, samt denna placerings massa.

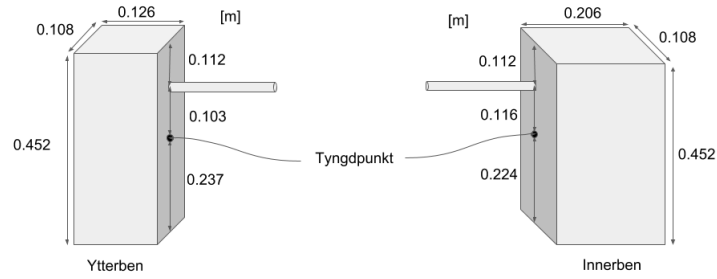
	Innerben	Ytterben
Högst upp (452mm)	Toppdel $m_{i,u} = 0,057$ kg	Toppdel $m_{y,u} = 0,040$ kg
Axel (340 mm)	Axel, Kilförband, Axelkoppling, Kullager $m_{i,a} = 0,696$ kg	Motor, Motorfäste, Kullagerhus $m_{y,a} = 0,682$ kg
Mitten (227 mm)	Framsida, Baksida, Vänster sida, Höger sida, $m_{i,m} = 1,096$ kg	Framsida, Baksida, Vänster sida, Höger sida $m_{y,m} = 0,717$ kg
Botten (0 mm)	Botten, Batteri, $m_{i,b} = 0,431$ kg	Botten, Aktuator, Aktuatorstång $m_{y,b} = 0,302$ kg
Total vikt	$m_{i,tot} = 2,280$ kg	$m_{y,tot} = 1,741$ kg

De totala massorna blir således $m_{i,tot} = 2,280$ kg för innerbenet och $m_{y,tot} = 1,741$ kg för ett ytterben. Genom att använda massfördelning som redovisas i tabellen ovan och ekvation 2 fås att tyngdpunkten för innerbenet ligger 224 mm från robotens botten. Ytterbenets tyngdpunkt med fot ligger 237 mm över botten. Detta innebär att hela robotens tyngdpunkt ligger 232 mm över robotens botten vilket motsvarar 108 mm under robotens axel och ungefär vid halva robotens höjd. Värdena på tyngdpunkterna samlas i Tabell 20.

Tabell 20: Tyngdpunktens placering i inner- och ytterben samt hela roboten

Mått	Variabelnamn	Längd [m]
Längd till tyngdpunkt från marken, innerben	$l_{i,c}$	0,224
Längd till tyngdpunkt från marken, ytterben	$l_{y,c}$	0,237
Längd till tyngdpunkt från marken, hela roboten	$l_{tot,c}$	0,232

Ekvationer 20 och 21 från Avsnitt 2.2.3 och Figur 28 användes för att beräkna tröghetsmomentet för ytterben och innerben med robotens axel som referensaxel. Resultaten redovisas i Tabell 21.



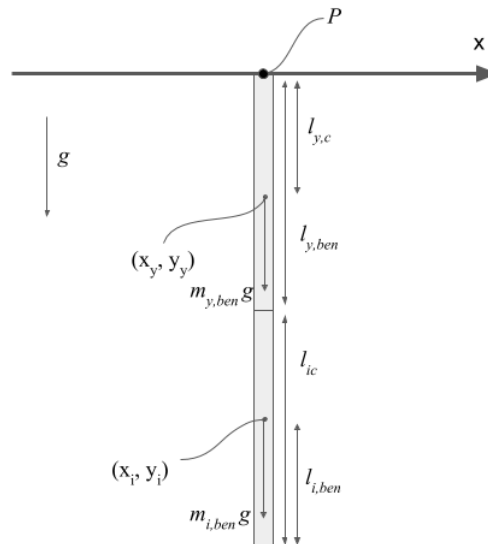
Figur 28: Visualiserade mått på ytterben och innerben inklusive placering av tyngdpunkten

Tabell 21: Beräknade tröghetmoment med robotensaxel som referensaxel

Mått	Variabelnamn	Värde (kgm^2)
Tröghetmoment, innerben	J_i	0,078
Tröghetmoment, ytterben	J_y	0,050

5.2 Simulering och reglering av roboten

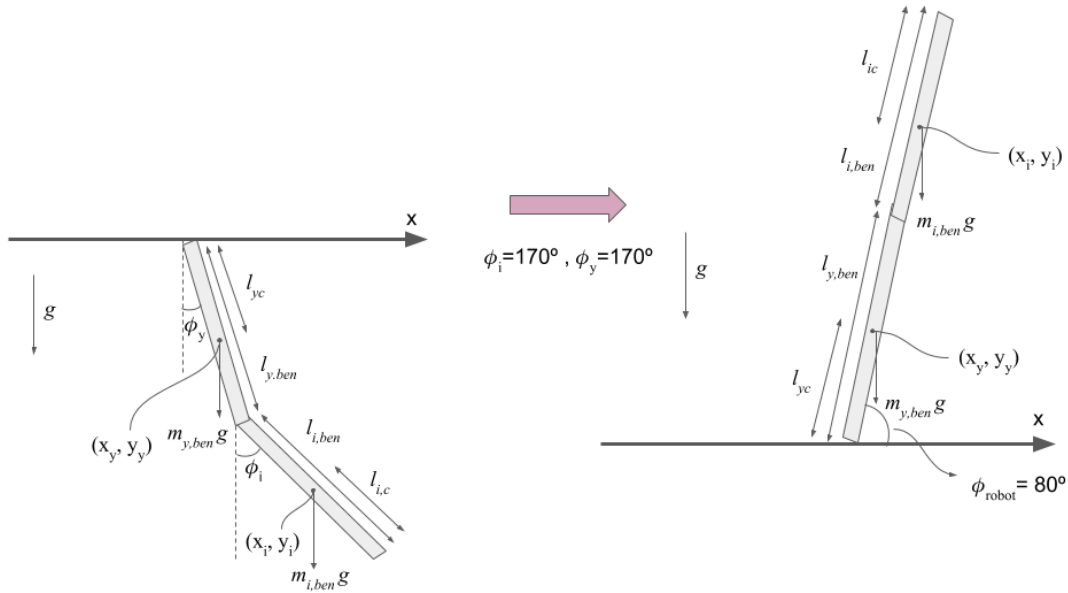
Den matematiska modellen som beskrivs av ekvation 18 och 19 anpassas till LARS genom att de bägge ytterbenen ses som en pendel, index 1 byts till y , och innerbenet ses som den andra pendeln, index 2 byts till i . Modellen simuleras i Simulink (MathWorks, Vilket år släptes versionen?) enligt flödesschemat i Appendix F.1, som byggdes upp av en modell för en inverterad dubbelpendel enligt rapporten *Control of Double Inverted Pendulum First Approach* (Dareini & Dabreteau, 2015). Modellen är vridbar runt punkten P, se Figur 29.



Figur 29: Modell av robotens ytter- och innerben för simuleringen utan begynnelsevillkor eller påverkan av andra krafter än gravitationen

För att simuleringen skulle vara realistisk behövde friktionen mellan robotens ytterben och rotationspunkten samt friktionen mellan ytterbenet och innerbenet tas hänsyn till. Friktionen mellan innerbenet och ytterben kommer främst vara i kullagret samt motorn som sitter mellan benen. Friktionen som togs hänsyn till var viskös friktion och Coulombfriktion. Den viskösa friktionen är beroende av hastigheten medan Coulombfriktionen är konstant. De båda sorternas friktion togs med, då en ledare som rör sig i ett magnetfält, vilket händer i motorn, kan liknas vid viskös friktion då båda är beroende av hastigheten. Coulombfriktionen uppkommer från olika sorters lager i roboten.

För att modellen ska starta från en lutad position i simuleringen sätts begynnelsevillkoren för vinklarna till robotens ben. Begynnelsevillkoren var nödvändiga då ekvationerna för den mekaniska modellen utan begynnelsevillkor hade sin startpunkt när systemet hängde fritt i luften, se Figur 29. Roboten utan reglering simulerades i en position där den hade en lutning relativt marken, $\phi_{robot} = 80^\circ$, vilket motsvarar att begynnelsevillkoren för ytterbenen och innerbenet var $\phi_y = 170^\circ$ respektive $\phi_i = 170^\circ$, se Figur 30.



Figur 30: Grafisk demonstration av robotens startposition i simuleringen när vinklarna sätts till $\phi_y = 170^\circ$ respektive $\phi_i = 170^\circ$

Till den mekaniska modellen skapades en regulator med en LQR-funktion i MATLAB (MathWorks, 2017). LQR står för Linear Quadratic Regulator och är en optimal återkopplingsregulator som används för att minimera kostnaderna¹⁵ för systemet. Det system som ska regleras beskrivs som ett linjärt system

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (45)$$

och kostnaden, C , som en kvadratisk funktion, även kallade LQ-problemet,

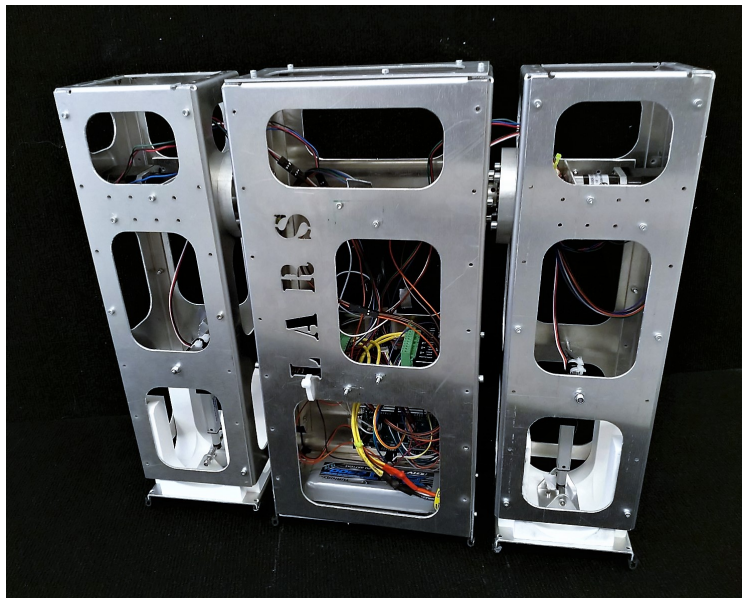
$$C = \frac{1}{2} \int_0^\infty (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (46)$$

I simuleringen sattes R -värdet till en konstant medan Q -värdet modifierades. Q -värdet påverkade tiden det tog för regulatorn att stabilisera systemet, samt kostnaden för att stabilisera systemet. Då roboten är ett olinjärt system var det tvunget att linjäriseras för att LQR skulle kunna användas. Linjärisering gjordes i MATLAB med funktionen *linearize*, se Appendix E.1.

¹⁵Kostnader: innebär framförallt systemets energiförbrukning

6 Resultat

Kapitlet presenterar resultat från projektet. Verifieringen och utvärderingen är gjord utifrån syftesformuleringen och den funktionsbaserade kravspecifikationen i Kapitel 1. Nedan visas en bild på den slutgiltiga fysiska roboten.



Figur 31: Slutgiltig fysisk robot

Figur 32 visar den utvidgade funktionsbaserade kravspecifikationen med resultat från verifieringstester och kommentarer om måluppfyllnad. Avsnitt 6.1-6.3 beskriver utförandet och resultaten av verifieringsprocessen mer i detalj. Avsnitt 6.4 kontrollerar dimensioneringen av ställdon, Avsnitt 6.5 redovisar resultaten från utvecklingen av reglersystemet och budgeten presenteras i Avsnitt 6.6.

Utvidgad funktionsbaserad kravspecifikation			LARS - Gestaltning och konstruktion av en robot inspirerad av TARS från filmen Interstellar							
Utfärdad av: EENX15-18-89	Skapad: 2018-03-22									
	Modifierad: 2018-05-08	Funktioner	Storhet	Enhet	Mål- värde	Referens	Verifierings- metod	Krav och önskelmål	Resultat	Uppfyllnad av mål
1.	Huvudfunktion									
	1.1	Förflytta sig framåt	Sträcka	m	5	Nikolce Murgovski	Test	K	0,4	Nej
	1.2	Efterlikna TARS	Andel	%	50	Nikolce Murgovski	Enkät	Ö	70	Ja
	1.3	Styras trådlöst	-	Ja/Nej	Ja	Nikolce Murgovski	Test	K	Ja	Ja
2.	Tilläggsfunktioner									
	2.1	Tilltala användaren estetiskt	Andel	%	75	EENX15-18-89	Enkät	Ö	60	Nej
	2.2	Medge montering	-	Ja/Nej	Ja	EENX15-18-89	Utvärdering	Ö	Ja	Ja
	2.3	Medge demontering	-	Ja/Nej	Ja	EENX15-18-89	Utvärdering	Ö	Ja	Ja
	2.4	Tillåta underhåll	Andel	%	75	EENX15-18-89	Utvärdering	Ö	100	Ja
	2.5	Inneha säkerhetsfunktion	-	Ja/Nej	Ja	EENX15-18-89	Test	Ö	-	Nej
3.	Stödfunktioner									
	3.1	Återuppfå balans	-	Ja/Nej	Ja	EENX15-18-89	Test	K	-	Nej
	3.2	Fixera benpar	Antal	St	1	Nikolce Murgovski	Test	Ö	1	Ja
	3.3	Försörjas med drivmedel	Effekt	kW	1	EENX15-18-89	Beräkning	K	2,79	Ja
4.	Önskade funktioner									
	4.1	Orsaka egenvållad skada	-	Ja/Nej	Nej	EENX15-18-89	Utvärdering	Ö	Ja	Nej
	4.2	Orsaka omgivning skada	-	Ja/Nej	Nej	EENX15-18-89	Utvärdering	Ö	Nej	Ja
	4.3	Skapa ljud	Ljudvolym	dB	50	EENX15-18-89	Enkät	Ö	46,1	Ja
	4.4	Förbruka drivmedel	Effekt	W	500	EENX15-18-89	Beräkning	Ö	86.64	Ja

Figur 32: Utvidgad funktionsbaserad kravspecifikation

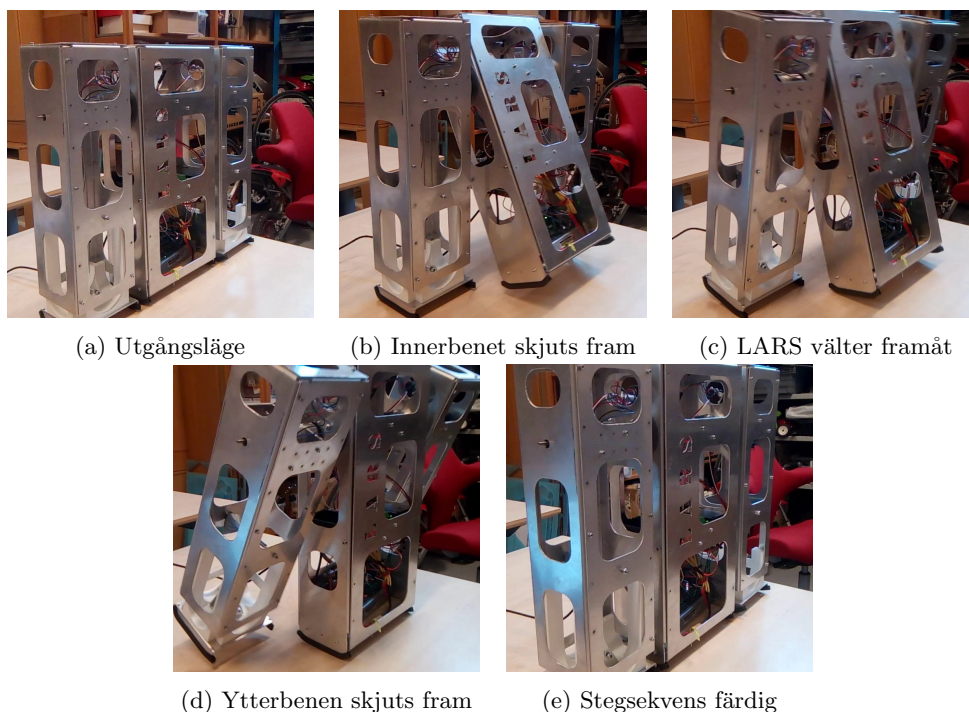
6.1 LARS egenskaper och fysiska tester

Den slutgiltiga konstruktionen av LARS består av tre delar där samtliga är konstruerade av aluminium: två identiska ytterben och ett bredare innerben. Ytterbenen har dimensionerna 108 x 126 x 427-477 mm och är försedda med varsin fot, tillverkade av två avrundade gummiförsedda skenor i aluminium som är i kontakt med marken och en 3D-skriven del i plast som har för uppgift att leda foten in i benet. Ett ytterben inklusive alla komponenter förutom kablar och skruvar inplacerade beräknades teoretiskt väga 1,741 kg, se Tabell 19. Innerbenet har dimensionerna 108 x 206 x 452 mm och dess totala vikt inklusive komponenter förutom mikrokontroller, sensorer, drivkort, kablar och skruvar inplacerade beräknas teoretiskt väga 2,280 kg. Den totala beräknade teoretiska vikten för hela roboten är då 5,762 kg, medan den verkliga uppmätta vikten är 6,636 kg.

Tyngdpunkten är placerad 232 mm över innerbenets nederkant, vilket är precis ovanför mitten i höjddled. Placeringen medför att LARS kan hamna i en lutning ϕ_{krit} på 9,545 grader framåt eller bakåt och fortfarande återgå till stabilt upprätt läge. För större lutningsvinkel krävs en lägre tyngdpunkt eller en bredare kontaktyta, se ekvation 1.

LARS stabilitet ges från dess stora fötter tillsammans med den låga placering av tyngdpunkten. Stabiliteten hade kunnat förbättras med implementationen av ett reglersystem men det fanns tyvärr inte tillräckligt med tid för detta. Ett reglersystem för stillastående tillstånd är redo att implementeras och testas, mer om detta i Avsnitt 6.5.

Det implementerade rörelsemönstret i LARS gång, se Figur 33, är en variant av det som beskrivs som Kong-walk i Avsnitt 2.1.2. Skillnaden mellan det beskrivna Kong-walk och LARS gång är att LARS börjar gå genom att rotera innerbenet framåt istället för ytterbenen, eftersom innerbenets tyngdpunkt ger upphov till en större rörelsemängd. En stegsekvens för LARS motsvarar endast fas 6-8 i Kong-walk¹⁶ och med tanke på att roboten endast har ett innerben är detta gångsättet det enda möjliga av de tre gångstilarna som presenteras.



Figur 33: LARS stegsekvens

¹⁶se Kong-walk i Figur 6, Avsnitt 2.1.2

Enligt den funktionsbaserade kravspecifikationen, se Figur 3, sattes önskemål att ljudnivån inte fick överskrida 50 dB, vilket motsvarar ett normalt samtal mellan två personer. Med test av ljudmätare på en iPhone 5c i appen Buller (Arbetsmiljöverket, 2016) mättes den genomsnittliga ljudnivån till cirka 46 dB vilket precis understiger de satta önskemålet.

Den funktionsbaserade kravspecifikationen ställer önskemål på fixering av benpar. Detta önskemål blev uppfyllt i och med att de båda ytterbenen kan fixeras till varandra och innerbenet med hjälp av de båda stegmotorerna förutsatt att ström finns att tillgå. Motorerna kan motverka rotation upp till sitt hållmoment på 2,94 Nm, se mer om stegmotorn i Tabell 5.

Vid de fysiska testerna lyckades LARS endast gå två stegsekvenser med hjälp av trådlös styrning och därmed fullbordades inte det tilltänkta bantestet på 5 m. Stegen var då ungefär 0,2 m vardera. Stegcykeln tog cirka tre sekunder vilket ger roboten den teoretiska horisontella hastigheten 0,067 m/s. De linjära aktuatorerna som har till uppgift att lyfta roboten under gång hade en genomsnittlig hastighet på 12,5 mm/s. Genom att dra ut ytterbenen så att LARS endast står på ytterbenen och sedan rotera dem åt varsitt håll kan LARS även svänga.

Den effektiva batteritiden uppmättes till 30 minuter vilket är samma som det teoretiska, se Avsnitt 4.2.7. Detta är förvånande då den teoretiska förutsatte att maximal ström drogs under hela tiden, vilket det inte görs i verkligheten.

Ytterligare två tester var planerade och nämns i Avsnitt 1.6.1, ett som testar hur väl LARS kan balansera och ett som testar hur en säkerhetsfunktion fungerar. Balanstestet skulle utgå från att roboten under gång ska kunna balansera sig vid mindre yttre störningar och testa om detta är sant, att roboten kan fortsätta gå kontinuerligt och hålla balansen. Då ett reglersystem inte har implementerats och någon kontinuerlig gång inte heller har blivit lyckat har detta test inte utförts. Den säkerhetsfunktion som planerades att implementeras var att stänga av all LARS elektronik vid ett fall som den inte kan stabilisera. Då tiden inte räckte till implementerades inte denna funktion.

En sammanställning av data på LARS egenskaper och resultat från de fysiska testerna presenteras i Tabell 22.

Tabell 22: Data över LARS egenskaper och resultat från fysiska tester

LARS egenskaper	
Dimension ytterben	108 x 126 x 427-477 mm
Massa ytterben	1,741 kg
Dimension innerben	108 x 206 x 452 mm
Massa innerben	2,280 kg
Preliminär teoretisk massa	5,762 kg
Total massa	6,636 kg
Tyngdpunkt ¹⁷	232 mm
Största stabila lutning ϕ_{krit} ¹⁸	9,545°
Resultat från fysiska tester	
Medelljudnivå	46 dB
Horisontell hastighet	0,067 m/s
Horisontell steglängd	0,200 m
Effektiv batteritid	30 min
Hastighet linjär aktuator ¹⁹	12,5 mm/s
Antal stegcykler	2 st
Balanstest	Ej utfört
Säkerhetsfunktion	Ej utfört

¹⁷Räknat från innerbenets nederkant

¹⁸Se ekvation 1

¹⁹Beräknat vid gång i belastat tillstånd

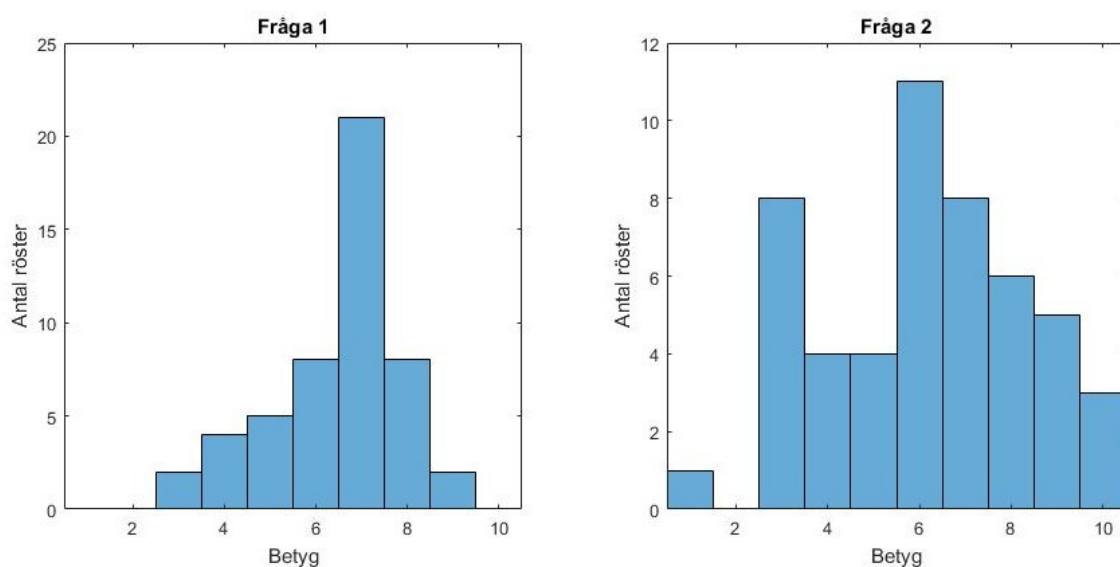
6.2 Enkätundersökning

50 personer svarade på enkäten som gjordes för att mäta och verifiera estetiken och LARS uppfyllande av målet att efterlikna TARS från *Interstellar*. Denna verifieringsmetod är helt och hållet subjektiv och kvantitativ i dess utförande. Hela enkäten finns bifogad i Appendix G. Enkäten hade två bilder: #1 som visade en bild på LARS och #2 som visade en bild på roboten TARS från filmen. Frågorna i enkäten löd:

Fråga 1 - "Hur mycket liknar #1 och #2 varann enligt dig?"

Fråga 2 - "Hur estetisk tilltalande är #1 enligt dig?"

Medianen för svaren på Fråga 1 och Fråga 2 är 7 respektive 6 på en skala från 1-10. Något som är intressant och till fördel för validiteten hos undersökningen är att svaren är sånär jämt fördelade kring medianen, se Figur 34, vilket tyder på en konsensus kring deltagandes åsikter om betyg av estetik och liknelse. Anomalier i betyg är få och påverkar inte resultatet märkvärt.



Figur 34: Histogram över svaren från enkäten

6.3 Teoretisk utvärdering

Detta delkapitel hanterar de resultat som saknar konkret mätmetod och analyserar istället hur de olika områdena upplevs.

6.3.1 Skaderisk

Om LARS skulle falla oförhindrat finns det en stor risk att något skulle skadas inuti. Många kretskort sitter på ett sätt så de lätt skadas vid en stöt. Eftersom roboten väger ca 6,6 kg och är konstruerad i aluminiumplåt finns det en risk att den skadar något i omgivningen vid okontrollerad rörelse eller att roboten faller på något ömtåligt. Det finns ingen större risk för skada om någon kläms mellan robotens ben, då motorerna varken är tillräckligt starka eller kanterna på roboten är tillräckligt vassa för att kunna skada någon. Ifall roboten roterar ett ben över 360 grader finns det en risk att kablar tvinnas och rycker ur komponenterna i LARS.

6.3.2 Montering, demontering och underhåll

Tack vare lätthålen som finns på robotens utsidor är det lätt att komma åt komponenterna inuti LARS. På grund av LARS relativt små dimensioner är det svårt att nå med händerna överallt

inuti LARS medan roboten är intakt. Genom att skruva bort ett par skruvar kan dock ena sidan tas bort och då är allt lättåtkomligt.

Många delar på roboten är beroende av varandra och det är därför viktigt att delarna monteras i rätt ordning. Detta innebär ofta att många delar behöver demonteras om en vital bit behöver plockas bort. Till exempel, om axeln behöver bytas ut behövs nästan alla andra delar monteras isär. Robotens chassi är sammanfogat med hjälp av skruvar och låsmuttrar och därmed inga permanenta infästningar. Detta innebär att roboten är flexibel vid demontering och underhåll samt möjliggör vidareutveckling och påbyggnad.

6.3.3 Batteriförsöjning

Krav och önskemål från den funktionsbaserade kravspecifikationen, se Figur 3, är att roboten skulle ha möjlighet att förbruka upp till 500 W och att batteriet skulle ha en effektkapacitet på 1 kW. Anledning till att kravet på batteriet är högre än resultatet är att skapa en säkerhetsmarginal mellan förbrukning och maxkapacitet ifall något behov justeras under arbetets gång, marginalen är faktor 2. Resultatet av LARS effektförbrukning och kapacitet har benämnts närmre i Avsnitt 4.2.7 och ger en medelförbrukning på ca 79 W och batteriets effektkapacitet på 2,8 kW. Detta uppfyller de ställda kraven med stor marginal.

6.4 Dimensioneringskontroll av ställdon

När de slutliga masscentrumen och robotens vikter blev kända gick det att kontrollera att motorerna är korrekt dimensionerade. Detta görs exempelvis genom att återigen använda friläggningen för benet i 90°, det vill säga ekvation 26 och 27. Uppställningen för de olika benen görs med vikterna och måtten från Tabell 19 och Tabell 20. För innerbenet fås:

$$M_{motor} \approx 2,500 \text{ Nm} \quad (47)$$

och för ytterbenet erhålls istället:

$$M_{motor} \approx 1,249 \text{ Nm} \quad (48)$$

Slutsatsen blev alltså att motorerna klarade belastningen med ännu bättre marginal än vad som fastställdes i Avsnitt 4.2.1 då det begränsande momentet på 2,500 Nm är avsevärt mindre än det preliminära momentet på 3,156 Nm.

Kontroll av aktuatorerna skedde på liknande sätt genom att använda ekvation 30 med de uppdaterade massorna från Tabell 19. Detta ger

$$F_{lyft} = 28,29 \text{ N} \quad (49)$$

Alltså finns det fortfarande väldigt stor marginal för vad aktuatorerna orkar bära. Det verkliga värdet skiljer sig inte nämnvärt från det tidigare beräknade värdet 31,67 N, vilket ger möjlighet till vidareutveckling och tillägg i framtida projekt.

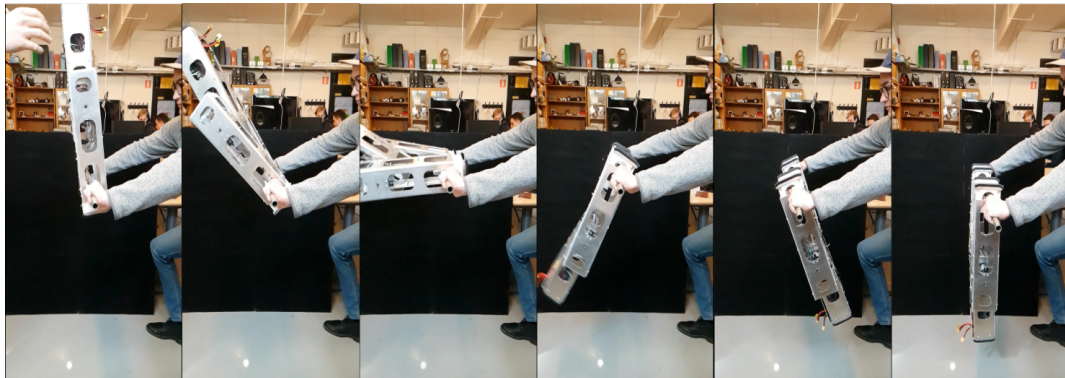
6.5 Reglering

Detta delkapitel hanterar det fysiska test som gjordes på LARS för att likna roboten vid en dubbelpendel och simuleringar av LARS utan respektive med reglerande system.

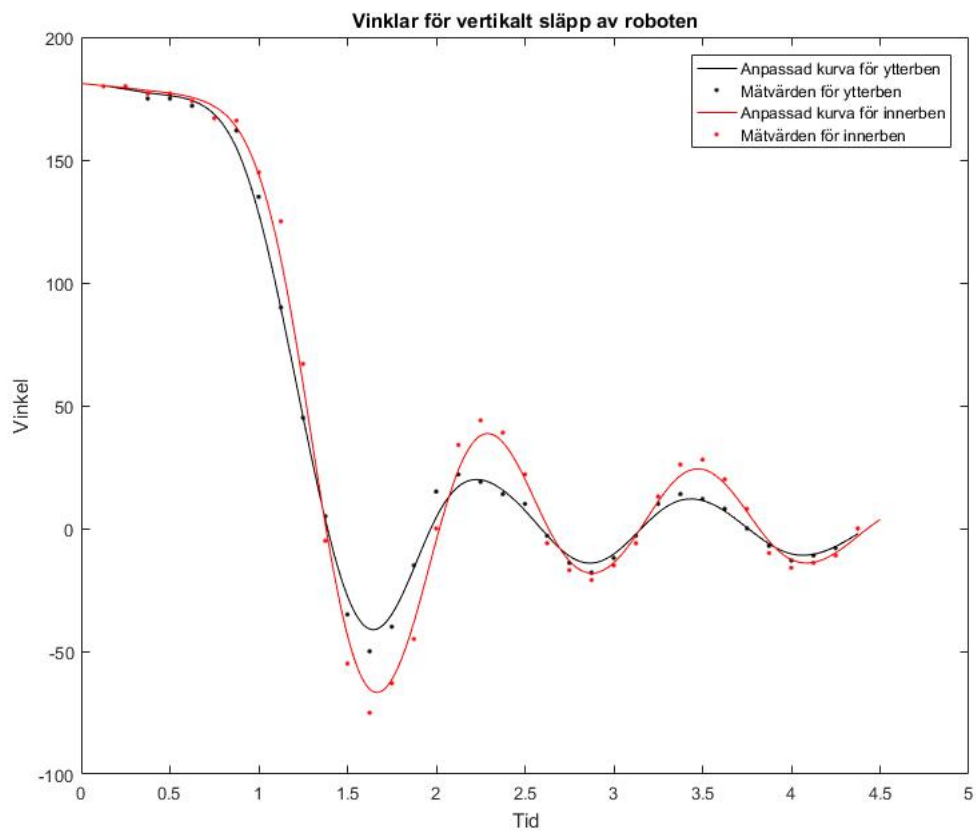
6.5.1 Fysisk test av LARS som dubbelpendel

Ett fysiskt test utfördes för att se hur LARS beter sig som en dubbelpendel. Det fysiska testet genomfördes genom att en stång trädde genom LARS ytterben, på en höjd så långt ner som möjligt. Hela LARS hölls sedan upp och ner så att benen var utsträckta och upp och ner. LARS släpptes så att LARS slungades ner, se Figur 35. Processen filmades och vinklarna ur filmen användes för att få fram Figur 36. Grafen visar hur vinkeln för innerbenet och vinkeln för ytterbenen beror av tiden. Två kurvor anpassades till mätpunkterna. Kurvorna fortsatte att oscillera ett par

perioder utanför grafen som visas innan de stabiliserades vid 0 graders vinkel. Det fysiska testet användes för att uppskatta de verkliga friktionerna.



Figur 35: Bilder från det fysiska testet av LARS som dubbelpendel

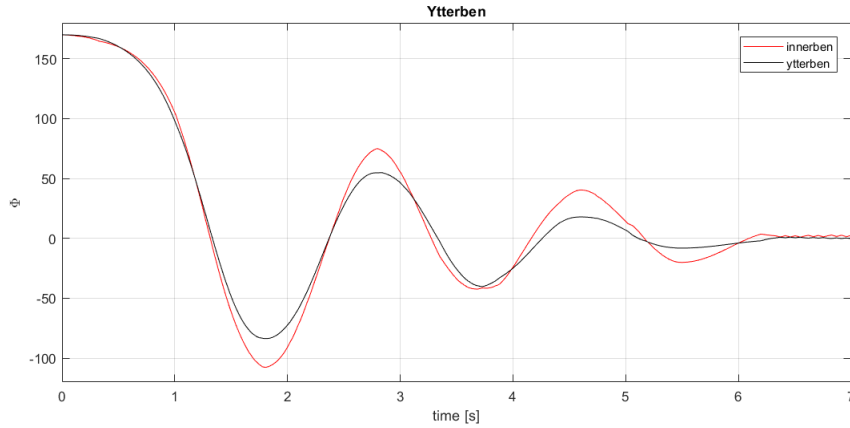


Figur 36: Fall för hela roboten, vinkel beroende av tiden

6.5.2 Simulering utan reglering

Då simuleringens modellen av roboten var fritt upphängd innebar det att benen var roterbara runt en punkt samt inte hade någon yta som kunde hindra fallet. Hur benens vinklar ändras efter att robotens släpps vid 170° relativt gravitationsvektorn, g i Figur 29, visas i Figur 37, där den svarta

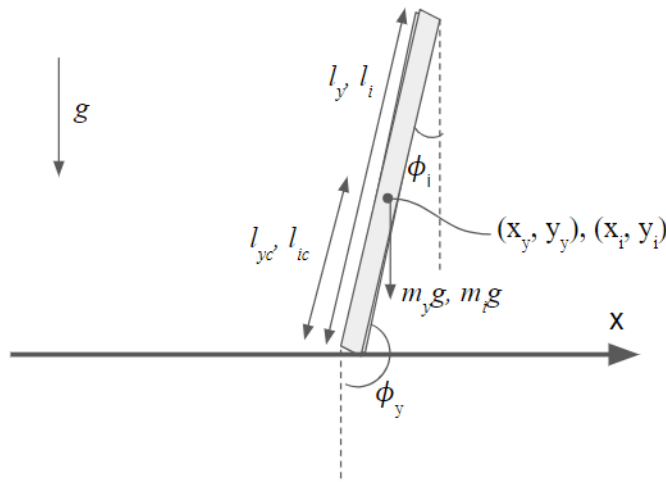
graferna visa hur vinkeln på yttrebenet förändras och den röda grafen visar vinkelförändringen för innerbenet. Vid denna simulering var benen utsträckta som vid det fysiska testet av LARS som dubbelpendel. Figuren visar vinkeländringarna då den viskösa friktionen till yttrebenen valts till 0,55 och till innerbenet till 0,2, medan Coulombfriktion till yttrebenen valts till 1,55 och till innerbenet valts till 3,7. Dessa friktioner är framtagna genom anpassning av grafen från simuleringen till grafen från de fysiska testet i Avsnitt 6.5.



Figur 37: Simulering av roboten utan reglering med anpassad friktion

6.5.3 Simulering med reglering

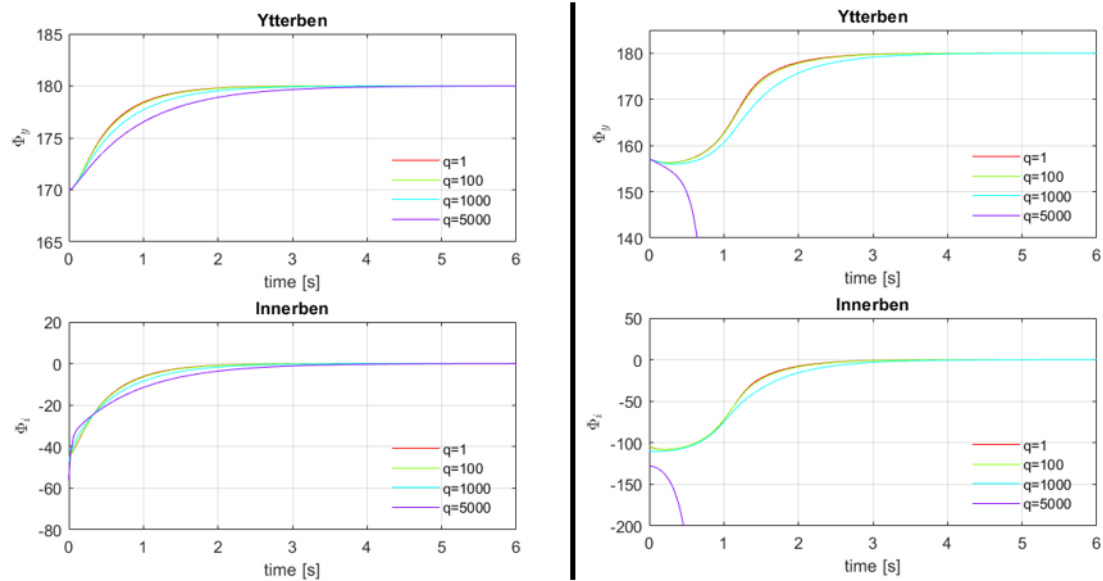
Simulering på fyra olika regulatorer gjordes och graferna presenteras i detta avsnittet. De fyra olika regulatorer skiljer sig utifrån deras Q -matris som är enhetsmatriser multiplicerad med korrigeringskoefficienten q . Q -matrisen finns med i kostnadfunktionen, C , som används vid framtagning av LQR-modeller. De fyra regulatorer illustreras i koordinatsystemen som fyra olika grafer i färgerna röd, grön, turkos och lila. Röd graf representerar regulatorn med korrigeringskoefficienten $q=1$, grön graf representerar regulatorn med $q=100$, turkos graf representerar regulator med $q=1000$ och lila graf representerar regulator med $q=5000$. I simuleringarna med regulatorer var benen parallella vid startposition, se Figur 38, till skillnad från vid testet av LARS som dubbelpendel där benens startposition var på en linje.



Figur 38: Robot i lutad position med benen parallella

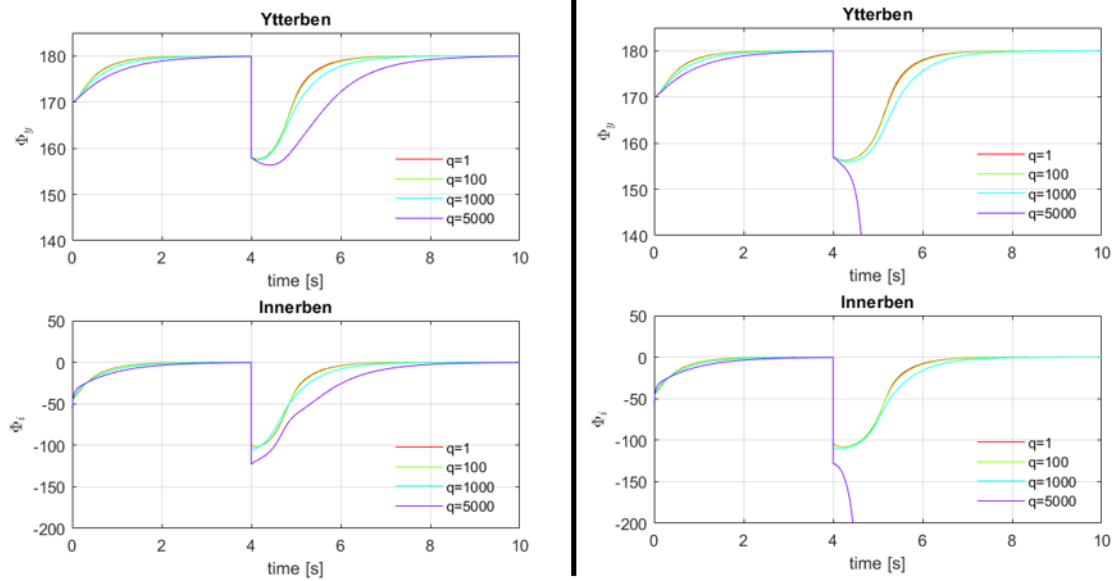
I Figur 39 nedan visas fyra koordinatsystem. De två koordinatsystemen till vänster beskriver hur lång tid det tar för de fyra olika regulatorerna att stabilisera systemet när roboten startar från en lutning på 170° relativt gravitationsvektorn, g , i Figur 29, dvs då $\phi_y = 170^\circ$ och $\phi_i = -10^\circ$. Det övre koordinatsystemet beskriver hur vinkeln till ytterbenen ändras, medan det nedre beskriver hur vinkeln för innerbenet ändras så att ytterbenen ska stabiliseras och på så sätt stabiliseras roboten. På samma sätt beskriver de två koordinatsystemen till höger vinkelförändringen hos robotens ben när roboten startar från en lutning på 157° , då $\phi_y = 157^\circ$ och $\phi_i = -23^\circ$.

I de högra koordinatsystemen går det att avläsa att den lila grafen avviker från resterande grafer i samma koordinatsystem, medan avvikelserna mellan graferna är små i de vänstra koordinatsystemen.



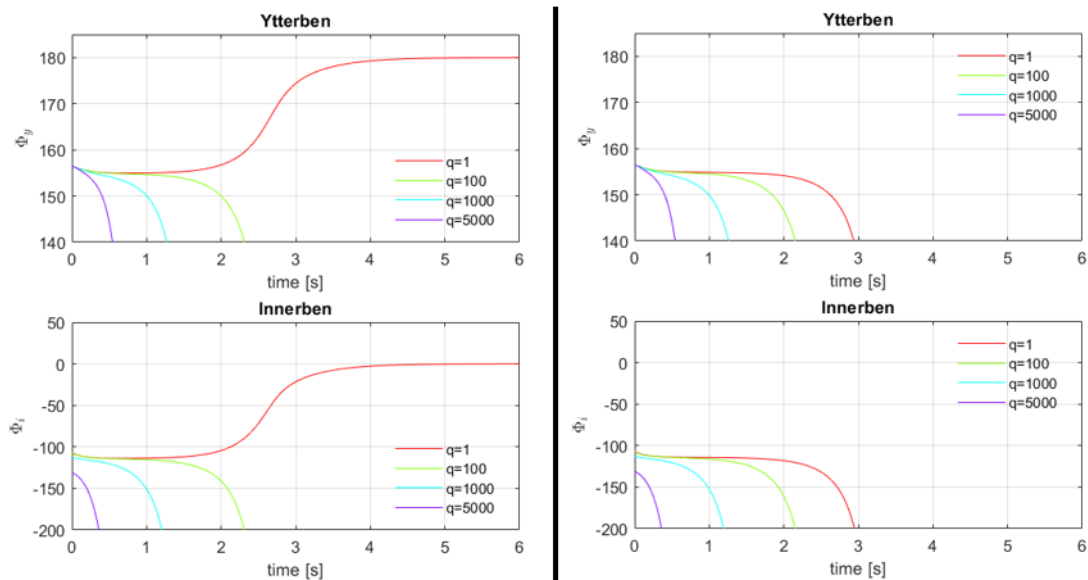
Figur 39: Reglering med LQR, robotens begynnelseposition skiljer sig för de vänstra koordinatsystemen och de högra koordinatsystemen

Figur 40 nedan visar grafer från regleringen när roboten startar från en lutning på 170° relativt gravitationsvektorn, g , i Figur 29 samtidigt som den vid fyra sekunder utsätts för en störning. I de vänstra koordinatsystem utsätts roboten för en störning som får roboten att hamna i en lutning på 168° . I de högra koordinatsystemen utsätts roboten för en störning som får roboten att hamna i en lutning på 167° . Även här avviker den lila grafen i de högra koordinatsystemen mycket i jämförelse med andra graferna i samma koordinatsystem.



Figur 40: Reglering med störning, roboten startat från 170° och vid fyra sekunder utsätts den för störning

Figur 41 visar grafer när roboten har sin startposition vid $156,42^\circ$ och $156,41^\circ$ lutning. I de vänstra koordinaterna har roboten sin startposition vid $156,42^\circ$ och endast regulatorn som representeras av den röda grafen kan stabilisera systemet vid den lutningen. I de högra koordinatsystemen har roboten sin startposition vid $156,41^\circ$ och ingen av regulatorerna lyckas stabilisera systemet vid den vinkeln så alla grafer faller hastigt mot höga negativa vinklar. Vinklarna är framtagna för att undersöka vilken den kritiska lutningen är för att den snabbaste regulatorerna, $q = 1$, ska kunna stabilisera systemet.



Figur 41: Reglering när roboten har sin startposition vid $156,42^\circ$ och $156,41^\circ$

6.6 Budget

Budgeten för projektet given av Institutionen för Elektroteknik var 5000 SEK och räckte till att lösa de ekonomiska behov vid inköp och konstruktion med ett överskott på 1152,44 SEK, se Figur 42. Eftersom att ändringar och problem med komponenter uppkom under arbetets gång skedde inköp av delar som inte användes och som därmed ökade utgifterna, så som ett extra kullager, två drivkort och fyra accelerometrar. Projektet hade även tillgång till material från Prototyp-laboratoriet ackumulerat upp till 2000 SEK, men vid överenskommelse med verkstadens ansvariga tillhandhålls dessa material kostnadsfritt oavsett om värdet på materialet skulle överstiga 2000 SEK och behövde därför inte budgeteras.

Slutgiltig budget	LARS - Gestaltning och konstruktion av en robot inspirerad av TARS från filmen Interstellar			
Utförd av: EENX 15-18-89	Skapad: 2018-03-22 Modifierad: 2018-05-08			Verklig kostnad
Behövda komponenter	Styckpris (kr)	Antal (st)	Pris (kr)	Pris (kr)
Linjär aktuator	699,095	2	1 398	-
Drivkort TB6600	317,5	2	635	-
Drivkort CRF	50	2	100	100
Stegmotor	509	2	1018	-
Arduino mega	400	1	400	-
Batteri	371	1	371	-
Bluetoothmodul	99	1	99	-
Accelerometer ADXL345	59	3	177	-
Accelerometer MPU6050	50	2	100	100
Kullager med lagerhus	100	3	300	-
Spänningsregulator	20	2	40	40
Summa			4 638,19	3847,56
I kassan			5000	5000
Balans			361,81	1152,44

Figur 42: Budget

Notera att i Figur 42 finns två beräkningar för projektets totala kostnad. Den till vänster är den som gruppen själva har loggat då delar har beställts, medan den högra är de verkliga kostnader som erhöles från ansvarig administrativ personal vid Institutionen för Elektroteknik. Att det finns en stor skillnad mellan de två summorna beror med största sannolikhet på växelkurser, rabatter och att flera komponenter skickades i samma paket, vilket gjorde frakten billigare.

7 Diskussion

I detta kapitel diskuteras resultatet från projektet i relation till projektets motiv i Avsnitt 1.

7.1 Fysiska tester

Från Avsnitt 6.1 framgår det att flertalet av kraven och önskemålen i den funktionsbaserade kravspecifikationen inte uppfylls. Anledningen var framförallt att tiden inte fanns till för att implementera varken någon reglering av roboten eller någon säkerhetsfunktion. Även problem med konstruktionen av LARS gjorde att mycket tid lades på annat än att implementera nämnda funktioner.

Till att börja med uppstod ett glapp mellan motorer och axelkopplingar samt mellan axeln och axelkopplingarna som orsakade att LARS efter ha gått några steg fick större och större glappfel. Detta fel blev tillslut lika stort som ett steg och gången var därför inte längre pålitlig. De 3D-skrivna fötterna som agerar skenor i de yttrebenen var inte heller perfekta och i och med att det ena benet var mer rombiskt än kvadratisk uppstod det hög friktion. Detta ledde till att fötterna inte åkte in och ut ur roboten tillräckligt fort och påverkade gången i stort, men ledde även till att mycket tid lades på att tillverka nya fötter och modifiera de som var klara. Slutligen var de linjära aktuatorerna långsammare än väntat vilket påverkade hur fort LARS kunde röra sig och gjorde att det tog lång tid att optimera mjukvaran.

LARS klarade inte testet för verifiering av gång, vilket var att klara kontinuerlig rörelse på en sträcka av 5 m. Roboten tog två steg och föll sedan fram eller bak, med största sannolikhet på grund av orsakerna beskrivna i stycket ovan. Trots detta har roboten absolut potential till att nå målet med ytterligare finkalibrering och justering av komponenter. Det som mest verkar hämma möjligheten till gång är glappet i axelkoppling som gör roboten opålitlig och svår att programmera en funktionell gång. Tanken vid konceptgenereringen var att implementera fullständig Kong-walk²⁰ men vid testning av gång framgick det att det är lättare att börja med svinga mittenbenet framåt gentemot att börja med ytterbenen. Anledning till det är att ett lägre tröghetsmoment behöver övervinnas vilket därmed leder till en stabilare gång. Således fullbordar inte LARS en fullständig stegsekvens enligt Kong-walk, där även ytterbenen roteras framför roboten.

Något som är anmärkningsvärt i resultatet är skillnaden mellan den verkliga vikten och den teoretiska som beräknades från CAD-modellen och produktspecifikationerna. Anledningen till detta tros vara att elektriska komponenter så som drivkort, sensorer och diverse sladdar försumrades i uträkningarna. En annan stor felkälla misstänks vara densiteten på aluminium med vilket ramen tillverkades som står för en betydande del av slutvikten. Materialvalet var ändå befogat med hänsyn till de goda egenskaper i hållfasthet som erfordrades. En liten skillnad i densitet ger ett stort utslag i massa.

Både den beräknade och den uppmätta urladdningshastigheten blev ungefär 30 minuter. Trots detta så upplevdes ställdonens funktionalitet försämrats efter att batteriet använts i några försök, vilket inte antas bero på att batteriet blev urladdat på energi så snabbt, utan snarare att de elektriska komponenternas egenskaper förändrades och blev opålitliga vid låga batterinivåer. Därmed krävs en mer frekvent laddning för att uppnå önskade egenskaper hos komponenterna.

Valet att skapa en robot med tre ben istället för TARS fyra minskade komplexiteten i konstruktionen och ökade därmed möjligheterna för att bygga en robot som klarar av att gå. Dock medförde beslutet att gångstilar som Human-walk²¹ och Trotting²² inte gick att implementera. Då LARS går att demontera finns däremot stora möjligheter för ett nästkommande projekt att byta ut innerbenet mot två innerben för att kunna implementera även de andra två gångsätten. De två innerbenen skulle behöva förses med varsin fot som styrs med linjära aktuatorer precis som ytterbenen för att kunna skapa höjdskillnader mellan olika benpar, samt en ytterligare stegmotor skulle krävas.

²⁰se Kong-walk i Figur 6, Avsnitt 2.1.2

²¹se Human-walk i Figur 7, Avsnitt 2.1.2

²²se Trotting i Figur 8, Avsnitt 2.1.2

Trots alla dessa felkällor har LARS ändå lyckats gå några steg, men den kontinuerliga gången blir kvar att vidareutveckla för framtida projekt.

7.2 Estetik

Från resultaten som gavs från enkäten kan det ses att de båda kraven på att roboten ska vara estetiskt tilltalande och att den ska likna roboten från filmen uppfylldes relativt bra på skalan. Likheten mellan LARS och TARS ansågs vara stor. Skalan går mellan "ser ingen likhet" och "ser ingen skillnad" vilket betyder att 7 av 10 är bra och detta kravet är därför uppfyllt. Robotens estetiska tilltalande fick betyget 6 från enkäten på skalan "väldigt ful" till "väldigt fin". 5 borde därför vara ett neutralt utseende. Betyget 6 innebär att LARS är estetiskt tilltalande, dock inte tillräckligt för att uppfylla det satta önskemålet.

Enkäten delades på sociala medier vilket innebär att främst kandidatgruppens bekanta svarade på frågorna. Detta kan ge en skev bild då många av dessa går på tekniska linjer och antagligen gillar det tekniska utseendet som LARS har. Likheten mellan roboterna borde dock ej påverkas av detta. Hur estetiskt tilltalande eller likheten mellan de båda robotarna är även väldigt subjektiva mått och vad som definierar "likhet" och "estetiskt tillande" skiljer sig väldigt mycket mellan personer. Ett större antal som svarade på enkäten hade därför givit ett bättre resultat. Men det går även att se i fördelningen att det finns en viss normalfördelning runt 7 speciellt på fråga 1, vilket antyder att frågans resultat bör vara hyfsat nära sanningen. Något att notera kring verifikationen av estetiken är att denna till skillnad från så mycket annat i detta projekt bygger på subjektiv kvantitativ data och inte objektiv kvalitativ data. Det betyder att det inte i samma benämning finns något absolut rätt och fel som i exempelvis beräkning och modellering.

7.3 Mjukvaruutveckling

LARS bygger i dagsläget på ett enkelt program utan någon reglering implementerad. Detta gör att Arduinos egna utvecklingstyg och kodbibliotek kan användas och duger gott för projektets magnitud. Den enkla programstrukturen lägger även en god grund att bygga vidare på genom att kommande projekt enkelt kan tillföra funktioner och utöka den trådlösa kommunikationen.

Givet scenariot där regleringen av LARS hade kunnat implementerats i roboten tidigare hade mjukvaruutveckling tagit en annan väg. En reglering kräver flera sensorer för att kunna läsa av situationen, tillstånd och förstå vad roboten gör för något. För att flera sensorer skulle kunna arbeta tillsammans hade det behövts arbetas mer med hårdvaruavbrott och flera seriella kommunikationskanaler, vilket kräver en mer avancerad programkod. Frågan är om det system som är byggt idag hade kunnat stödja en väl utvecklad reglering eller om det hade varit aktuellt att implementera programmet på en mer avancerad plattform. Detta skulle dock komma till en större kostnad, något som i dagsläget inte är möjligt.

7.4 Reglering

En dubbelpendel har ett kaotiskt beteende, vilket innebär att små förändringar i egenskaperna hos pendlarna kan ge helt olika resultat. En av faktorerna som kan påverka resultaten och kan ge ett annorlunda grafiskt utseende är friktionen. För den matematiska modellen av roboten som användes vid simuleringarna av systemet var variabler som robotens vikt och längder kända. Tröghetsmomentet och tyngdpunkten beräknades och friktionerna uppskattades genom jämförelsen med det fysiska testet.

Beräkningarna av tröghetsmomenten och tyngdpunkterna i benen gjordes med en del förenklingar som gör resultaten osäkra. Vid implementering av reglersystemet skulle dessa kunna göras mer noggrannt, där hänsyn till alla komponenter tas var för sig.

Metoden för att uppskatta friktionen kan anses orobust, då både framtagningen av vinkelförändringen från det fysiska testet och anpassningen av graferna för den simulerade roboten till graferna från det fysiska testet gjort genom avläsning och uppskattning. En alternativ metod hade kunnat vara att med hjälp av Simulink och vinkelsensorer ta fram mer korrekta friktionsvärden. Trots framtagningens osäkerhet har värden på friktionen uppskattats som kan anses relativt troliga, då Figur 37 visar att den simulerade modellen är lik den verkliga roboten som visualiseras i Figur 36. Det syns från graferna i Figur 37 och 36 att vid de första två sekunder har graferna liknande utseende samt att ytterbenens vinkel förändras snabbare än innerbenets. Största skillnaden mellan graferna är storleken på vinkelförändringarna samt vid vilka tidpunkter robotens ben når olika vinklar. Till exempel är den största vinkelförändringen i den fysiska testet cirka 250° medan den i den simulerade modellen är cirka 280° . Ett annat exempel är att i det fysiska testet är vinkeln på innerbenet 25° vid 3,5 sekunder, medan vinkeln i den simulerade modellen är -40° vid samma tidpunkt.

En annan felkälla vid utvecklingen av reglersystemet är valet av differentialekvationslösare till den simulerade modellen, även kallad för solver i Simulink, då olika solvers gav olika grafer. Vid simuleringen användes solver *ode23(stiff)/Mod. Rosenbrock*. Graferna blev inte särskilt kaotiska, vilket beror på att friktionen i motorena är väldigt hög vilket i sin tur resulterar i att rotationsrörelsen avtar snabbt.

I Avsnitt 6.5.3 syns det att den lila grafen med $q=5000$ tar längst tid på sig att stabilisera systemet, dock är den mest kostnadseffektiv. Nackdelen med den kostnadseffektiva regulatorn är att den har den minsta kritiska vinkeln, det avläses från koordinatssystemen till höger i Figur 39 där den lila grafen avviker helt från resterande grafer. Regulatorn som stabiliserar systemet snabbast och därmed tillåter störst kritisk vinkel är den med $q = 1$. Skillnaden mellan den tillåtna kritiska vinkeln för dessa två regulatorerna är dock endast $0,59^\circ$, vilket är en så pass liten skillnad att bägge regulatorerna kan användas näst intill likvärdigt. Om en av regulatorerna måste väljas får en avvägning göras om snabbheten i systemet går före energiförbrukningen.

Robotens förmåga att bibehålla balans vid störning i statiskt tillstånd testades inte på den fysiska roboten, dock togs det hänsyn till i den simulerade modellen. Roboten kunde i den simulerade modellen stabiliseras så länge störningen inte medförde att vinklarna översteg den kritiska vinkeln för stabilisering. Den kritiska vinkeln låg mellan $156,41^\circ$ och $157,00^\circ$ där $156,41^\circ$ är den kritiska vinkel för den snabbaste regulatorn med $q = 1$ och $157,00^\circ$ för den långsammaste regulatorn med $q = 5000$. Den simulerade regleringen på roboten vid störning i statisk tillstånd kan implementeras på den fysiska roboten, dock har det inte gjorts på grund av tidsbrist. Implementering hade även krävt justering av reglersystemet då variablerna för framtagning av regulatorn, med stor sannolikhet, inte stämmer helt överens med verkligheten.

Anledningen till att regulatorerna kan stabilisera systemet endast vid små vinklar är för att systemet är kraftigt olinjärt och kräver en regulator för olinjära system eller en robust regulator, vilket kan vara något för framtida forskning eller framtida kandidatarbeten. I projektet linjäriseras systemet runt en arbetspunkt som motsvarar att roboten står rakt upp. Om den linjäriserade matematiska modellen av systemet ska användas för att ta fram en regulator som stabiliserar roboten vid gång krävs linjärisering kring fler arbetspunkter.

7.5 Budget

Tidigare nämnt i Avsnitt 6.6 överskreds inte budgeten eftersom att komplexiteten i det valda konceptet, se Kapitel 3, hölls relativt låg. För att öka LARS efterliknelse av TARS skulle LARS kunna skapats med fyra ben istället för tre. En konstruktion med ett extra ben hade krävt flera extra komponenter, vilket skulle medfört att den ansatta budgeten överskreds. För att skapa en mer mångsidig robot krävs det alltså antingen mer pengar, ett annat koncept eller billigare komponenter. Med hänsyn till detta är roboten väl anpassad för sitt syfte och de begränsningar som satts.

7.6 Samhälleliga och etiska aspekter

Idag är det allt vanligare att det som förut utfördes av människor nu kan göras snabbare, noggrannare och billigare av robotar. Allt från tillverkning till interkontinental transport kan automatiseras för att undvika den mänskliga faktorn. Frågan är dock om detta är vad mänskligheten borde satsa på.

För en stor del av världens befolkning är en anställning avgörande för att kunna försörja sin familj och för att kunna känna delaktighet till samhället. Om alla företag i Sverige som var engagerade i tillverkningsindustrin år 2013, vilket var drygt 50 000 stycken, valde att ersätta de anställda med robotar skulle över 500 000 personers anställning ha äventyrats (Persson, 2018). Även om detta skulle leda att produktionen av många varor blev mer effektiv, mindre kostsam samt bidra till mycket högre ekonomisk tillväxt kan det debatteras vilket samhälleligt ansvar en arbetsgivare besitter.

Det etiska ansvaret kan också handla om arbetsgivarens ansvar att inte utsätta sina anställda för onödiga risker. Här är det snarare rimligt att ersätta en anställning med en robot för att undvika riskabla arbetsmoment och onödiga olyckor. I exempelvis fordonstillverkningsindustrin har Teslas VD Elon Musk i de nya fabrikerna installerat robotar för att hantera all produktion av de elektriska bilarna. Elon Musk försvarar med att människor är menade för större saker än att tillverka fordon (DeBord, 2017), men för många människor i världen är en sådan anställning en möjlighet till att försörja sina familjer.

Robotteknik är idag ett aktuellt diskussionsämne i samband med artificiell intelligens, AI. Inte minst inom populärkulturen framställs framtidsoron över självmedvetna robotar. Olika experter inom tekniksfären är delade kring implementering av AI i robottekniken, däribland ovan nämnda Elon Musk (Strauss, 2017). Debatten behandlar främst hur människoliknande robotar ersätter människor.

Med utgångspunkt i projektets efterliknelse av TARS från filmen *Interstellar*, en robot vars utseende inte liknar en människa och inte innehar en välutvecklad AI, faller denna robot utanför denna debatt kring hur framtidens intelligenta maskiner bör utvecklas. Detsamma kan även sägas om dess potential att ersätta mänsklig arbetskraft helt och hållet, utan skulle troligare vara ett komplement till människans fysiologiska begränsningar. LARS är som tidigare nämnt avgränsad till att enbart omfatta enklare mekaniska funktioner som att gå med en mänskligt förprogrammerad styrning och faller något utanför denna grad av sofistikering. Däremot bör vidareutvecklingspotentialen beaktas då detta koncept i framtiden troligen kan implementeras med bland annat artificiell intelligens och därmed bli intressant för en vidare diskussion.

En helt annan aspekt som är högst aktuellt med utvecklingen av en prototyp som LARS är om den kan vara skadlig för omgivning och människor. Att LARS inte är farlig är ett av de önskemål som ställdes i kravspecifikationen, se Figur 32. I dagsläget vid publicerandet av denna rapport bedöms LARS inte inneha tillräcklig motorkraft eller rörelsemängd²³ för att orsaka större skada på någon annan än sig själv. Vid eventuella framtida vidareutvecklingar bör det reflekteras kring hur säkerheten hos roboten vid implementering av tyngre och kraftfullare komponenter som skapar större och kan bringa mer skada för omgivningen bibehålls.

²³Även kallat impuls, är den anslagskraft en partikel i rörelse innehar; beskrivs som produkten av massan och hastigheten

8 Slutsatser

Målet med projektet var att skapa en robot som efterliknar TARS från filmen *Interstellar*. Roboten skulle kunna röra på sig och gå framåt precis som TARS. LARS kan i dagsläget gå ett par steg trådlöst. Trots att roboten inte lyckades gå lika stabilt som önskat, är den en bra grund för vidareutveckling av reglersystemen och därigenom en utveckling av stabilare gång. LARS design gör att den efterliknar TARS och kan röra sig som den till viss mån. Den består av rätblock som roterar relativt varandra vilket är det karaktäristiska draget för roboten TARS. Trots att vissa fysiska förändringar behövde genomföras för att möjliggöra utveckling och liknande gång av LARS som TARS, så har de två sina likheter.

För att dra nytta av den mekaniska konstruktionen skulle mer tid behövas för att utveckla ett reglersystem som håller roboten stabil vid gång. Det största problemet var att LARS är ett kraftigt olinjärt system och den välter lätt när den tar ett steg. Anledningarna till detta är många. Saknaden av implementerat reglersystem, lite för långsamma aktuatorer, skiftande prestation av batteri samt glapp i olika mekaniska komponenter är faktorer som minskar möjligheten att upprepa försöken under samma förutsättningar. Detta kan vara något för framtida vidarutveckling i samband med att den framtagna reglering på roboten i statisk tillstånd implementeras och testas på den fysiska roboten.

Ett av de områden som kan vara begränsande för vidareutvecklingen av LARS är konstruktionen av fötterna. Den metod som används för att styra fötterna gör att risken för antingen glapp eller att fötterna sitter för hårt är ständigt överhängande. Detta leder till att fötterna är instabila, således blir en rekommendation för kommande projekt att se hur mycket detta påverkar möjligheten till god rörelse och om det bedöms nödvändigt se över alternativa lösningar. Ytterligare problem är de glapp som diskuteras i Avsnitt 6.1. Glappen gör att steglängden blir olika för varje steg. Dessa kan åtgärdas genom att skruva åt aktuella komponenter, dock brukar dessa på grund av vibrationerna skruvas upp under användning.

Tillsammans med sin i övrigt rigida konstruktion och ett reglersystem som är redo att implementeras med vissa modifikationer så ger LARS en bra grund för kommande projekt, som till exempel skulle kunna fokusera på att utveckla ett reglersystem anpassat för när LARS är i rörelse.

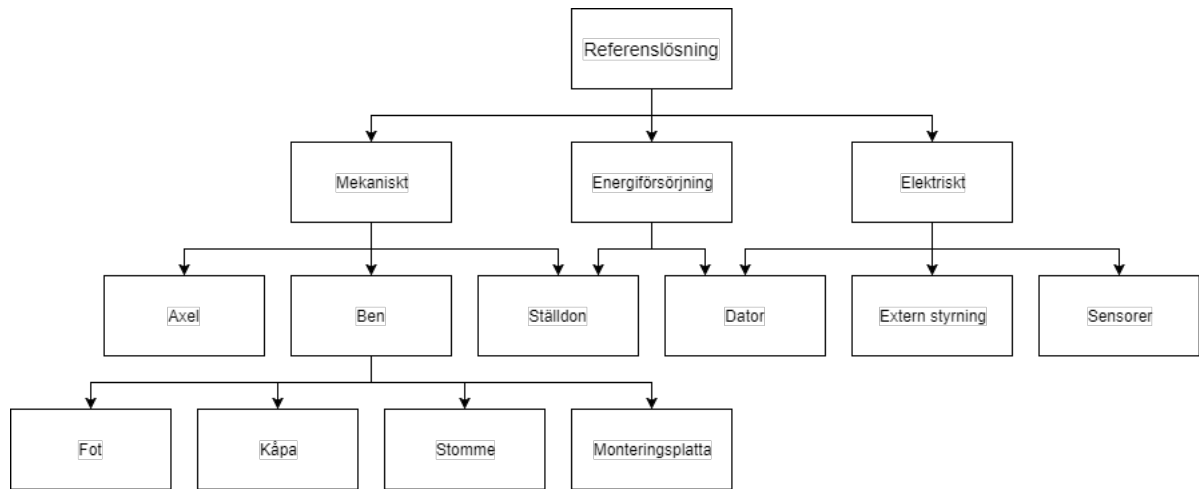
Litteraturförteckning

- Actuonix. (u. å.). *Actuonix l16 datasheet*. Hämtad från <https://www.robotshop.com/media/files/pdf/L16.Datasheet-2.pdf>
- Acuna, K. (2015, Mars). *The 'interstellar' robot was actually a 200-pound puppet an actor carried on set*. Hämtad 2018-03-09, från <http://www.businessinsider.com/interstellar-how-tars-was-built-2015-3?r=UK&IR=T&IR=T>
- Arbetsmiljöverket. (2016). *Buller (2.1.0.6) [mobilapplikation]*. Hämtad 2018-05-09, från <https://www.av.se/bullerapp/>
- Dareini, A. & Dabreteau, T. (2015). *Control of double inverted pendulum first approach*. Karlskrona: Blekinge Institute of Technology.
- DeBord, M. (2017, Maj). *Tesla's future is completely inhuman — and we shouldn't be surprised*. Hämtad 2018-01-23, från <http://www.businessinsider.com/tesla-completely-inhuman-automated-factory-2017-5?r=US&IR=T&IR=T>
- dfrobot. (u. å.). *Motor driver datasheet*. Hämtad från <https://www.dfrobot.com/wiki/index.php/TB6600StepperMotorDriverSKU:DRI0043>
- Ekh, M., Hansbo, P. & Brouzoulis, J. (2015, April). *Formelsamling i hållfasthetslära*. Göteborg: Chalmers tekniska högskolan.
- Geyer, H., Seyfarth, A. & Blickhan, R. (2006). *Compliant leg behaviour explains basic dynamics of walking and running*. Hämtad 2018-04-19, från <http://rspb.royalsocietypublishing.org/content/273/1603/2861.figures-only>
- Girish, M. (u. å.). *Led controller*. Hämtad från <https://www.amazon.com/Mayoogh-Girish-LED-Controller/dp/B01DR5T226>
- haoyueelectronics. (u. å.). *Arduino mega datasheet*. Hämtad från <http://www.haoyueelectronics.com/Attachment/GY-521/mpu6050.pdf>
- Higaki, A. B. (2017, Mars). *Tars from interstellar: A walking robot invention (award-winning engineering project)*. Hämtad 2018-03-06, från <https://www.youtube.com/watch?v=IdvzREqSIA4>
- Hobbyking. (u. å.). *Turnigy bolt 2800mah*. Hämtad från https://hobbyking.com/en-us/turnigy-bolt-2800mah-4s-15-2v-65-130c-high-voltage-lipoly-pack-xt-60.html?__store=en_us
- Inc., A. (2017, September). *Arduino ide (1.8.5)*. Hämtad 2018-05-10, från <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>
- Instrumentns, T. (u. å.). *Lm2596 datasheet*. Hämtad från <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2596.pdf>
- Kajita, S., Matsumoto, O. & Saigo, M. (2001). *Real-time 3d walking pattern generation for a biped robot with telescopic legs*. Hämtad från <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=932965>
- Kermode, M. (2014, Nov). *Interstellar review – if it's spectacle you want, this delivers*. The Guardian. Hämtad 2018-04-13, från <https://www.theguardian.com/film/2014/nov/09/interstellar-review-sci-fi-spectacle-delivers>
- KjellCompany. (2018, April). *Luxorparts variabel spänningsregulator switchad*. Hämtad 2018-04-26, från <https://www.kjell.com/se/sortiment/el-verktyg/arduino/stromforsorjning/luxorparts-variabel-spanningsregulator-switchad-p87896>
- Kullagret.com. (2018, May). *Skf 6202 / 16mm 2rs*. Hämtad 2018-05-11, från <https://www.kullagret.com/product/6202-16-2z-kullager>

- mantech. (u. å.). *Arduino mega datasheet*. Hämtad från <http://www.mantech.co.za/datasheets/products/A000047.pdf>
- MathWorks. (2017, September). *Matlab (r2017b)*. Hämtad 2018-05-14, från <https://se.mathworks.com/products/matlab.html>
- MathWorks. (Vilket år släppte versionen?, Månad versionen släppte?). *Simulink (r2017b)*. Hämtad 2018-05-14, från <https://se.mathworks.com/products/simulink.html>
- Microsolutions. (2018, April). *Gy521 mpu-6050 module 3 axis gyroscope accelerometer module*. Hämtad 2018-04-18, från <http://www.microsolution.com.pk/product/gy521-mpu-6050-module-3-axis-gyroscope-accelerometer-module-pakistan/>
- Miller, S. (2018a, Mars). *Simscape multibody contact forces library (4.0)*. Hämtad 2018-05-08, från <https://se.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/47417-simscape-multibody-contact-forces-library>
- Miller, S. (2018b, Januari). *Simscape multibody multiphysics library (2.5)*. Hämtad 2018-05-08, från <https://se.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/37636-simscape-multibody-multiphysics-library>
- Mägi, M. & Melkersson, K. (2012). *Lärobok i maskinelement*. Göteborg: Chalmers tekniska högskola.
- Nolan, C. & Nolan, J. (2014). *Interstellar*. USA: Warner Bros. and Paramount Pictures.
- Nyström, A. (2017, September). *Robot kan hjälpa till i skolan*. Hämtad 2018-05-08, från <http://kvalitetsmagasinet.se/robot-kan-hjalpa-till-skolan/>
- Persson, J. (2018, Januari). *Basfakta om företag*. Hämtad 2018-01-23, från <https://tillvaxtverket.se/statistik/foretagande/basfakta-om-foretag.html>
- Phidgets. (u. å.). *12v, 1.7a, 416 oz-in geared bipolar stepper motor datasheet*. Hämtad från <https://www.robotshop.com/en/12v-17a-416oz-geared-bipolar-stepper-motor.html#Dimensions>
- Robotshop. (2018, April). *L16 linear actuator, 50mm, 150:1, 12v w/ limit switches*. Hämtad 2018-04-18, från <https://www.robotshop.com/eu/en/linear-actuator-l16-50-150-12-s.html>
- RSComponentsAB. (2018, April). *Arduino mega*. Hämtad 2018-04-18, från <https://se.rs-online.com/web/p/processor-microcontroller-development-kits/7154084/>
- Ruina, L. (2011, Maj). *Cornell ranger 2011 - marathon walking robot*. Hämtad 2018-03-06, från <http://ruina.tam.cornell.edu/research/topics/locomotion.and.robotics/ranger/Ranger2011/index.html>
- SainSmart. (2018, April). *Single-axis cnc stepper motor driver controller, tb6600*. Hämtad 2018-04-18, från <https://www.sainsmart.com/products/single-axis-cnc-stepper-motor-driver-controller-tb6600>
- SeedStudio. (2018, April). *Grove - serial bluetooth v3.0*. Hämtad 2018-04-18, från http://wiki.seeedstudio.com/Grove-Serial_Bluetooth_v3.0/
- Strauss, N. (2017, November). *Elon musk: The architect of tomorrow*. Hämtad 2018-01-26, från <https://www.rollingstone.com/culture/features/elon-musk-inventors-plans-for-outer-space-cars-finding-love-w511747>
- Systèmes, D. D. (2018, May). *Catia v5*. Hämtad 2018-05-11, från <https://www.3ds.com/products-services/catia/>
- Whittaker, E. T. (1917). *A treatise on the analytical dynamics of particles and rigid bodies; with an introduction to the problem of three bodies*. Cambridge: University Press.

A Konceptgenerering

A.1 Funktionsträd



Figur 43: Funktionsträd

A.2 Morfologiskamatriser

MORFOLOGISK Matris	Grupp EENX 15-18-89	Skapad: 2018-02-02 Modifierad: 2018-02-06	LARS - Gestaltning och konstruktion av en robot inspirerad av TARS från filmen Interstellar				
DELSYSTEM	E: Ställidon	F: Axel	G: Axelhöjd	H: Momentöverföring axel/ben	I: Lyftanordning	J: Fjädring	K: Sensor
1	Likströmsmotor Borstad	1 Axel	Högt upp	Kugghjul	Tryckluft	Avrundad fot	Acceleratorer
2	Likströmsmotor Oborstad	3 Axlar (1 per benpar)	Mitten	Kedjor/drivlina	Magnetism	Lutad fot	Vinkelsensorer motor
3	Servomotorer	2 Axlar (1o2 och 3o4)	Justerbart	Motor fast inspänd i stomme	Servo med kugghjul	Gummi	Lutnigssensorer benen
4	Stegmotor		Högt upp och nederst	Klämna	Motor med kedja	Fysisk fjädring	
5				Motorhuset är benet, motoraxeln är axeln	Hydraulik	Ingen fjädring	
6				Rem som kan spännas runt axel (remväxel)	Linjär servo		
7				Horisontella kugghjul	Linjär acktuator		
8					Ingen lyftanordning		

Figur 44: Morfologiskmatris 1

MORFOLOGISK Matris							
Grupp EENX 15-18-89		Skapad: 2018-02-02 Modifierad: 2018-02-06		LARS - Gestaltning och konstruktion av en robot inspirerad av TARS från filmen Interstellar			
DELSYSTEM	E: Ställdon	F: Axel	G: Axelhöjd	H: Momentöverföring axel/ben	I: Lyftanordning	J: Fjädring	K: Sensor
1	Likströmsmotor Borstad	1 Axel	Högt upp	Kugghjul	Tryckluft	Avrundad fot	Acceleratorer
2	Likströmsmotor Oborstad	3 Axlar (1 per benpar)	Mitten	Kedjor/drivlina	Magnetism	Lutad fot	Vinkelsensorer motor
3	Servomotorer	2 Axlar (1o2 och 3o4)	Justerbart	Motor fast inspänd i stomme	Servo med kugghjul	Gummi	Lutningssensorer benen
4	Stegmotor		Högt upp och nederst	Klämman	Motor med kedja	Fysisk fjädring	
5				Motorhuset är benet, motoraxeln är axeln	Hydraulik	Ingen fjädring	
6				Rem som kan spännas runt axel (remväxel)	Linjär servo		
7				Horisontella kugghjul	Linjär aktuator		
8					Ingen lyftanordning		

Figur 45: Morfologiskmatris 2

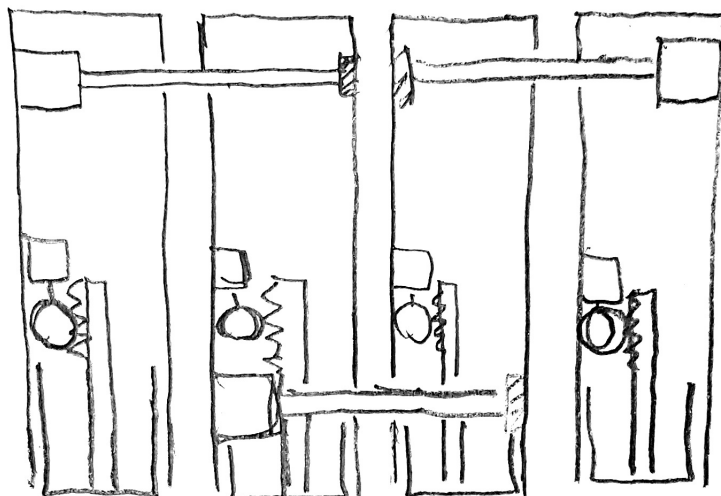
MORFOLOGISK Matris							
Grupp EENX 15-18-89		Skapad: 2018-02-02 Modifierad: 2018-02-06		LARS - Gestaltning och konstruktion av en robot inspirerad av TARS från filmen Interstellar			
DELSYSTEM	E: Ställdon	F: Axel	G: Axelhöjd	H: Momentöverföring axel/ben	I: Lyftanordning	J: Fjädring	K: Sensor
1	Likströmsmotor Borstad	1 Axel	Högt upp	Kugghjul	Tryckluft	Avrundad fot	Acceleratorer
2	Likströmsmotor Oborstad	3 Axlar (1 per benpar)	Mitten	Kedjor/drivlina	Magnetism	Lutad fot	Vinkelsensorer motor
3	Servomotorer	2 Axlar (1o2 och 3o4)	Justerbart	Motor fast inspänd i stomme	Servo med kugghjul	Gummi	Lutningssensorer benen
4	Stegmotor		Högt upp och nederst	Klämman	Motor med kedja	Fysisk fjädring	
5				Motorhuset är benet, motoraxeln är axeln	Hydraulik	Ingen fjädring	
6				Rem som kan spännas runt axel (remväxel)	Linjär servo		
7				Horisontella kugghjul	Linjär aktuator		
8					Ingen lyftanordning		

Figur 46: Morfologiskmatris 3

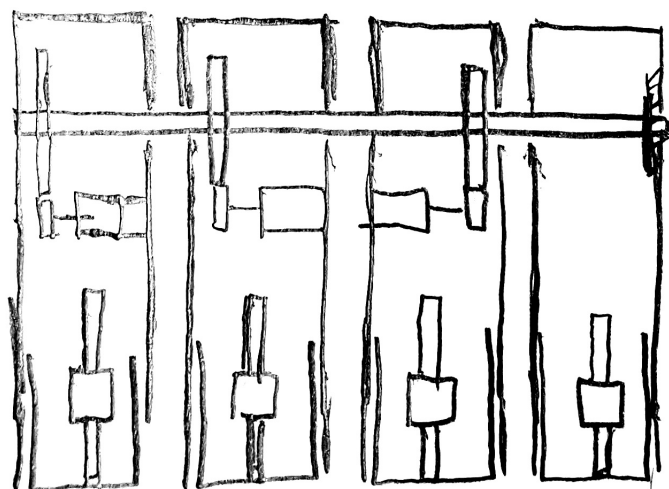
MORFOLOGISK Matris							
Grupp EENX 15-18-89		Skapad: 2018-02-02 Modifierad: 2018-02-06		LARS - Gestaltning och konstruktion av en robot inspirerad av TARS från filmen Interstellar			
DELSYSTEM	E: Ställdon	F: Axel	G: Axelhöjd	H: Momentöverföring axel/ben	I: Lyftanordning	J: Fjädring	K: Sensor
1	Likströmsmotor Borstad	1 Axel	Högt upp	Kugghjul	Tryckluft	Avrundad fot	Acceleratorer
2	Likströmsmotor Oborstad	3 Axlar (1 per benpar)	Mitten	Kedjor/drivlina	Magnetism	Lutad fot	Vinkelsensorer motor
3	Servomotorer	2 Axlar (1o2 och 3o4)	Justerbart	Motor fast inspänd i stomme	Servo med kugghjul	Gummi	Lutningssensorer benen
4	Stegmotor		Högt upp och nederst	Klämman	Motor med kedja	Fysisk fjädring	
5				Motorhuset är benet, motoraxeln är axeln	Hydraulik	Ingen fjädring	
6				Rem som kan spännas runt axel (remväxel)	Linjär servo		
7				Horisontella kugghjul	Linjär aktuator		
8					Ingen lyftanordning		

Figur 47: Morfologiskmatris 4

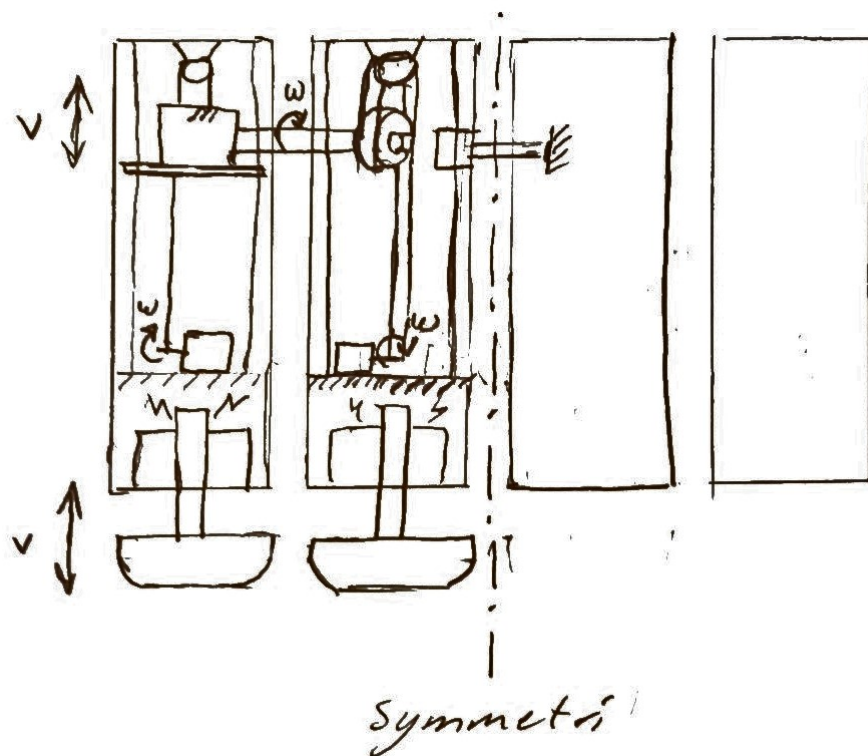
A.3 Koncept



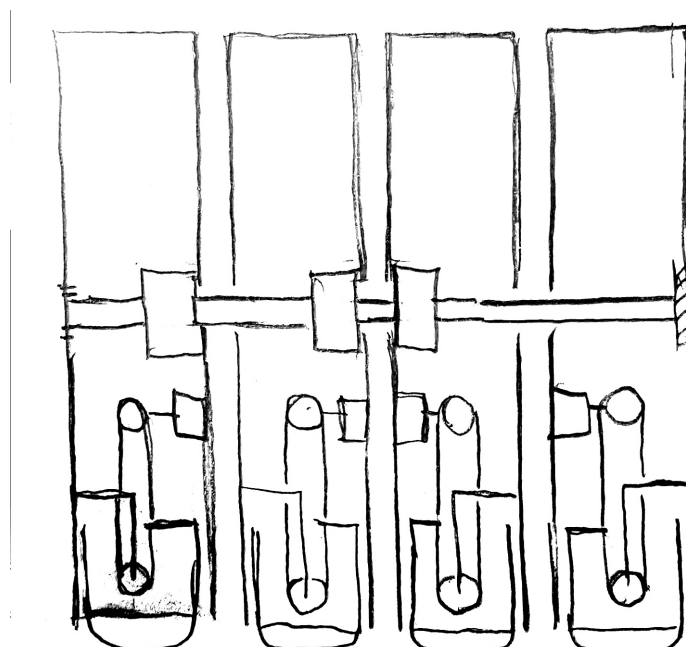
Figur 48: Koncept gul från Morfologisk matris 1. Konceptet har tre axlar, varav två sitter högt och en sitter lågt. Rotationen skapas av borstade likströmsmotorer och lyftet av servomotorer med en kugghjulsanordning. Fötterna har ingen fjädring



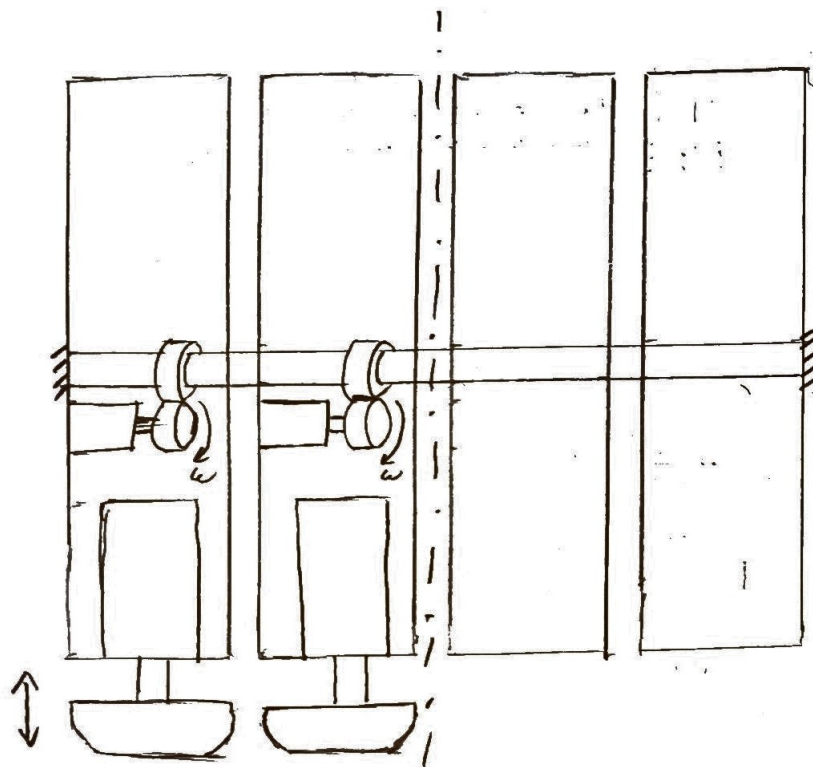
Figur 49: Koncept blå från Morfologisk matris 1. Konceptet har en axel som sitter högt. Rotationen skapas av stegmotorer och lyftet av linjära aktuatorer. Fötterna fjädras med gummi



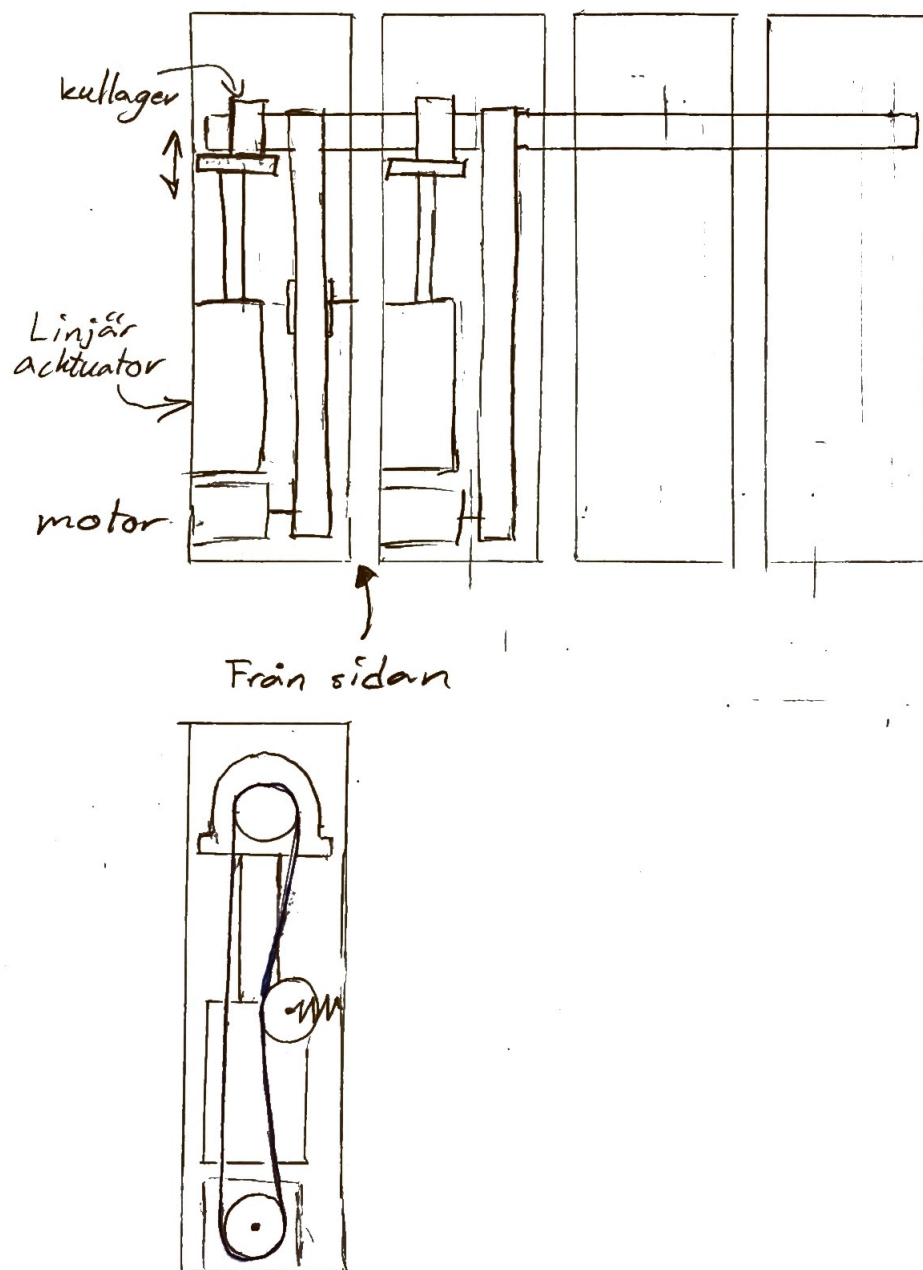
Figur 50: Koncept röd från Morfologisk matris 1. Konceptet har tre axlar varav de yttre kan justeras i höjddled. Rotationen skapas av servomotorer och lyftet av magnetism. Fötterna är avrundade för att skapa fjädring



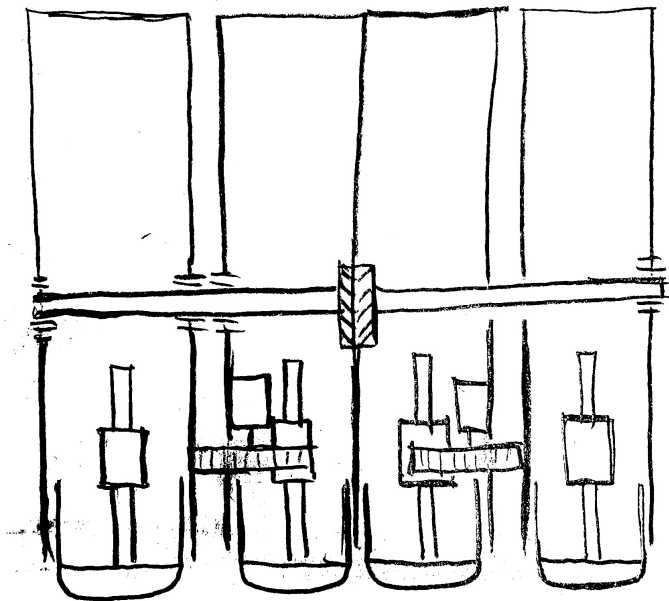
Figur 51: Koncept grå från Morfologisk matris 1. Konceptet har en axel som sitter i mitten. Rotationen skapas av stegmotorer och lyftet av en motoranordning med kedja. Fötterna är avrundade för att skapa fjädring



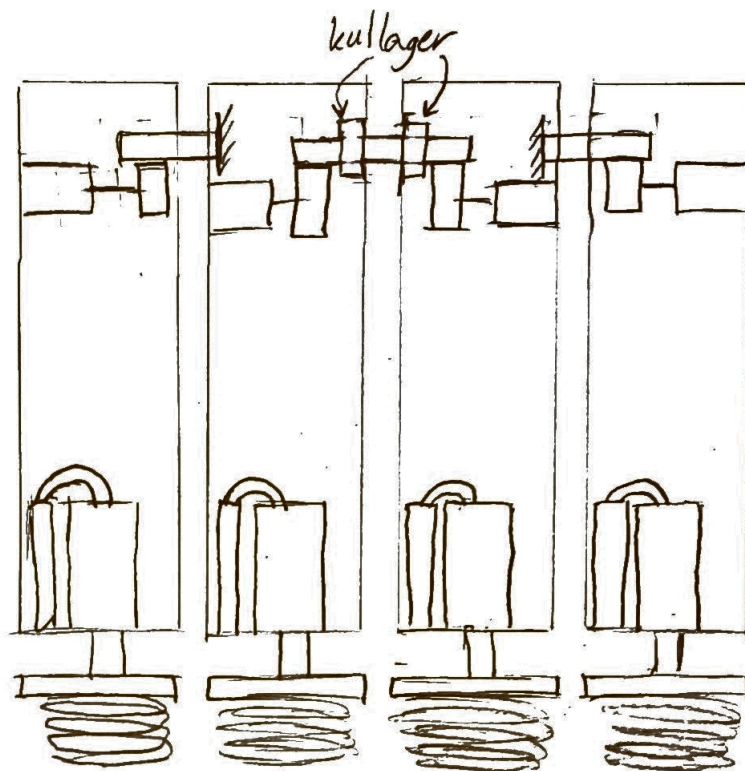
Figur 52: Koncept rosa från Morfologisk matris 2. Konceptet har en axel som sitter i mitten. Rotationen skapas av borstade likströmsmotorer och lyftet linjära aktuatorer. Fötterna är avrundade för att skapa fjädring



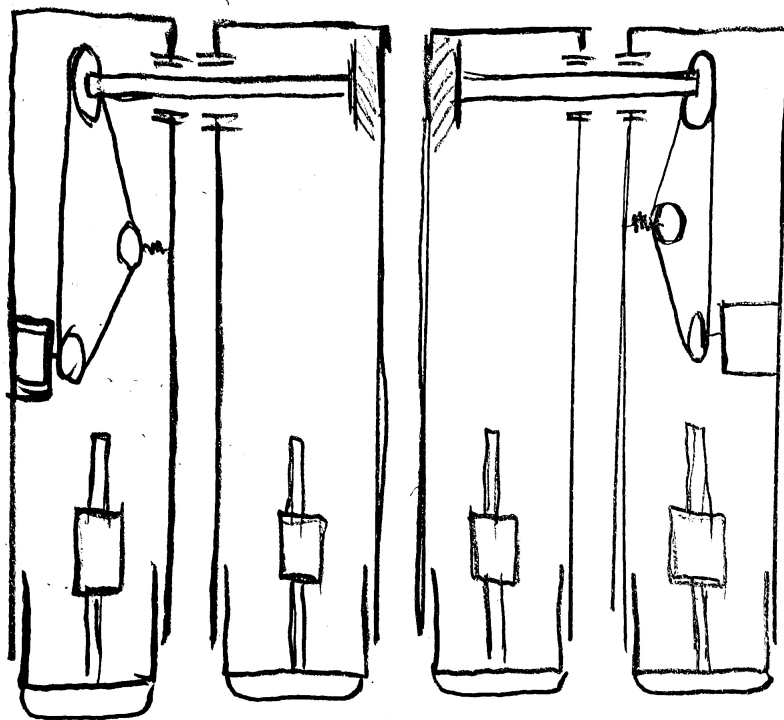
Figur 53: Koncept blå från Morfologisk matris 2. Konceptet har en axel som kan justeras i höjddled. Rotationen skapas av borstade likströmsmotorer. Fötterna fjädras med gummi



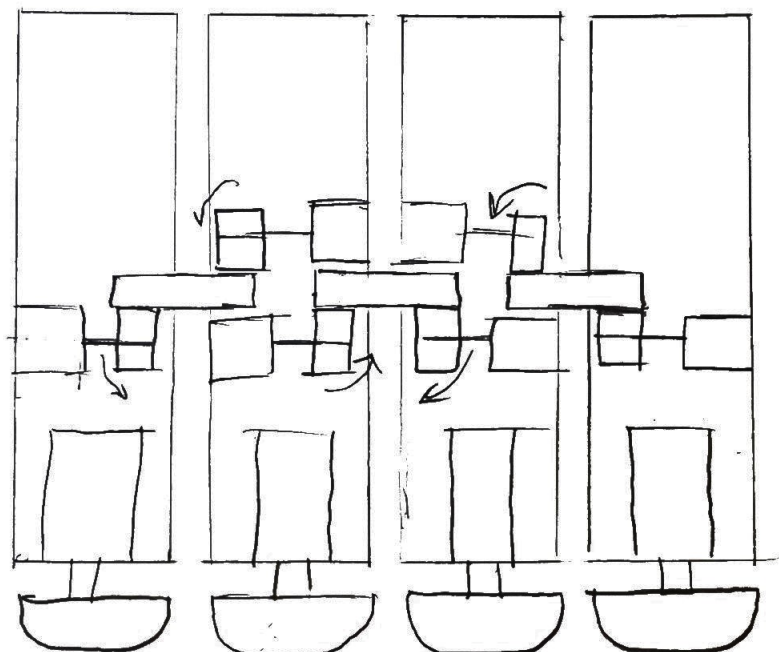
Figur 54: Koncept gul från Morfologisk matris 2. Konceptet har två axlar som sitter i mitten. Rotationen skapas av servomotorer och lyftet linjära servomotorer. Fötterna är avrundade för att skapa fjädring



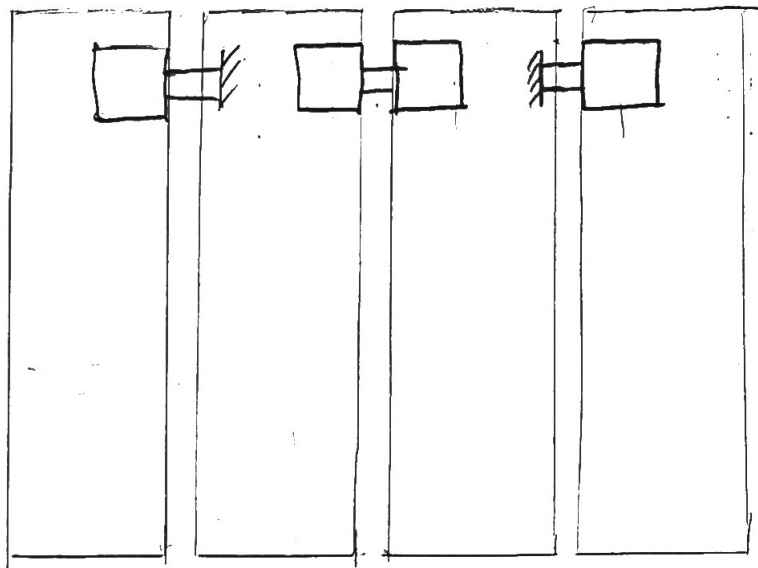
Figur 55: Koncept grön från Morfologisk matris 2. Konceptet har tre axlar högt upp. Rotationen skapas av stegmotorer och lyftet av tryckluft. Fötterna fjädras med fjädrar



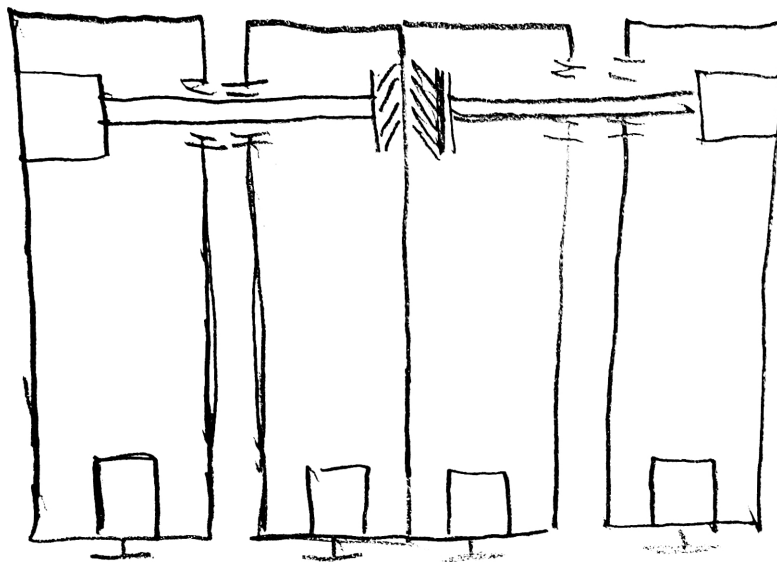
Figur 56: Koncept grå från Morfologisk matris 2. Konceptet har två axlar högt upp. Rotationen skapas av stegmotorer tillsammans med en remanordning och lyftet av linjära aktuatorer. Fötterna är avrundade för att skapa fjädring



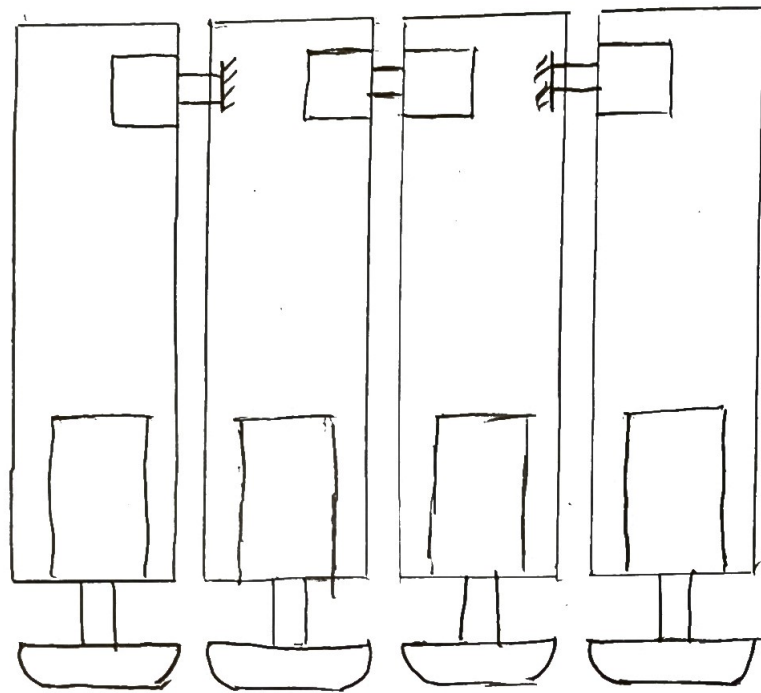
Figur 57: Koncept grön från Morfologisk matris 3. Konceptet har tre axlar i mitten. Rotationen skapas av servomotorer och lyftet av linjära servomotorer. Fötterna är avrundade för att skapa fjädring



Figur 58: Koncept blå från Morfologisk matris 3. Konceptet har tre axlar högt upp. Rotationen skapas av stegmotorer. Det saknas mekanism för både lyftet och fjädring



Figur 59: Koncept röd från Morfologisk matris 4. Konceptet har två axlar högt upp. Rotationen skapas av stegmotorer och lyftet av magnetism. Fötterna saknar fjädring



Figur 60: Koncept blå från Morfologisk matris 4. Konceptet har tre axlar högt upp. Rotationen skapas av stegmotorer och lyftet av linjära aktuatorer. Fötterna är avrundade för att skapa fjädring

A.4 Elimineringssmatris

Chalmers		Elimineringsmatris för: LARS - Gestaltning och konstruktion av en robot inspirerad av TARS från filmen Interstellar				
Utfärdad av: EEN-X 15-18 89		Skapad: 2018-02-06 Modifierad: 2018-02-08				
Elimineringskriterier (+) Ja (-) Nej (?) Mer information krävs Notera: M(siffra) är benämning på vilken morfologisk matris som anges A: Uppfyller alla krav B: Uppfyller alla önskelmål C: Realiserbar D: Inom kostnadsramen						
Lösning	A	B	C	D	Kommentar	Beslut
M1-Gul	(+)	(+)	(+)	(+)	Kan vara problem med osymmetrisk axel.	Godkänd
M1-Röd	(+)	(+)	(+)	(+)	Magnetism komplext.	Godkänd
M1-Grön	(+)	(+)	(-)	(+)	Klämma onödigt med två axlar.	Underkänd
M1-Blå	(+)	(+)	(+)	(+)	Kugghjul kan vara svårt att implementera	Godkänd
M1-Grå	(+)	(+)	(+)	(+)	H5 är komplex och tidskrävande, egenbyggd motor	Godkänd
M2-Rosa	(+)	(+)	(+)	(+)	Fullt duglig	Godkänd
M2-Blå	(+)	(+)	(+)	(+)	G3 kan medföra komplexitet	Godkänd
M2-Gul	(-)	(+)	(+)	(+)	H7 är svårt att realisera och relativt dålig funktion	Underkänd
M2-Grön	(+)	(+)	(+)	(+)	Kugghjul kan vara svårt att implementera	Godkänd
M2-Grå	(+)	(+)	(+)	(+)	Fullt duglig	Godkänd
M3-Gul	(+)	(+)	(+)	(+)	H5 är komplex och tidskrävande, egenbyggd motor	Godkänd
M3-Röd	(+)	(+)	(+)	(+)	Fullt duglig	Godkänd
M3-Grön	(+)	(+)	(+)	(+)	Fullt duglig	Godkänd
M3-Blå	(+)	(+)	(?)	(+)	Tveksam möjlighet till rörelse	Godkänd
M3-Grå	(+)	(+)	(+)	(+)	H5 är komplex och tidskrävande, egenbyggd motor	Godkänd
M4-Gul	(+)	(+)	(+)	(+)	Magnetism komplext.	Godkänd
M4-Röd	(+)	(+)	(+)	(+)	Magnetism komplext.	Godkänd
M4-Grön	(-)	(+)	(+)	(+)	H7 är svårt att realisera och relativt dålig funktion	Underkänd
M4-Blå	(+)	(+)	(+)	(+)	Fullt duglig	Godkänd
M4-Grå	(+)	(+)	(+)	(+)	Fullt duglig	Godkänd

Figur 61: Elimineringssmatris

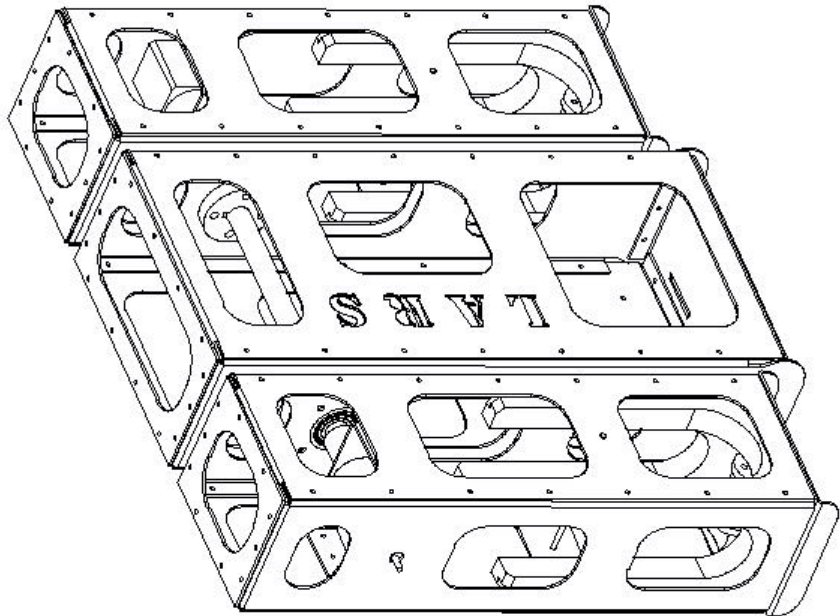
A.5 Pughmatris

Chalmers	Pughmatris 1: LARS - Gestaltning och konstruktion av en robot inspirerad av TARS från filmen Interstellar																	
Utfärdare: EENX 15-18-89			Skapad: 2018-02-08 Modifierad: 2018-02-08															
Kriterier	Alternativ																	
	M4 Blå	M1 Gul	M1 Röd	M1 Blå	M1 Grå	M2 Rosa	M2 Grön	M2 Blå	M2 Grå	M3 Gul	M3 Röd	M3 Blå	M3 Grå	M3 Grön	M4 Gul	M4 Röd	M4 Grå	
Konstruktion	R E F E R E N S																	
Tillverkning		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	+	-	
Underhåll		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	0	-	+	-	
Antal komponenter		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	+	-	
Antal delsystem		0	-	0	0	0	0	0	-	0	-	0	+	0	0	0	+	0
Funktioner																		
Antal gångsätt som liknar TARS		-	0	0	+	+	0	+	-	+	0	-	-	+	0	-	+	
Stabil - dynamiskt		0	-	+	+	+	-	+	0	-	-	-	-	+	0	-	-	
Stabil - statiskt		+	0	+	+	+	-	+	0	+	-	+	+	+	+	+	+	
Fixera benpar		-	-	0	0	0	0	-	+	0	0	0	+	+	0	+	-	
Risker																		
Outvecklad teknik		0	0	0	-	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	
Inom kompetensområdet		0	0	0	-	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	
Kostnad																		
Inköpskostnad		0	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	+	0	-	0	+	-
Driftskostnad		+	-	+	0	+	-	0	0	0	0	0	+	0	0	0	0	-
Resultat																		
Antal +		2	0	3	3	4	0	3	1	2	0	7	2	4	1	7	2	
Antal 0		5	4	5	3	4	5	3	7	2	6	3	5	5	8	3	3	
Antal -		5	8	4	6	4	7	6	4	8	6	2	5	3	3	2	7	
Nettovärde		-3	-8	-1	-3	0	-7	-3	-3	-6	-6	5	-3	1	-2	5	-5	
Rangordning		4	8	17	6	8	4	16	8	8	14	14	1	8	3	7	13	
Vidareutveckling		Ja	Nej	Nej	Ja	Nej	Ja	Nej	Nej	Nej	Nej	Ja	Nej	Ja	Nej	Ja	Nej	
Beslut	Tar vidare M4-blå, M1-blå, M2-rosa, M3-blå, M3-grön, M4-röd																	

Figur 62: Pughmatris

B Ritningar av komponenter

B.1 Helhet



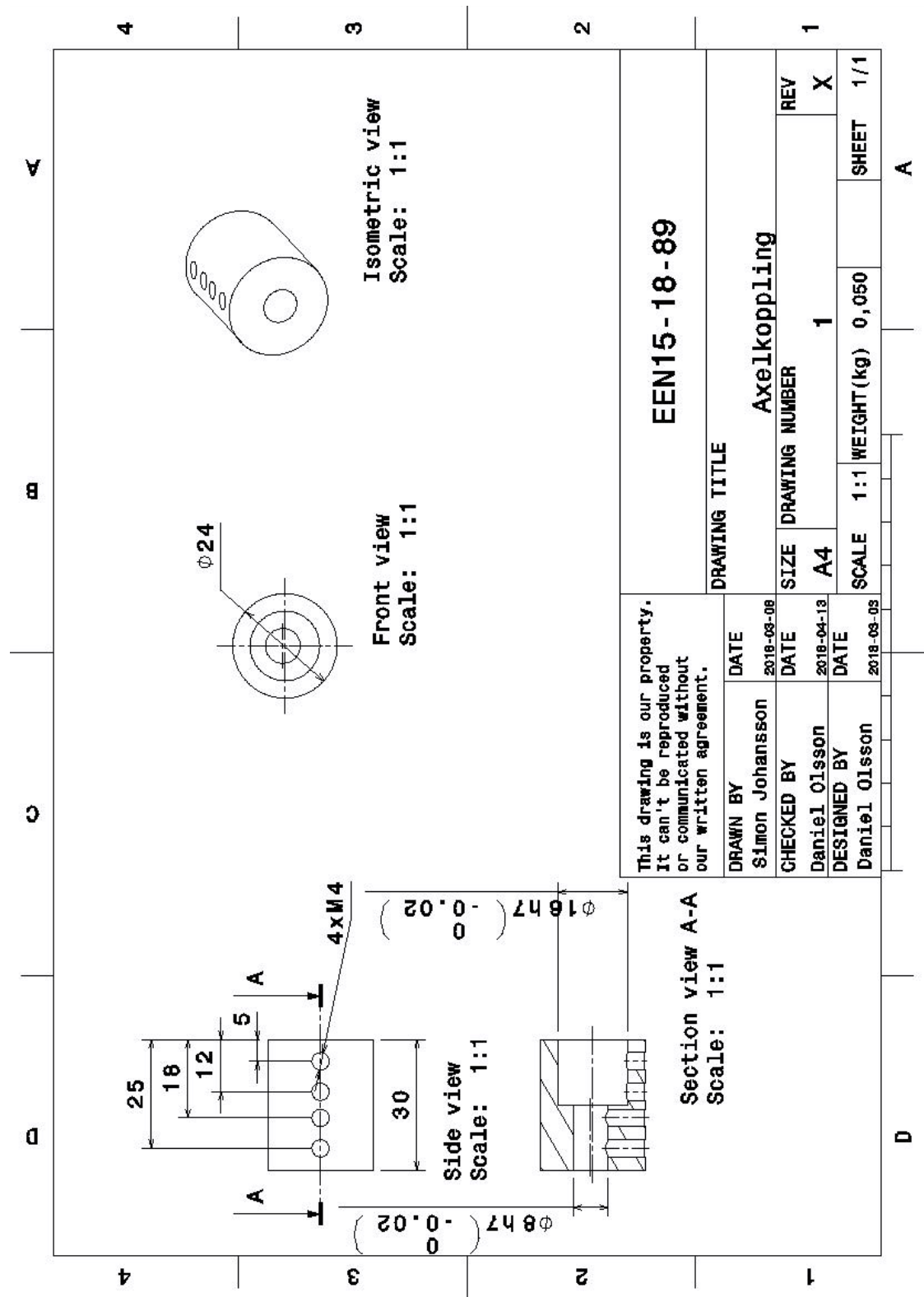
Isometric view
Scale: 1:4

Quantity	Part Number
2	part1a
1	Frameida mitten
1	Topplöck mitten
2	Topplöck ytter
2	Inside ytter
4	Fram- och baksida ytter
2	Yttersida ytter
2	Aktuatorstång
2	EXTENSION_10404_50MM, aktuatordel
2	CLAMBSHELL_BOT_10417, aktuatordel
2	CLAMBSHELL_TOP_10416, aktuatordel
18	FASTENER_10427, aktuatordel
2	CLAMBSHELL_BOT_10854, aktuatordel
2	CLAMBSHELL_TOP_10853, aktuatordel
2	GUIDE_10428, aktuatordel
2	NUT_10419, aktuatordel
2	SHAFT_10408_50MM, aktuatordel
2	PLUG_10428, aktuatordel
4	GROMMET_3_HOLE, aktuatordel
2	Bipolar Stepper Motor NEMA17
2	8202-Z_PART1-8202-Z_PART1
2	Kullager, innerring
2	8202-Z_PART2-8202-Z_PART2
2	Kullager, ytterring
18	8202-Z_PART3-8202-Z_PART3
2	Kullager, kula
2	Axelkoppling
2	EngineMount
2	Lagerhus
2	Forfäste
2	Fot undersida
1	Bakside mitten
1	Botten mitten
2	Kliförband
1	Axel

Figur 63: Helhetsbild

B.2 Axelkoppling

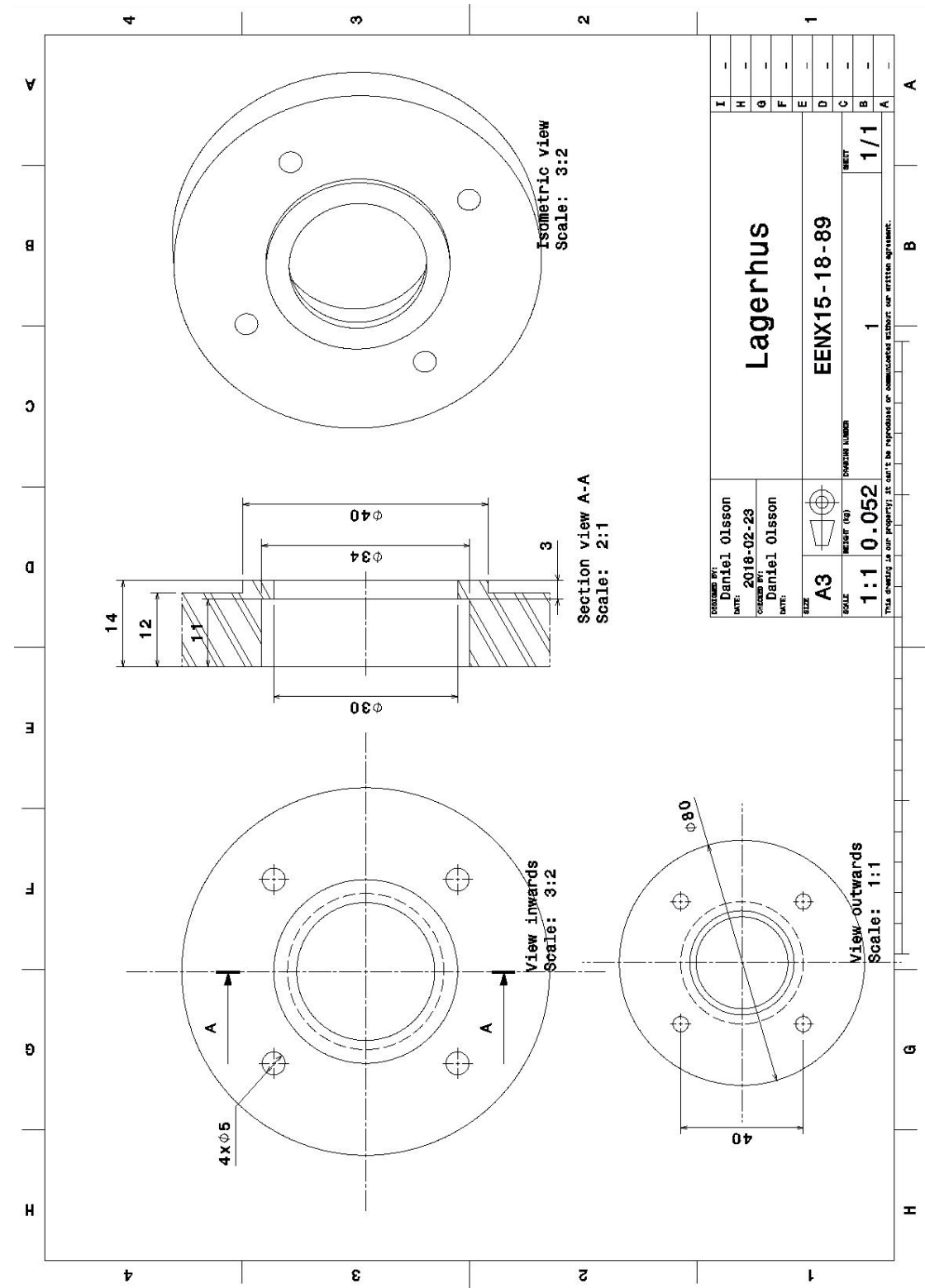
Nedan visas CAD-ritning på de två axelkopplingarna som har för uppgift att överföra vridmoment mellan stepmotor och genomgående axel.



Figur 64: Axelkoppling

B.3 Lagerhus

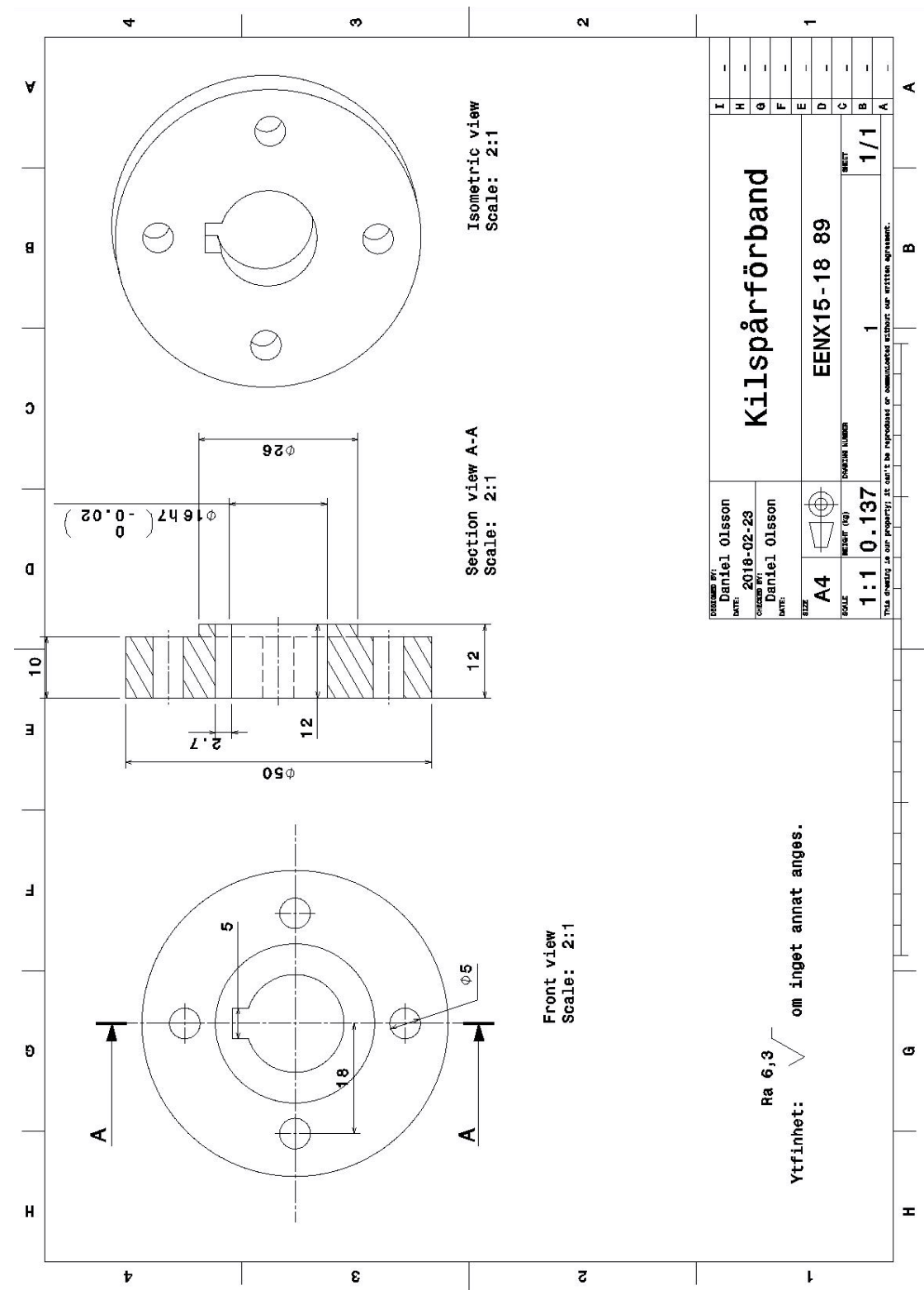
Nedan visas CAD-ritning av lagerhuset som har för uppgift att positionsfixera benen i förhållande till varandra och ta upp radiella laster.



Figur 65: Lagerhus

B.4 Kilspårförband

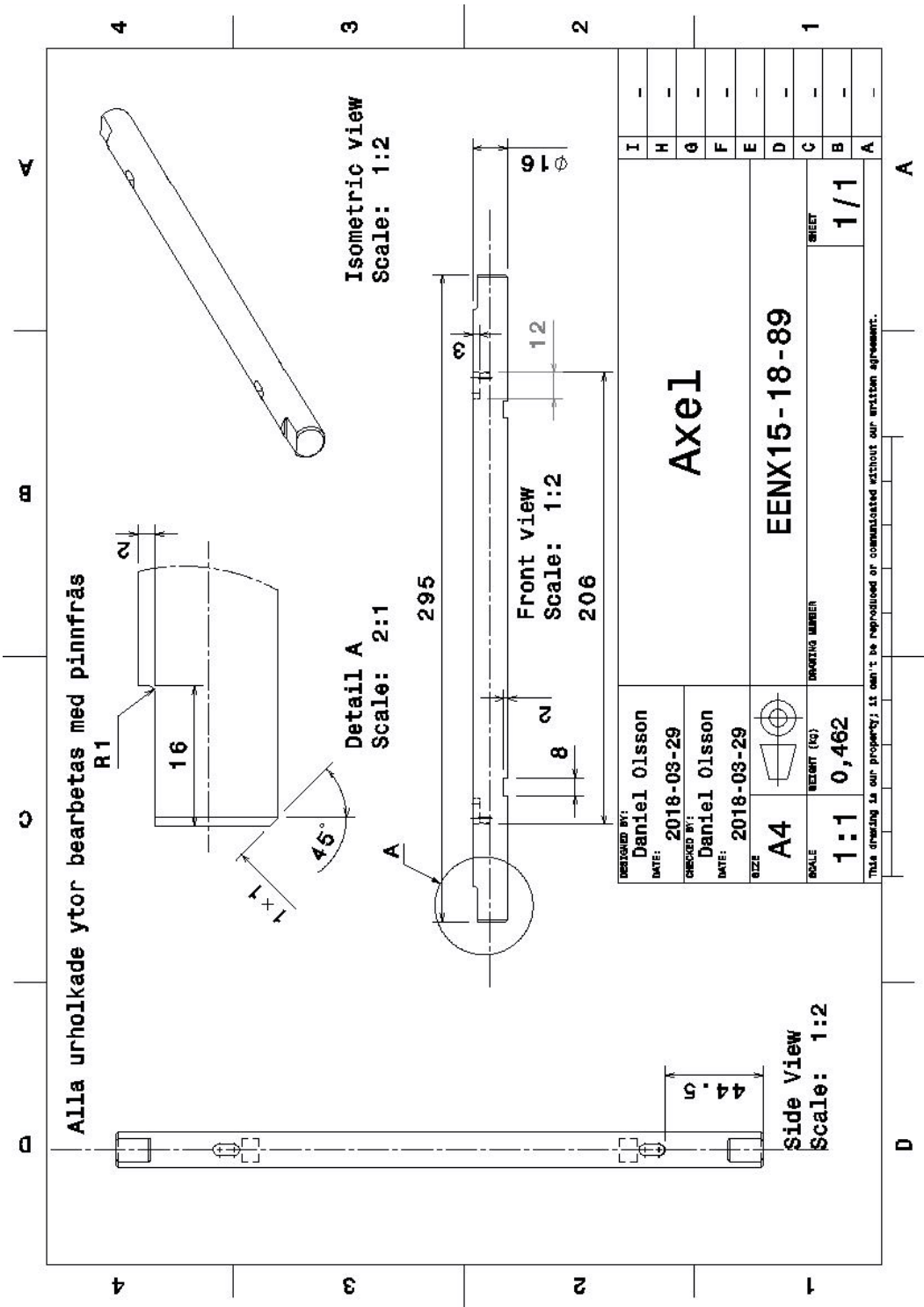
Nedan visas CAD-ritning av kilspårförbandet som har för uppgift att fixera vinkeln mellan innerbenet och genomgående axel.



Figur 66: Kilspårförband

B.5 Axel

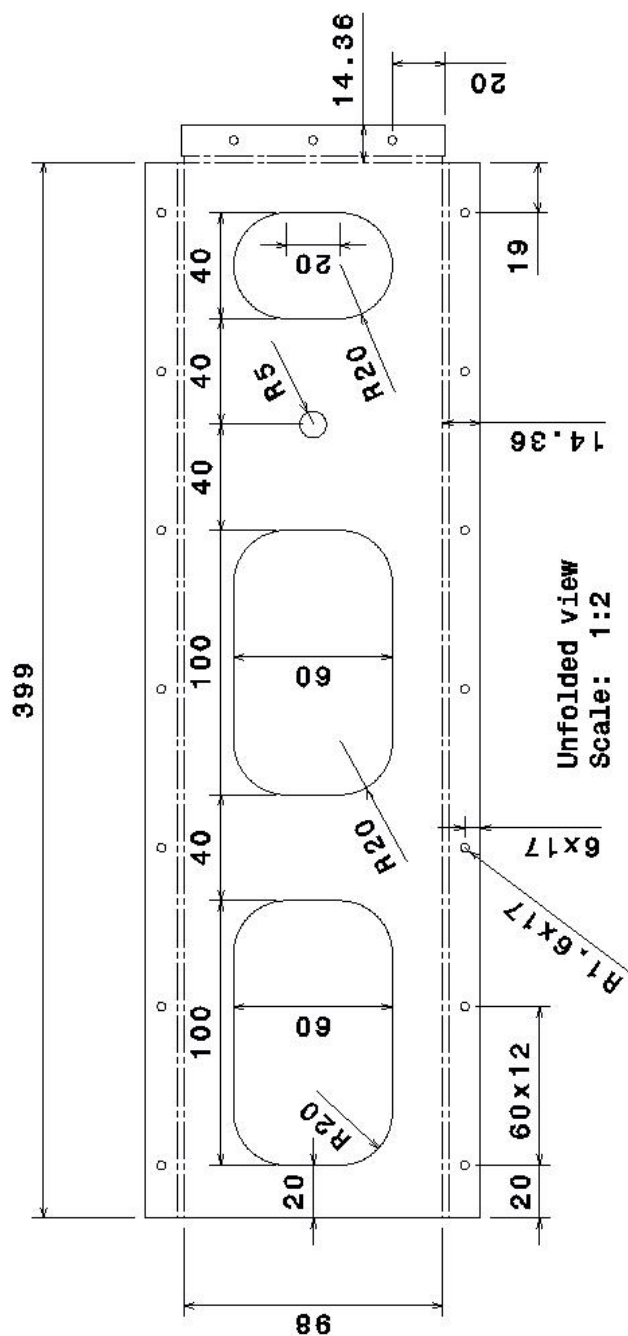
Nedan visas CAD-ritning på robotens genomgående axel som har för uppgift att koppla samman benen och överföra vridmoment dem emellan, se Figur 67.



Figur 67: Genomgående axel

B.6 Yttre sida av ytterbenet

Detta är plåten som sitter ytterst på båda sidorna om LARS.

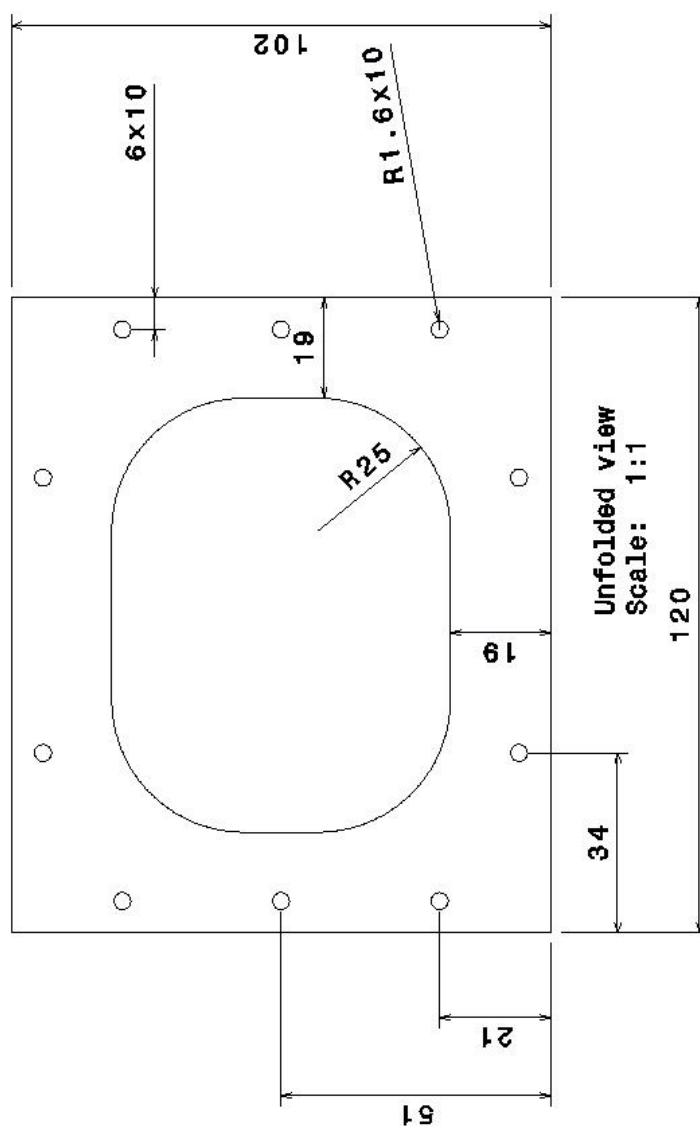


Aluminium med tjockleken 2mm.
Bockningsradie 1mm.
Delen är spegelsymmetrisk runt den horisontella axeln.

Figur 68: Yttre sida av ytterben

B.7 Övre plåtdel av ytterbenet

Detta är plåten som sitter högst upp på ytterbenen på båda sidorna om LARS.

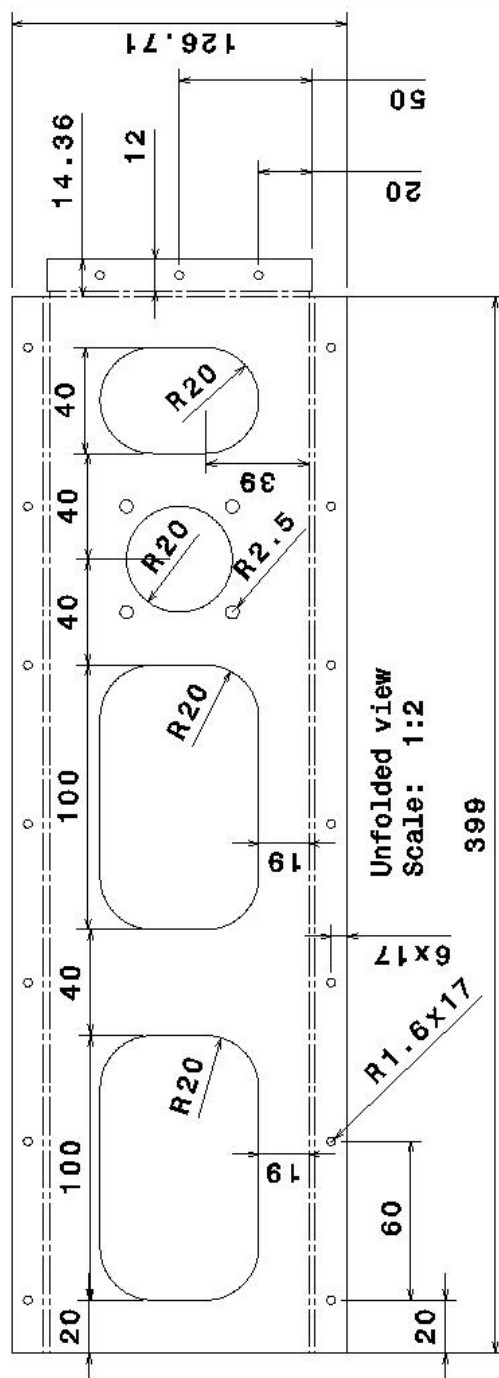


Alumiinium med tjocklek på 2mm.
Delen är spegelsymmetrisk horisontellt och vertikalt.

Figur 69: Toppbit av ytterben

B.8 Insida av ytterben

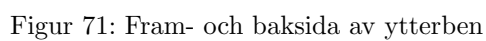
Ritningen visar den plåtdel på ytterbenen som ligger mot mittenbenet.



Aluminium med tjockleken 2mm.
Bockningsradie 1mm.
Delen är spegelsymmetrisk horisontellt.

Figur 70: Inre sidan av ytterben

Nedan visas ritningen för fram- och baksidan av de ytterbenen.

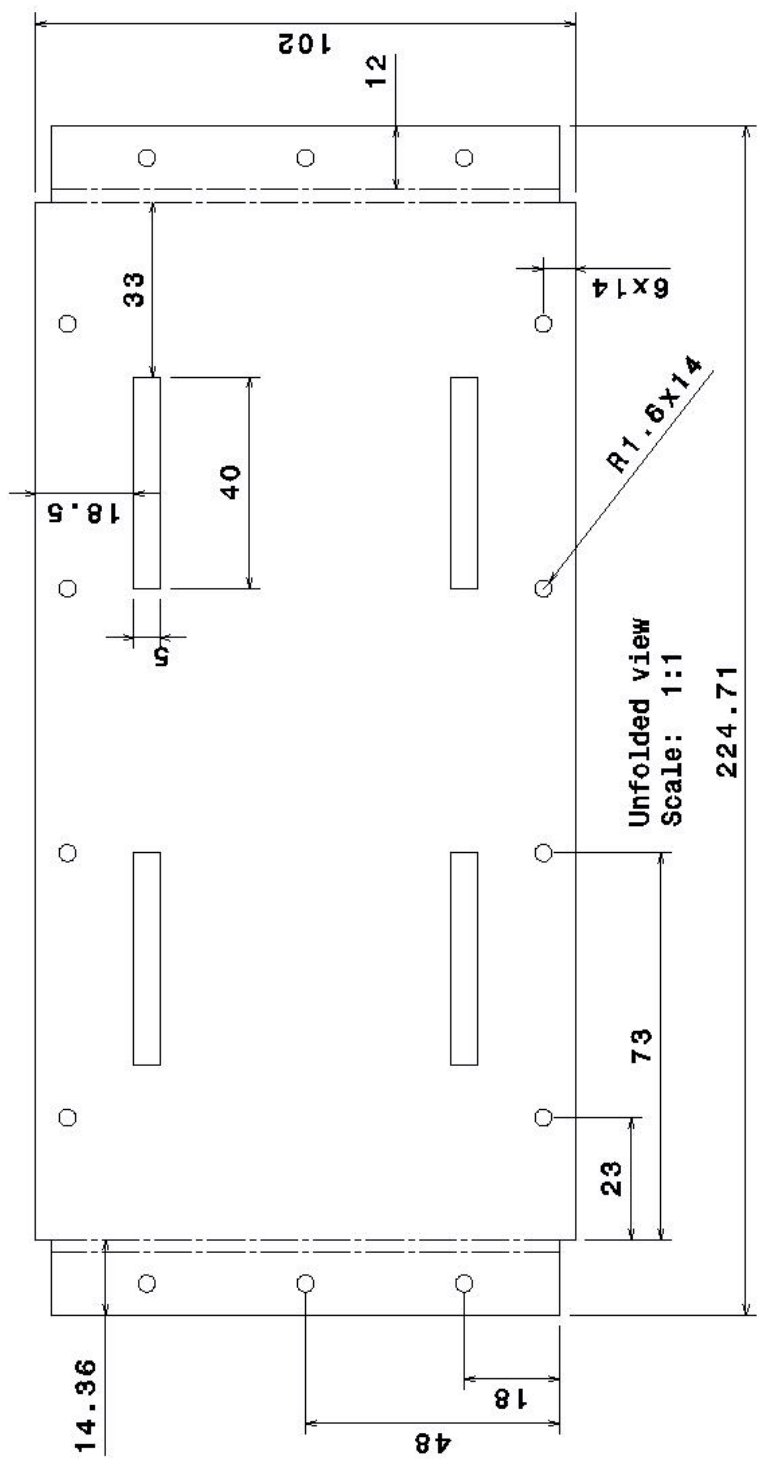


Detta är plåten som är på baksidan av mittenbenet.



B.11 Bottenplåt av mittenben

Ritningen visar plåten som sitter i botten av mittenbenet.

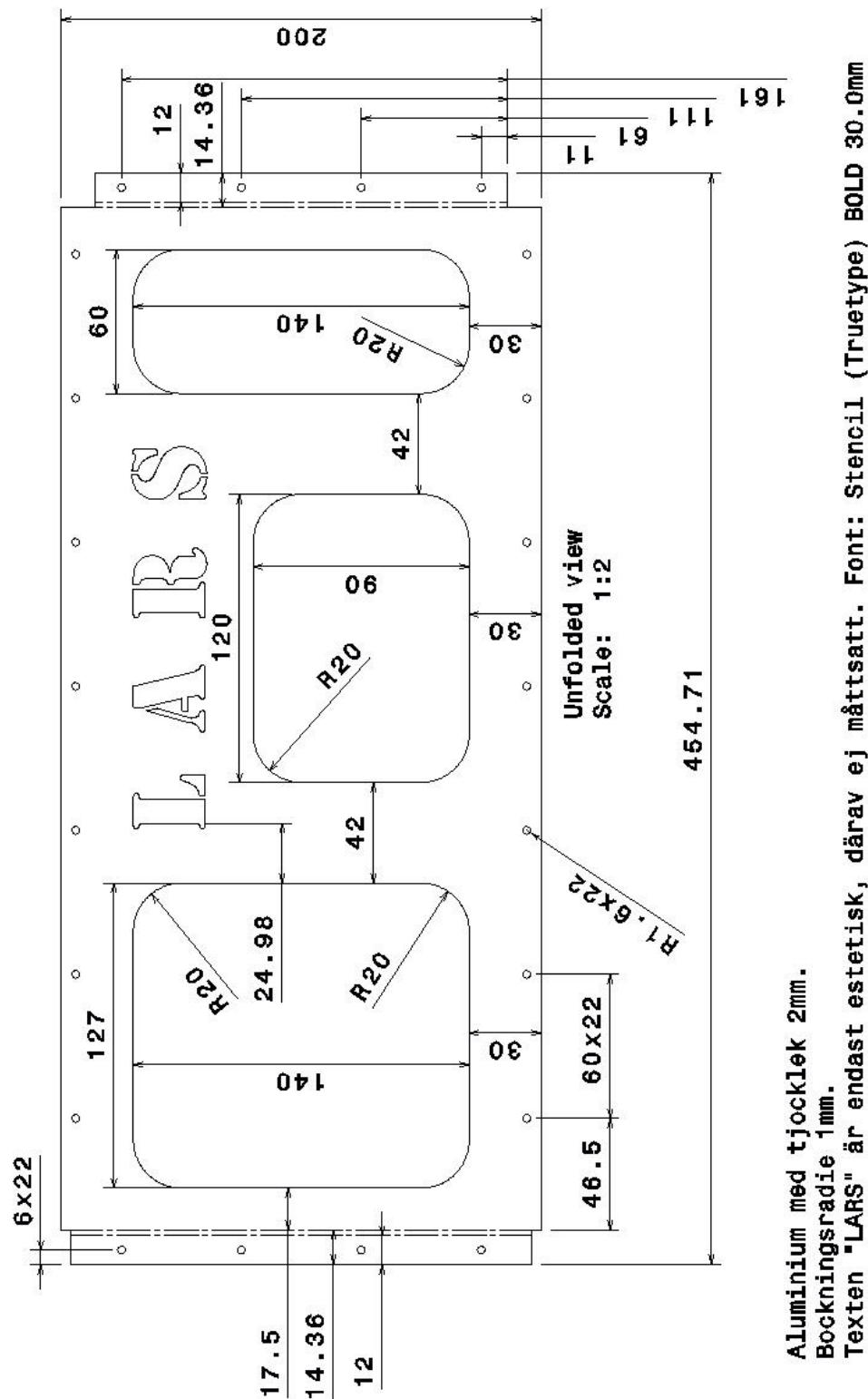


Aluminium med tjockleken 2mm.
Böckningsradie 1mm.
Delen är spegelsymmetrisk vertikalt och horisontellt.

Figur 73: Bottendel av innerben

B.12 Framsida av mittenben

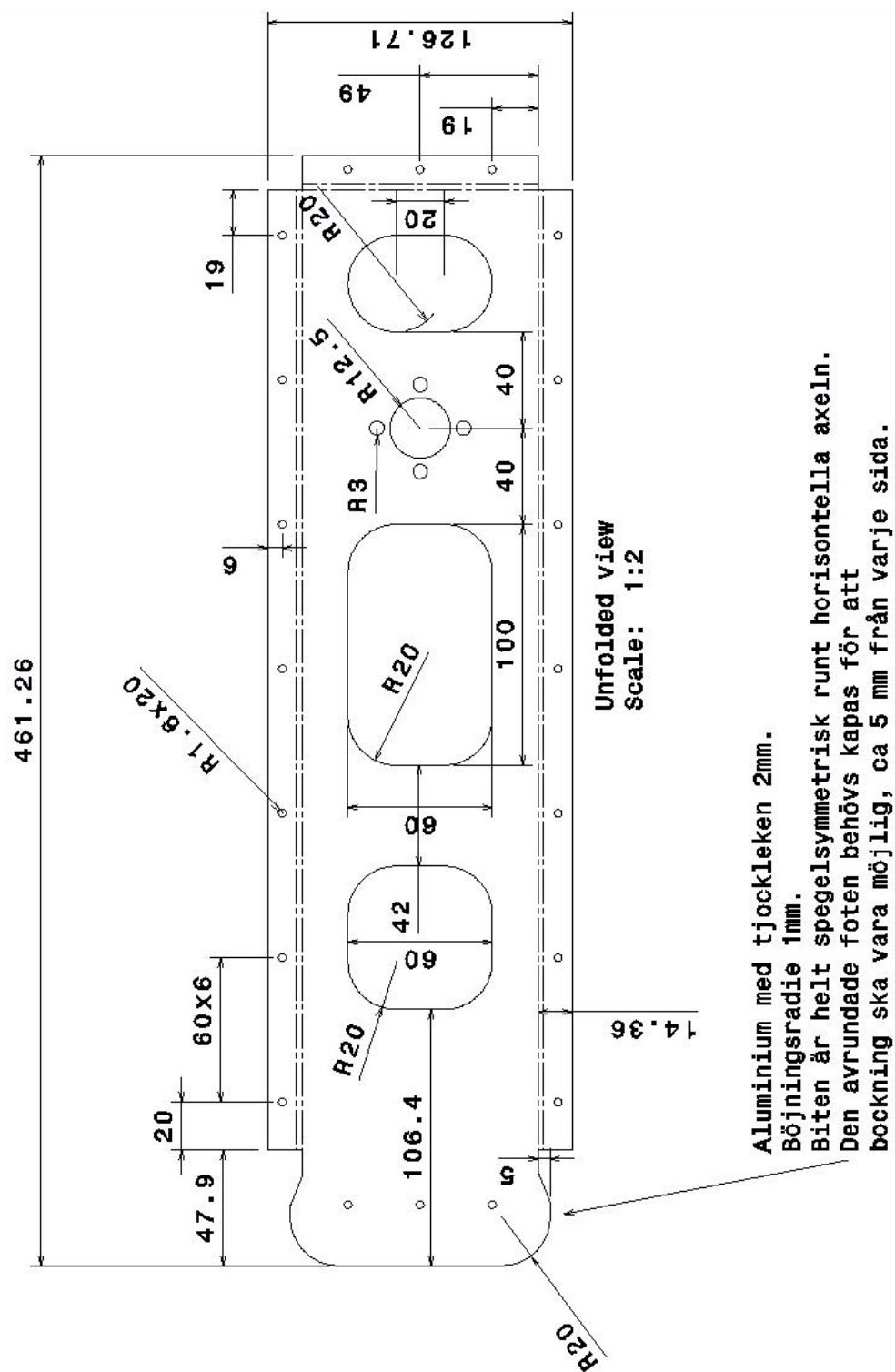
Nedan visas plåten som är på framsidan av mittenbenet.



Figur 74: Framsida av innerben

B.13 Sida av mittenben

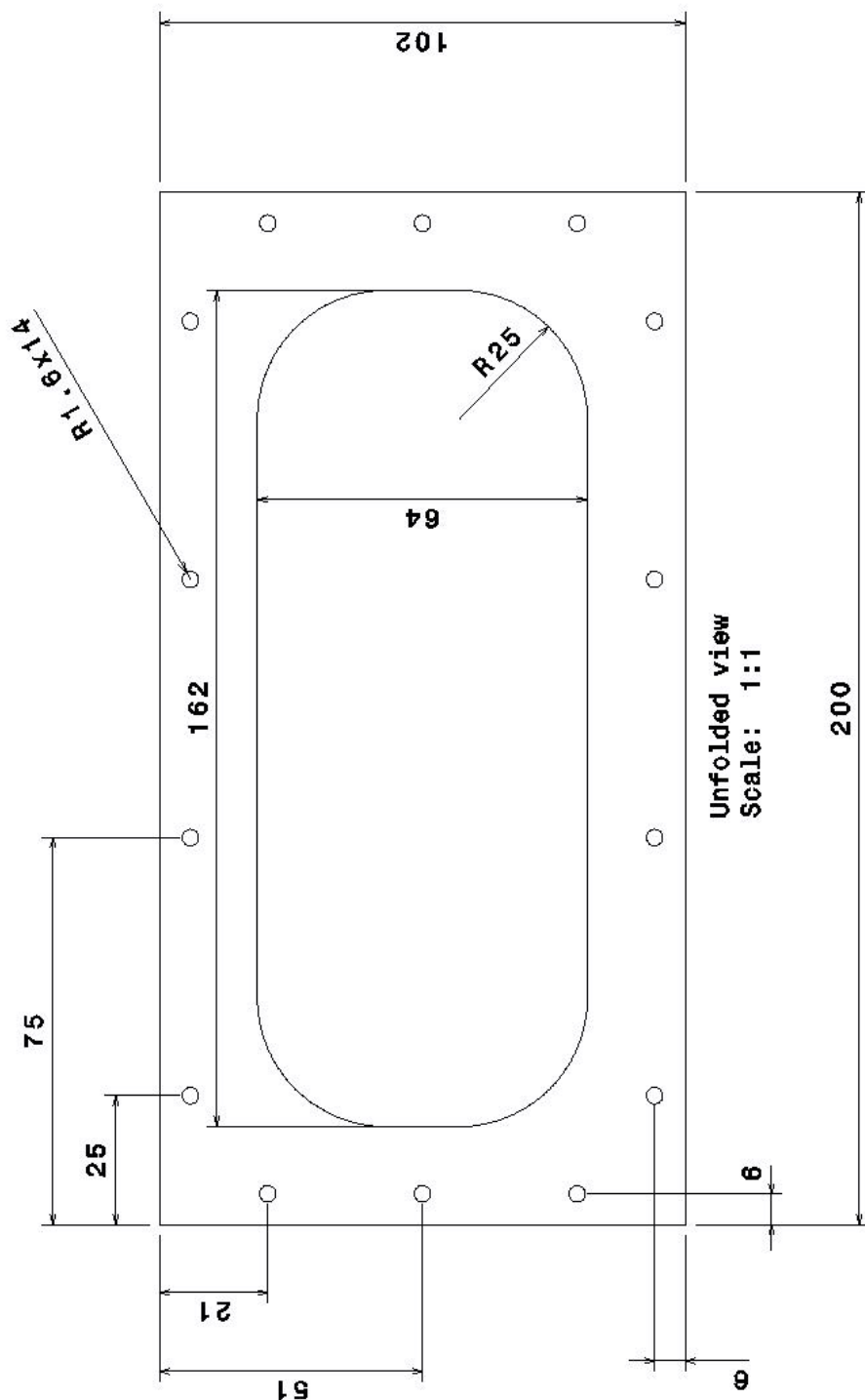
Nedan visas plåten som sitter på sidan av mittenbenet.



Figur 75: Sidodel av innerben

B.14 Toppdel av mittenben

Ritningen visar plåten som som på toppen av mittenbenet.

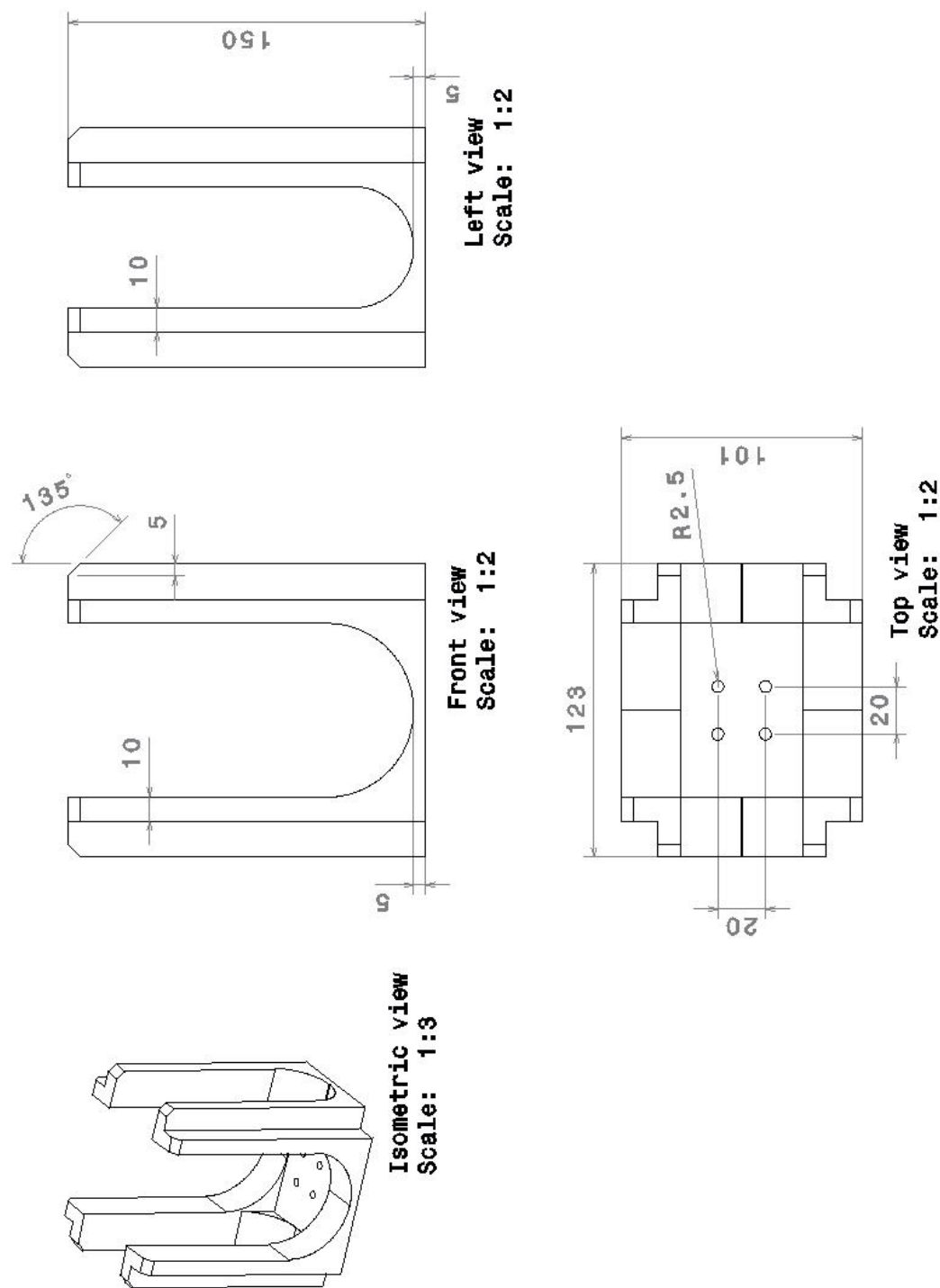


Aluminum med 2mm tjocklek. Delen är spegelsymmetrisk vertikalt och horisontellt.

Figur 76: Toppdel av innerben

B.15 Fotfäste

Nedan visas fotfästet. Den delen som glider in och ut genom ytterbenen för att stabilisera rörelsen.



Figur 77: Fotfäste

C Produktblad

C.1 Stegmotorer

(Phidgets, u. å.)

RB-Phi-210

12V, 1.7A, 416 oz-in Geared Bipolar Stepper Motor



This NEMA-17 motor has an integrated Planetary gearbox with a 26 103/121 :1 ratio. It comes with the rear shaft exposed, so you can mount an encoder or shaft coupler. At 1.7 Amps (maximum current), this stepper motor can produce a maximum torque of 77 kg-cm. However, the gearbox is only rated for 30 kg-cm of continuous torque, and 80 kg-cm for brief overloads. Loading this gearbox stepper beyond the torque rating of the gearbox will shorten its useful life.

Features

- High Torque
- 0.067° Step Angle
- Motor can produce 30 kg-cm holding torque @ 1.7A
- NEMA-17 Bipolar 4-wire
- Rear shaft exposed for compatibility with encoders

Specifications

Motor Properties

- Motor Type: Bipolar Stepper
- Manufacturer Part Number: 42STH38-1684B / 36JXS60K26
- Step Angle: 0.067°
- Step Accuracy: 5 %
- Holding Torque: 30 kg·cm
- Rated Torque: 30 kg·cm
- Maximum Speed (w/1063 Motor Controller): 21 RPM
- Maximum Speed (w/1067 Motor Controller): 174 RPM
- Acceleration at Max Speed (w/1067 Motor Controller): 600000 1/16 steps/sec²

Electrical Properties

- Recommended Voltage: 12 V DC
- Rated Current: 1.7 A
- Coil Resistance: 1.7 Ω

Physical Properties

- Shaft Diameter: 8 mm
- Rear Shaft Diameter: 3.8 mm
- Mounting Plate Size: NEMA - 17
- Weight: 503 g
- Number of Leads: 4
- Wire Length: 300 mm

Gearbox Properties

- Gearbox Type: Planetary
- Gear Ratio: 26 103/121 : 1
- Backlash Error: 1 1/2°
- Maximum Strength of Gears: 30 kg·cm
- Shaft Maximum Axial Load: 49.1 N
- Shaft Maximum Radial Load: 98.1 N

C.2 Linjära aktuatorer

(Actuonix, u. å.)



100mm L16 – Actual Size

Applications

- Robotics
- Consumer appliances
- Toys
- RC vehicles
- Automotive
- Industrial Automation

Miniature Linear Motion Series • L16

Actuonix Motion Devices' unique line of Miniature Linear Actuators enables a new generation of motion-enabled product designs, with capabilities that have never before been combined in a device of this size. These linear actuators are a superior alternative to designing your own push/pull mechanisms.

The L16 actuators are complete, self contained linear motion devices with position feedback for sophisticated position control capabilities, end of stroke limit switches for simple two position automation, or RC servo. Several gear ratios are available to give you varied speed/force configurations.

L16 Specifications

Gearing Option	35:1	63:1	150:1
Peak Power Point	50N @16mm/s	75N @10mm/s	175N @4mm/s
Peak Efficiency Point	24N @24mm/s	38N @15mm/s	75N @7mm/s
Max Speed (no load)	32mm/s	20mm/s	8mm/s
Max Force (lifted)	50N	100N	200N
Back Drive Force	31N	46N	102N
Stroke Option	50mm	100mm	140mm
Mass	56g	74g	84g
Repeatability (-P & LAC)	0.3mm	0.4mm	0.5mm
Max Side Load (extended)	40N	30N	20N
Closed Length (hole to hole)	118mm	168mm	208mm
Feedback Potentiometer	6kΩ±50%	11kΩ±50%	16kΩ±50%
Feedback Linearity	Less than 2.00%		
Input Voltage	"P", "S" Rated at 12VDC. "R" series rated at 6VDC		
Stall Current	650mA @ 12V		
Operating Temperature	-10°C to +50°C		
Audible Noise	60dB @ 45cm		
Ingress Protection	IP-54		
Mechanical Backlash	0.25mm		
Limit Switches	Max. Current Leakage: 8uA		
Maximum Static Force	250N		
Maximum Duty Cycle	20%		

Basis of Operation

The L16 is designed to push or pull a load along its full stroke length. The speed of travel is determined by the load applied. (See the Load Curves). Actuator speed can be reduced by lowering the drive voltage. When power is removed the actuator will hold its position, unless the applied load exceeds the back drive force. Repeated stalling or stalling for more than a few seconds will shorten the life of the actuator significantly. Stalling is when an actuator is pushing a load that it cannot move. Actuators should be tested in each specific application to determine their effective life under those loading conditions and environment.

All data on this sheet is provided for information purposes only and is subject to change.
Purchase and use of Actuonix actuators is subject to our terms and condition as posted here:
<http://www.actuonix.com/terms.asp>



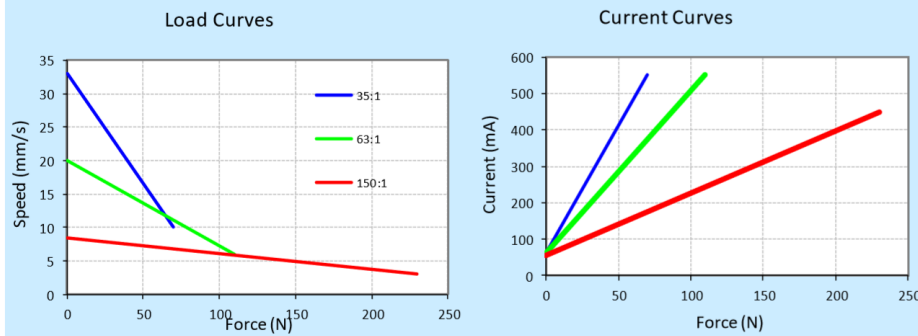
Actuonix Motion Devices Inc.
580 Starling Lane
Victoria, BC, V9E 2A9
Canada

1 (206) 347-9684 phone
1 (888) 225-9198 toll-free
1 (206) 347-9684 fax

sales@actuonix.com
www.actuonix.com

Copyright 2016 © Actuonix Motion Devices Inc.

L16 Specifications



Model Selection

The L16 has 3 configuration choices: Stroke, Gear Ratio and Controller. L16 options are identified according to the following model numbering scheme:

L16-SS-GG-VV-C

Feature	Options
SS: Stroke	50, 100, 140 (mm)
GG: Gear reduction ratio (refer to load curves above)	35, 63, 150 (lower ratios are faster but push less force, and vice versa)
VV: Voltage	12 vdc or 6 vdc (-R only)
C: Controller	P Potentiometer Feedback S Limit Switches R RC Linear Servo

L16 Controller Options

Option S – End of Stroke Limit Switches

WIRING: (see last page for pin numbering)

- 1 - Red – Motor V+
- 2 - Black – Motor V- (Ground)

-S actuators are ideal for manually controlled applications and simple two position automated mechanisms. The -S actuators have limit switches that will turn off power to the motor when the actuator reaches within 0.5mm of the end of stroke. Internal diodes allow the actuator to reverse away from the limit switch. The limit switches cannot be moved once the actuator is manufactured. While voltage is applied to the motor power pins, (1 & 2) the actuator extends. Reverse the polarity and the actuator retracts. This can be accomplished manually with a DPDT switch or relay, or using an H-Bridge circuit. The -S model cannot be used with the LAC control board.

Option P – Potentiometer Position Feedback

WIRING: (see last page for pin numbering)

- 1 - Orange – Feedback Potentiometer negative reference rail
- 2 - Purple – Feedback Potentiometer wiper
- 3 - Red – Motor V+ (6V or 12V)
- 4 - Black – Motor V- (Ground)
- 5 - Yellow – Feedback Potentiometer positive reference rail

-P actuators are suited to automatically controlled positioning systems, but they can also be driven manually. The -P actuators have no built in controller, but do provide an analog position feedback signal that can be input to an external controller. While voltage is applied to the motor power pins, (3 & 4) the actuator extends. Reverse the polarity and the actuator retracts. This can be accomplished manually with a DPDT switch or relay, or using an H-Bridge circuit. Position of the actuator stroke can be monitored via the internal linear potentiometer. Provide any stable low and high reference voltage on pins 1 & 5, then read the position signal on pin 2. The voltage on pin 2 will vary linearly between the two reference voltages in proportion to the position of the actuator stroke.

The L16 -P actuator can be used as a linear servo by connecting the actuator to an external controller such as the LAC board offered by Actuonix. This control board reads the position signal from the L16, compares it with your input control signal then commands the actuator to move via an on-board H-bridge circuit. The LAC allows any one of the following control inputs: Analog 0-3.3V or 4-20mA, or Digital 0-5V PWM, 1-2ms Standard RC, or USB. The RC input effectively transforms your L16 into a linear servo, which is a direct replacement for any common hobby servo used in RC toys and robotics. Refer to the LAC datasheet for more details.



Actuonix Motion Devices Inc.
580 Starling Lane
Victoria, BC, V9E 2A9
Canada

1 (206) 347-9684 phone
1 (888) 225-9198 toll-free
1 (206) 347-9684 fax

sales@actuonix.com
www.actuonix.com

Option R – RC Linear Servo

WIRING: (see last page for pin numbering)

- 1 - White – **RC input signal** (RC-servo compatible)
- 2 - Red – **Power** (+6 VDC)
- 3 - Black – **Ground**

Note: Reversing the polarity of pins 2 and 3 may permanently damage the actuator

-R actuators are ideally suited to use in robotics and radio control models. The -R actuators or 'linear servos' are a direct replacement for regular radio controlled hobby servos. The desired actuator position is input to the actuator on lead 1 as a positive 5 Volt pulse width signal. A 1.0 ms pulse commands the controller to fully retract the actuator, and a 2.0 ms pulse signals it to fully extend. If the motion of the actuator, or of other servos in your system, seems erratic, place a 1–4Ω resistor in series with the actuator's red V+ lead wire.

L16 -R Linear Servos are the only 6 volt models in the L16 range because they are designed to work with typical RC receivers and battery packs. Consequently they also are compatible with Arduino control boards, VEX Microcontrollers and many other similar boards designed for robotics.

Ordering

Small quantity orders can be placed directly online at www.actuonix.com. Purchase orders, volume quotes, and custom requests can be sent to sales@actuonix.com.

Each actuator ships with two mounting brackets, #8-32 mounting hardware and male connector pins. The cable length is approximately 300mm and connector is a 0.1" pitch female socket connector.

Custom Options

Contact Actuonix for quotes and lead-times on any non-standard customizations. Typically we can modify the stroke, limit switch positions, cable length and connector on a minimum order quantity of 500 pieces.

Any modifications requiring mold changes will involve higher MOQ and/or NRE fees.

Accessories

Visit www.actuonix.com for compatible accessories including cable extensions, DPDT switches and relays, position indicators and power supplies.

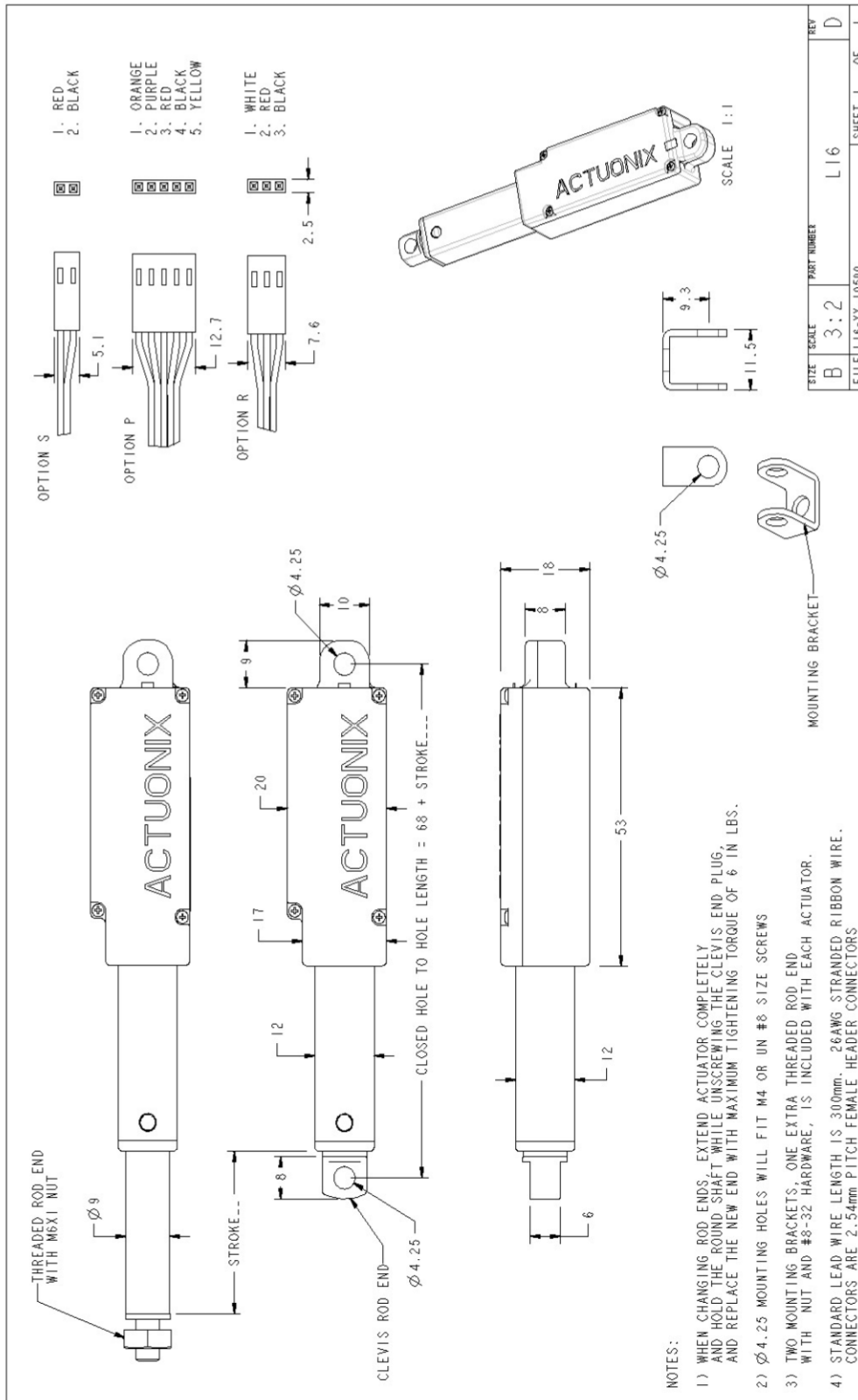
Copyright 2016 © Actuonix Motion Devices Inc.



Actuonix Motion Devices Inc
580 Stirling Lane
Victoria, BC, V9E 2A9
Canada

1 (206) 347-9684 phone
1 (888) 225-9198 toll-free
1 (206) 347-9684 fax

sales@actuonix.com
www.actuonix.com



Copyright 2016 © Actunox Motion Devices Inc.

ACTUONIX
MOTION DEVICES INC.

Actunox Motion Devices Inc
580 Stirling Lane
Victoria, BC, V9E 2A9
Canada

1 (206) 347-9684 phone
1 (888) 225-9198 toll-free
1 (206) 347-9684 fax

sales@actunox.com
www.actunox.com

REV D September 2016

All data on this sheet is provided for information purposes only and is subject to change.
Purchase and use of Actunox actuators is subject to our terms and condition as posted
here: <http://www.actunox.com/terms.asp>

C.3 Mikrokontroller

(mantech, u. ä.)

Technical Specification

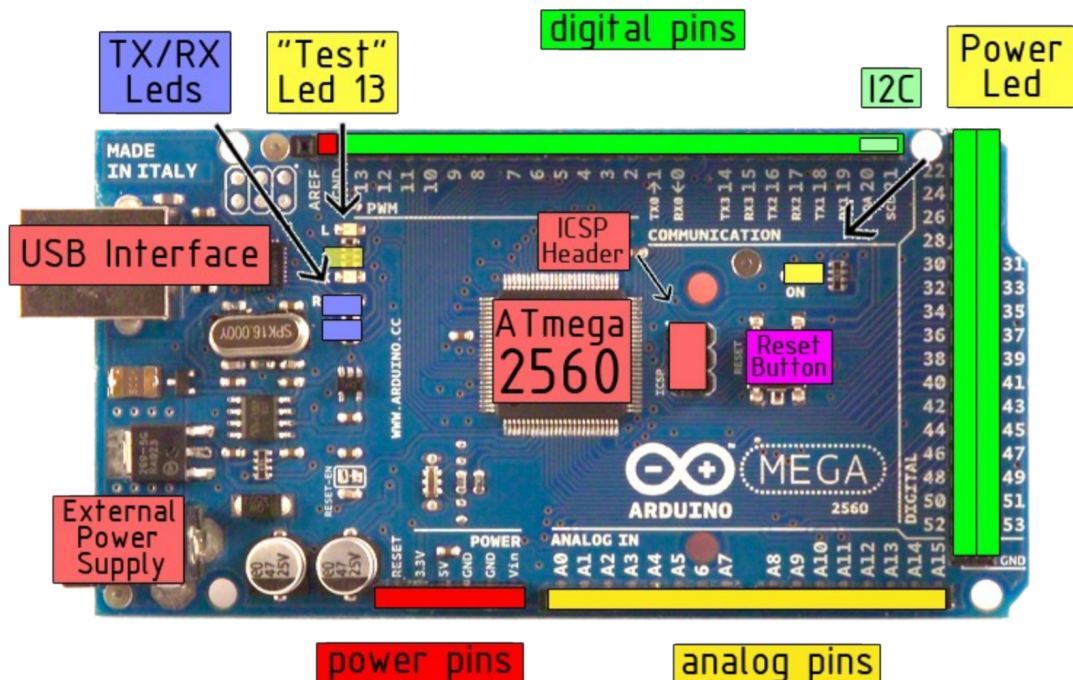


EAGLE files: [arduino-mega2560-reference-design.zip](#) Schematic: [arduino-mega2560-schematic.pdf](#)

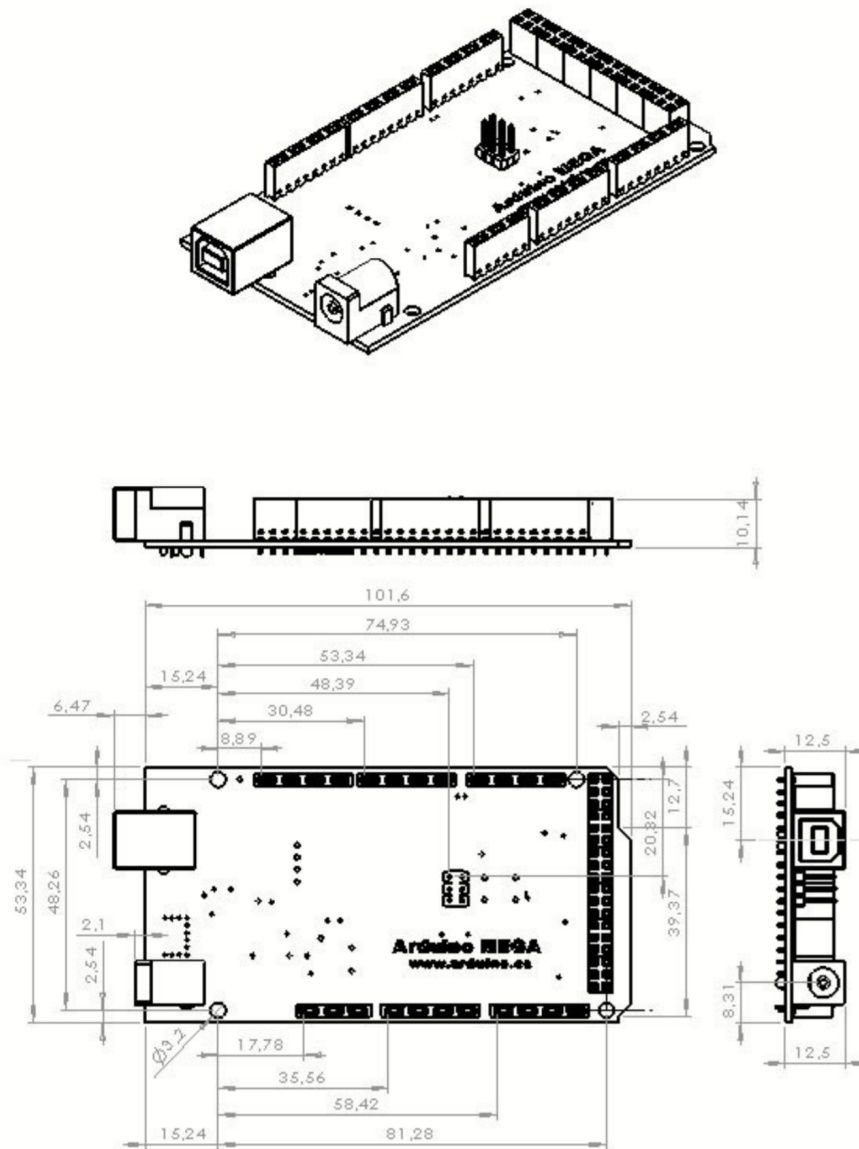
Summary

Microcontroller	ATmega2560
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	54 (of which 14 provide PWM output)
Analog Input Pins	16
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	256 KB of which 8 KB used by bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Speed	16 MHz

the board



Dimensioned Drawing



C.4 Sensorer

(haoyueelectronics, u. ä.)

	MPU-6000/MPU-6050 Product Specification	Document Number: PS-MPU-6000A-00 Revision: 3.3 Release Date: 5/16/2012
---	--	--

3 Product Overview

3.1 MPU-60X0 Overview

MotionInterface™ is becoming a “must-have” function being adopted by smartphone and tablet manufacturers due to the enormous value it adds to the end user experience. In smartphones, it finds use in applications such as gesture commands for applications and phone control, enhanced gaming, augmented reality, panoramic photo capture and viewing, and pedestrian and vehicle navigation. With its ability to precisely and accurately track user motions, MotionTracking technology can convert handsets and tablets into powerful 3D intelligent devices that can be used in applications ranging from health and fitness monitoring to location-based services. Key requirements for MotionInterface enabled devices are small package size, low power consumption, high accuracy and repeatability, high shock tolerance, and application specific performance programmability – all at a low consumer price point.

The MPU-60X0 is the world's first integrated 6-axis MotionTracking device that combines a 3-axis gyroscope, 3-axis accelerometer, and a Digital Motion Processor™ (DMP) all in a small 4x4x0.9mm package. With its dedicated I²C sensor bus, it directly accepts inputs from an external 3-axis compass to provide a complete 9-axis MotionFusion™ output. The MPU-60X0 MotionTracking device, with its 6-axis integration, on-board MotionFusion™, and run-time calibration firmware, enables manufacturers to eliminate the costly and complex selection, qualification, and system level integration of discrete devices, guaranteeing optimal motion performance for consumers. The MPU-60X0 is also designed to interface with multiple non-inertial digital sensors, such as pressure sensors, on its auxiliary I²C port. The MPU-60X0 is footprint compatible with the MPU-30X0 family.

The MPU-60X0 features three 16-bit analog-to-digital converters (ADCs) for digitizing the gyroscope outputs and three 16-bit ADCs for digitizing the accelerometer outputs. For precision tracking of both fast and slow motions, the parts feature a user-programmable gyroscope full-scale range of ±250, ±500, ±1000, and ±2000°/sec (dps) and a user-programmable accelerometer full-scale range of ±2g, ±4g, ±8g, and ±16g.

An on-chip 1024 Byte FIFO buffer helps lower system power consumption by allowing the system processor to read the sensor data in bursts and then enter a low-power mode as the MPU collects more data. With all the necessary on-chip processing and sensor components required to support many motion-based use cases, the MPU-60X0 uniquely enables low-power MotionInterface applications in portable applications with reduced processing requirements for the system processor. By providing an integrated MotionFusion output, the DMP in the MPU-60X0 offloads the intensive MotionProcessing computation requirements from the system processor, minimizing the need for frequent polling of the motion sensor output.

Communication with all registers of the device is performed using either I²C at 400kHz or SPI at 1MHz (MPU-6000 only). For applications requiring faster communications, the sensor and interrupt registers may be read using SPI at 20MHz (MPU-6000 only). Additional features include an embedded temperature sensor and an on-chip oscillator with ±1% variation over the operating temperature range.

By leveraging its patented and volume-proven Nasiri-Fabrication platform, which integrates MEMS wafers with companion CMOS electronics through wafer-level bonding, InvenSense has driven the MPU-60X0 package size down to a revolutionary footprint of 4x4x0.9mm (QFN), while providing the highest performance, lowest noise, and the lowest cost semiconductor packaging required for handheld consumer electronic devices. The part features a robust 10,000g shock tolerance, and has programmable low-pass filters for the gyroscopes, accelerometers, and the on-chip temperature sensor.

For power supply flexibility, the MPU-60X0 operates from VDD power supply voltage range of 2.375V-3.46V. Additionally, the MPU-6050 provides a VLOGIC reference pin (in addition to its analog supply pin: VDD), which sets the logic levels of its I²C interface. The VLOGIC voltage may be 1.8V±5% or VDD.

The MPU-6000 and MPU-6050 are identical, except that the MPU-6050 supports the I²C serial interface only, and has a separate VLOGIC reference pin. The MPU-6000 supports both I²C and SPI interfaces and has a single supply pin, VDD, which is both the device's logic reference supply and the analog supply for the part. The table below outlines these differences:

	MPU-6000/MPU-6050 Product Specification	Document Number: PS-MPU-6000A-00 Revision: 3.3 Release Date: 5/16/2012
---	--	--

Primary Differences between MPU-6000 and MPU-6050

Part / Item	MPU-6000	MPU-6050
VDD	2.375V-3.46V	2.375V-3.46V
VLOGIC	n/a	1.71V to VDD
Serial Interfaces Supported	I ² C, SPI	I ² C
Pin 8	/CS	VLOGIC
Pin 9	AD0/SDO	AD0
Pin 23	SCL/SCLK	SCL
Pin 24	SDA/SDI	SDA

	MPU-6000/MPU-6050 Product Specification	Document Number: PS-MPU-6000A-00 Revision: 3.3 Release Date: 5/16/2012
---	--	--

5 Features

5.1 Gyroscope Features

The triple-axis MEMS gyroscope in the MPU-60X0 includes a wide range of features:

- Digital-output X-, Y-, and Z-Axis angular rate sensors (gyroscopes) with a user-programmable full-scale range of ± 250 , ± 500 , ± 1000 , and $\pm 2000^\circ/\text{sec}$
- External sync signal connected to the FSYNC pin supports image, video and GPS synchronization
- Integrated 16-bit ADCs enable simultaneous sampling of gyros
- Enhanced bias and sensitivity temperature stability reduces the need for user calibration
- Improved low-frequency noise performance
- Digitally-programmable low-pass filter
- Gyroscope operating current: 3.6mA
- Standby current: 5 μ A
- Factory calibrated sensitivity scale factor
- User self-test

5.2 Accelerometer Features

The triple-axis MEMS accelerometer in MPU-60X0 includes a wide range of features:

- Digital-output triple-axis accelerometer with a programmable full scale range of $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ and $\pm 16g$
- Integrated 16-bit ADCs enable simultaneous sampling of accelerometers while requiring no external multiplexer
- Accelerometer normal operating current: 500 μ A
- Low power accelerometer mode current: 10 μ A at 1.25Hz, 20 μ A at 5Hz, 60 μ A at 20Hz, 110 μ A at 40Hz
- Orientation detection and signaling
- Tap detection
- User-programmable interrupts
- High-G interrupt
- User self-test

5.3 Additional Features

The MPU-60X0 includes the following additional features:

- 9-Axis MotionFusion by the on-chip Digital Motion Processor (DMP)
- Auxiliary master I²C bus for reading data from external sensors (e.g., magnetometer)
- 3.9mA operating current when all 6 motion sensing axes and the DMP are enabled
- VDD supply voltage range of 2.375V-3.46V
- Flexible VLOGIC reference voltage supports multiple I²C interface voltages (MPU-6050 only)
- Smallest and thinnest QFN package for portable devices: 4x4x0.9mm
- Minimal cross-axis sensitivity between the accelerometer and gyroscope axes
- 1024 byte FIFO buffer reduces power consumption by allowing host processor to read the data in bursts and then go into a low-power mode as the MPU collects more data
- Digital-output temperature sensor
- User-programmable digital filters for gyroscope, accelerometer, and temp sensor
- 10,000 g shock tolerant
- 400kHz Fast Mode I²C for communicating with all registers
- 1MHz SPI serial interface for communicating with all registers (MPU-6000 only)
- 20MHz SPI serial interface for reading sensor and interrupt registers (MPU-6000 only)

	MPU-6000/MPU-6050 Product Specification	Document Number: PS-MPU-6000A-00 Revision: 3.3 Release Date: 5/16/2012
---	--	--

- MEMS structure hermetically sealed and bonded at wafer level
- RoHS and Green compliant

5.4 MotionProcessing

- Internal Digital Motion Processing™ (DMP™) engine supports 3D MotionProcessing and gesture recognition algorithms
- The MPU-60X0 collects gyroscope and accelerometer data while synchronizing data sampling at a user defined rate. The total dataset obtained by the MPU-60X0 includes 3-Axis gyroscope data, 3-Axis accelerometer data, and temperature data. The MPU's calculated output to the system processor can also include heading data from a digital 3-axis third party magnetometer.
- The FIFO buffers the complete data set, reducing timing requirements on the system processor by allowing the processor burst read the FIFO data. After burst reading the FIFO data, the system processor can save power by entering a low-power sleep mode while the MPU collects more data.
- Programmable interrupt supports features such as gesture recognition, panning, zooming, scrolling, zero-motion detection, tap detection, and shake detection
- Digitally-programmable low-pass filters
- Low-power pedometer functionality allows the host processor to sleep while the DMP maintains the step count.

5.5 Clocking

- On-chip timing generator $\pm 1\%$ frequency variation over full temperature range
- Optional external clock inputs of 32.768kHz or 19.2MHz

	MPU-6000/MPU-6050 Product Specification	Document Number: PS-MPU-6000A-00 Revision: 3.3 Release Date: 5/16/2012
---	--	--

6 Electrical Characteristics

6.1 Gyroscope Specifications

VDD = 2.375V-3.46V, VLOGIC (MPU-6050 only) = 1.8V±5% or VDD, T_A = 25°C

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
GYROSCOPE SENSITIVITY						
Full-Scale Range	FS_SEL=0		±250		°/s	
	FS_SEL=1		±500		°/s	
	FS_SEL=2		±1000		°/s	
	FS_SEL=3		±2000		°/s	
Gyroscope ADC Word Length			16		bits	
Sensitivity Scale Factor	FS_SEL=0		131		LSB/(°/s)	
	FS_SEL=1		65.5		LSB/(°/s)	
	FS_SEL=2		32.8		LSB/(°/s)	
	FS_SEL=3		16.4		LSB/(°/s)	
Sensitivity Scale Factor Tolerance	25°C	-3		+3	%	
Sensitivity Scale Factor Variation Over Temperature			±2		%	
Nonlinearity	Best fit straight line; 25°C		0.2		%	
Cross-Axis Sensitivity			±2		%	
GYROSCOPE ZERO-RATE OUTPUT (ZRO)						
Initial ZRO Tolerance	25°C		±20		°/s	
ZRO Variation Over Temperature	-40°C to +85°C		±20		°/s	
Power-Supply Sensitivity (1-10Hz)	Sine wave, 100mVpp; VDD=2.5V		0.2		°/s	
Power-Supply Sensitivity (10 - 250Hz)	Sine wave, 100mVpp; VDD=2.5V		0.2		°/s	
Power-Supply Sensitivity (250Hz - 100kHz)	Sine wave, 100mVpp; VDD=2.5V		4		°/s	
Linear Acceleration Sensitivity	Static		0.1		°/s/g	
SELF-TEST RESPONSE						
Relative	Change from factory trim	-14		14	%	1
GYROSCOPE NOISE PERFORMANCE	FS_SEL=0					
Total RMS Noise	DLPFCFG=2 (100Hz)		0.05		°/s-rms	
Low-frequency RMS noise	Bandwidth 1Hz to10Hz		0.033		°/s-rms	
Rate Noise Spectral Density	At 10Hz		0.005		°/s/√Hz	
GYROSCOPE MECHANICAL FREQUENCIES						
X-Axis		30	33	36	kHz	
Y-Axis		27	30	33	kHz	
Z-Axis		24	27	30	kHz	
LOW PASS FILTER RESPONSE	Programmable Range	5		256	Hz	
OUTPUT DATA RATE	Programmable	4		8,000	Hz	
GYROSCOPE START-UP TIME	DLPFCFG=0					
ZRO Settling (from power-on)	to ±1°/s of Final		30		ms	

1. Please refer to the following document for further information on Self-Test: *MPU-6000/MPU-6050 Register Map and Descriptions*

	MPU-6000/MPU-6050 Product Specification	Document Number: PS-MPU-6000A-00 Revision: 3.3 Release Date: 5/16/2012
---	--	--

6.2 Accelerometer Specifications

VDD = 2.375V-3.46V, VLOGIC (MPU-6050 only) = 1.8V±5% or VDD, T_A = 25°C

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
ACCELEROMETER SENSITIVITY						
Full-Scale Range	AFS_SEL=0		±2		g	
	AFS_SEL=1		±4		g	
	AFS_SEL=2		±8		g	
	AFS_SEL=3		±16		g	
ADC Word Length	Output in two's complement format		16		bits	
Sensitivity Scale Factor	AFS_SEL=0		16,384		LSB/g	
	AFS_SEL=1		8,192		LSB/g	
	AFS_SEL=2		4,096		LSB/g	
	AFS_SEL=3		2,048		LSB/g	
Initial Calibration Tolerance			±3		%	
Sensitivity Change vs. Temperature	AFS_SEL=0, -40°C to +85°C		±0.02		%/°C	
Nonlinearity	Best Fit Straight Line		0.5		%	
Cross-Axis Sensitivity			±2		%	
ZERO-G OUTPUT						
Initial Calibration Tolerance	X and Y axes		±50		mg	1
	Z axis		±80		mg	
Zero-G Level Change vs. Temperature	X and Y axes, 0°C to +70°C		±35			
	Z axis, 0°C to +70°C		±60		mg	
SELF TEST RESPONSE						
Relative	Change from factory trim	-14		14	%	2
NOISE PERFORMANCE						
Power Spectral Density	@10Hz, AFS_SEL=0 & ODR=1kHz		400		μg/√Hz	
LOW PASS FILTER RESPONSE						
	Programmable Range	5		260	Hz	
OUTPUT DATA RATE						
	Programmable Range	4		1,000	Hz	
INTELLIGENCE FUNCTION INCREMENT						
			32		mg/LSB	

1. Typical zero-g initial calibration tolerance value after MSL3 preconditioning
2. Please refer to the following document for further information on Self-Test: *MPU-6000/MPU-6050 Register Map and Descriptions*

C.5 Drivkort

(dfrobot, u. ä.)



Introduction

This is a professional two-phase stepper motor driver. It supports speed and direction control. You can set its micro step and output current with 6 DIP switch. There are 7 kinds of micro steps (1, 2 / A, 2 / B, 4, 8, 16, 32) and 8 kinds of current control (0.5A, 1A, 1.5A, 2A, 2.5A, 2.8A, 3.0A, 3.5A) in all. And all signal terminals adopt high-speed optocoupler isolation, enhancing its anti-high-frequency interference ability.

Features:

- ※ Support 8 kinds of current control
- ※ Support 7 kinds of micro steps adjustable
- ※ The interfaces adopt high-speed optocoupler isolation
- ※ Automatic semi-flow to reduce heat
- ※ Large area heat sink
- ※ Anti-high-frequency interference ability
- ※ Input anti-reverse protection
- ※ Overheat, over current and short circuit protection

Electrical Specification:

Input Current	0~5.0A
Output Current	0.5-4.0A
Power (MAX)	160W
Micro Step	1, 2/A, 2/B, 4, 8, 16, 32
Temperature	-10 ~ 45°C
Humidity	No Condensation
Weight	0.2 kg
Dimension	96*56*33 mm

INPUT & OUTPUT:

- **Signal Input:**

PUL+	Pulse +
PUL-	Pulse -
DIR+	Direction +
DIR-	Direction -
EN+	Off-line Control Enable +
EN-	Off-line Control Enable -

- **Motor Machine Winding:**

A+	Stepper motor A+
A-	Stepper motor A-
B+	Stepper motor B+
B-	Stepper motor B-

- **Power Supply:**

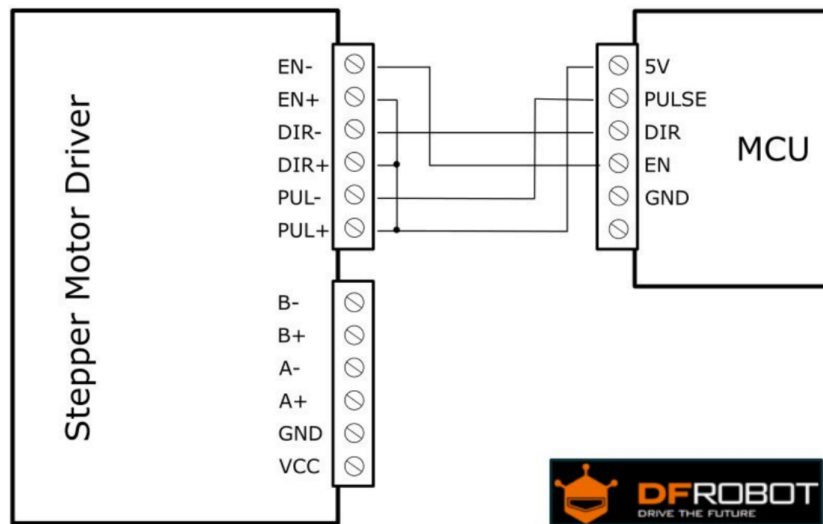
VCC	VCC (DC9-42V)
GND	GND

- **Wiring instructions**

There are three input signals in all: ① Step pulse signal PUL +, PUL-; ② Direction signal DIR +, DIR-; ③ off-line signal EN +, EN-. The driver supports common-cathode and common-anode circuit, you can select one according to your demand.

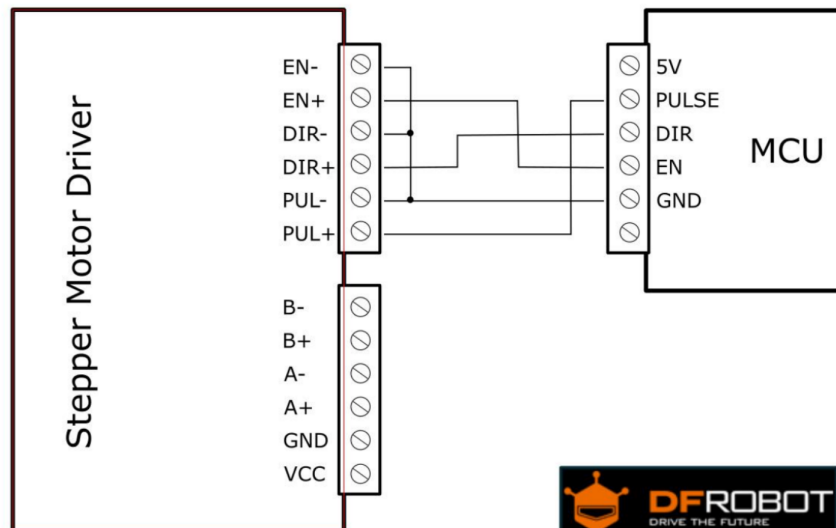
Common-Anode Connection:

Connect PUL +, DIR + and EN + to the power supply of the control system. If the power supply is + 5V, it can be directly connected. If the power supply is more than + 5V, the current limiting resistor R must be added externally. To ensure that the controller pin can output 8 ~ 15mA current to drive the internal optocoupler chip. Pulse signal connects to PUL-; direction signal connects to Dir- ; Enable signal connects to EN-. As shown below:



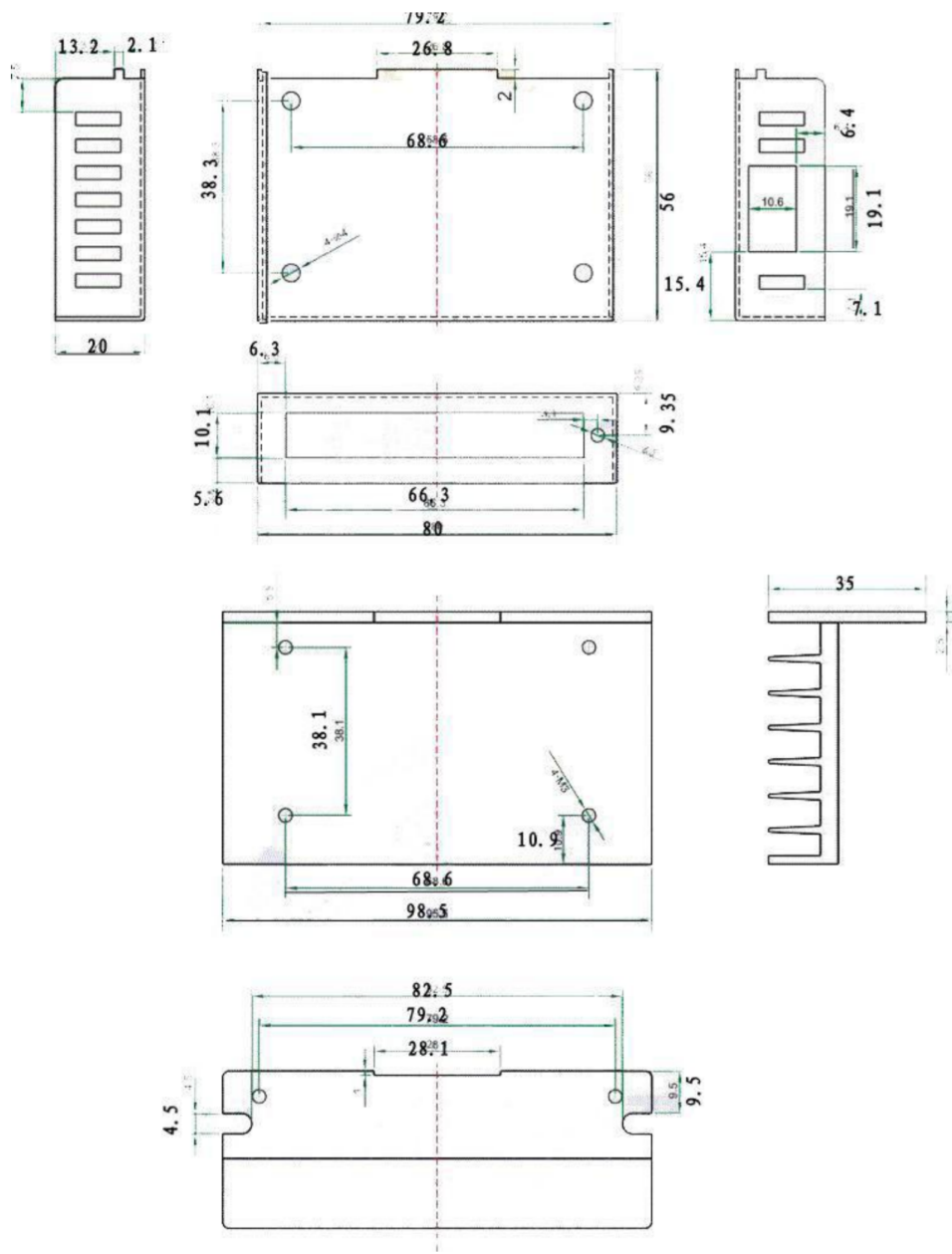
Common-Cathode Connection:

Connect PUL -, DIR - and EN - to the ground terminal of the control system. Pulse signal connects to PUL-; direction signal connects to Dir- ; Enable signal connects to EN-. As shown below:



Note: When "EN" is in the valid state, the motor is in a free states (Off-line mode). In this mode, you can adjust the motor shaft position manually. When "EN" is in the invalid state, the motor will be in an automatic control mode.

Dimension (96*56*33)



C.6 Batteri

Produktblad saknas. För vidare produktspecifikation se distributörens hemsida (https://hobbyking.com/en-us/turnigy-bolt-2800mah-4s-15-2v-65-130c-high-voltage-lipoly-pack-xt-60.html?___store=en-us). (Hobbyking, u. å.)

C.7 Spänningsregulator

(Instrumentns, u. å.)

 Product Folder

 Sample & Buy

 Technical Documents

 Tools & Software

 Support & Community



LM2596

SNVS124D – NOVEMBER 1999 – REVISED MAY 2016

LM2596 SIMPLE SWITCHER® Power Converter 150-kHz 3-A Step-Down Voltage Regulator

1 Features

- 3.3-V, 5-V, 12-V, and Adjustable Output Versions
- Adjustable Version Output Voltage Range: 1.2-V to 37-V $\pm$ 4% Maximum Over Line and Load Conditions
- Available in TO-220 and TO-263 Packages
- 3-A Output Load Current
- Input Voltage Range Up to 40 V
- Requires Only 4 External Components
- Excellent Line and Load Regulation Specifications
- 150-kHz Fixed-Frequency Internal Oscillator
- TTL Shutdown Capability
- Low Power Standby Mode, I_Q , Typically 80 μ A
- High Efficiency
- Uses Readily Available Standard Inductors
- Thermal Shutdown and Current-Limit Protection
- Create a Custom Design Using the LM2596 with the [WEBENCH Power Designer](#)

2 Applications

- Simple High-Efficiency Step-Down (Buck) Regulator
- On-Card Switching Regulators
- Positive to Negative Converter

3 Description

The LM2596 series of regulators are monolithic integrated circuits that provide all the active functions for a step-down (buck) switching regulator, capable of driving a 3-A load with excellent line and load regulation. These devices are available in fixed output voltages of 3.3 V, 5 V, 12 V, and an adjustable output version.

Requiring a minimum number of external components, these regulators are simple to use and include internal frequency compensation, and a fixed-frequency oscillator.

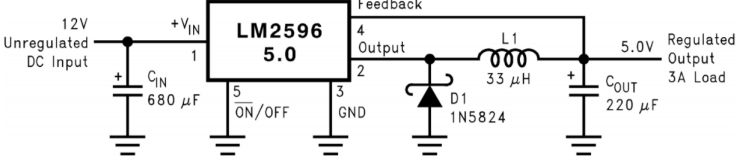
The LM2596 series operates at a switching frequency of 150 kHz, thus allowing smaller sized filter components than what would be required with lower frequency switching regulators. Available in a standard 7-pin TO-220 package with several different lead bend options, and a 7-pin TO-263 surface mount package.

Device Information⁽¹⁾

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
LM2596	TO-220 (7)	14.986 mm $\times$ 10.16 mm
	TO-263 (7)	10.10 mm $\times$ 8.89 mm

⁽¹⁾ For all available packages, see the orderable addendum at the end of the data sheet.

Typical Application



(Fixed Output Voltage Versions)

Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated

LM2596

SNVS124D – NOVEMBER 1999 – REVISED MAY 2016

www.ti.com

7 Specifications

7.1 Absolute Maximum Ratings

 over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)⁽¹⁾⁽²⁾

			MIN	MAX	UNIT
Maximum supply voltage (V_{IN})				45	V
SD/SS pin input voltage ⁽³⁾				6	V
Delay pin voltage ⁽³⁾				1.5	V
Flag pin voltage			−0.3	45	V
Feedback pin voltage			−0.3	25	V
Output voltage to ground, steady-state				−1	V
Power dissipation			Internally limited		
Lead temperature	KTW package	Vapor phase (60 s)		215	°C
		Infrared (10 s)		245	
	NDZ package, soldering (10 s)			260	
Maximum junction temperature				150	°C
Storage temperature, T_{stg}			−65	150	°C

- (1) Stresses beyond those listed under *Absolute Maximum Ratings* may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, which do not imply functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under *Recommended Operating Conditions*. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.
- (2) If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the Texas Instruments Sales Office/ Distributors for availability and specifications.
- (3) Voltage internally clamped. If clamp voltage is exceeded, limit current to a maximum of 1 mA.

7.2 ESD Ratings

			VALUE	UNIT
$V_{(ESD)}$	Electrostatic discharge	Human-body model (HBM), per ANSI/ESDA/JEDEC JS-001 ⁽¹⁾	±2000	V

- (1) JEDEC document JEP155 states that 500-V HBM allows safe manufacturing with a standard ESD control process.

7.3 Operating Conditions

	MIN	MAX	UNIT
Supply voltage	4.5	40	V
Temperature	–40	125	°C

7.4 Thermal Information

THERMAL METRIC ⁽¹⁾		LM2596		UNIT
		KTW (TO-263)	NDZ (TO-220)	
		7 PINS	7 PINS	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-ambient thermal resistance ⁽²⁾⁽³⁾	See ⁽⁴⁾	50	°C/W
		50	—	
		30	—	
		20	—	
$R_{\theta JC(top)}$	Junction-to-case (top) thermal resistance	2	2	°C/W

- (1) For more information about traditional and new thermal metrics, see the *Semiconductor and IC Package Thermal Metrics* application report, [SPRA953](#).
- (2) The package thermal impedance is calculated in accordance to JESD 51-7.
- (3) Thermal Resistances were simulated on a 4-layer, JEDEC board.
- (4) Junction to ambient thermal resistance (no external heat sink) for the package mounted TO-220 package mounted vertically, with the leads soldered to a printed circuit board with (1 oz.) copper area of approximately 1 in².
- (5) Junction to ambient thermal resistance with the TO-263 package tab soldered to a single sided printed circuit board with 0.5 in² of 1-oz copper area.
- (6) Junction to ambient thermal resistance with the TO-263 package tab soldered to a single sided printed circuit board with 2.5 in² of 1-oz copper area.
- (7) Junction to ambient thermal resistance with the TO-263 package tab soldered to a double sided printed circuit board with 3 in² of 1-oz copper area on the LM2596S side of the board, and approximately 16 in² of copper on the other side of the PCB.

7.8 Electrical Characteristics – Adjustable Voltage Version

Specifications are for $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN ⁽¹⁾	TYP ⁽²⁾	MAX ⁽¹⁾	UNIT
SYSTEM PARAMETERS ⁽³⁾ (see Figure 35 for test circuit)					
V_{FB} Feedback voltage	$4.5\text{ V} \leq V_{IN} \leq 40\text{ V}$, $0.2\text{ A} \leq I_{LOAD} \leq 3\text{ A}$		1.23		V
	V_{OUT} programmed for 3 V (see Figure 35 for test circuit)	$T_J = 25^\circ\text{C}$	1.193	1.267	
		$-40^\circ\text{C} \leq T_J \leq 125^\circ\text{C}$	1.18	1.28	
η Efficiency	$V_{IN} = 12\text{ V}$, $V_{OUT} = 3\text{ V}$, $I_{LOAD} = 3\text{ A}$		73%		

- (1) All room temperature limits are 100% production tested. All limits at temperature extremes are specified via correlation using standard Statistical Quality Control (SQC) methods. All limits are used to calculate Average Outgoing Quality Level (AOQL).
- (2) Typical numbers are at 25°C and represent the most likely norm.
- (3) External components such as the catch diode, inductor, input and output capacitors can affect switching regulator system performance. When the LM2596 is used as shown in Figure 35, system performance is shown in the test conditions column.



LM2596

SNVS124D – NOVEMBER 1999 – REVISED MAY 2016

www.ti.com

7.9 Electrical Characteristics – All Output Voltage Versions

Specifications are for $T_J = 25^\circ\text{C}$, $I_{LOAD} = 500\text{ mA}$, $V_{IN} = 12\text{ V}$ for the 3.3-V, 5-V, and adjustable version, and $V_{IN} = 24\text{ V}$ for the 12-V version (unless otherwise noted).

PARAMETER		TEST CONDITIONS		MIN ⁽¹⁾	TYP ⁽²⁾	MAX ⁽¹⁾	UNIT
DEVICE PARAMETERS							
I _b	Feedback bias current	Adjustable version only, V _{FB} = 1.3 V	T _J = 25°C		10	50	nA
			−40°C ≤ T _J ≤ 125°C			100	
f _O	Oscillator frequency ⁽³⁾	T _J = 25°C −40°C ≤ T _J ≤ 125°C		127	150	173	kHz
				110		173	
V _{SAT}	Saturation voltage ⁽⁴⁾ ⁽⁵⁾	I _{OUT} = 3 A	T _J = 25°C		1.16	1.4	V
			−40°C ≤ T _J ≤ 125°C			1.5	
DC	Max duty cycle (ON) ⁽⁵⁾				100%		
	Min duty cycle (OFF) ⁽⁶⁾				0%		
I _{CL}	Current limit ⁽⁴⁾ ⁽⁵⁾	Peak current	T _J = 25°C	3.6	4.5	6.9	A
			−40°C ≤ T _J ≤ 125°C	3.4		7.5	
I _L	Output leakage current ⁽⁴⁾ ⁽⁶⁾	Output = 0 V, V _{IN} = 40 V				50	μA
		Output = −1 V			2	30	mA
I _Q	Operating quiescent current ⁽⁶⁾	See ⁽⁶⁾			5	10	mA
I _{STBY}	Current standby quiescent	ON/OFF pin = 5 V (OFF) ⁽⁷⁾	T _J = 25°C		80	200	μA
			−40°C ≤ T _J ≤ 125°C			250	μA
SHUTDOWN/SOFT-START CONTROL (see Figure 35 for test circuit)							
V _{IH}	ON/OFF pin logic input threshold voltage	Low (regulator ON)	T _J = 25°C		1.3		V
			−40°C ≤ T _J ≤ 125°C			0.6	
V _{IL}		High (regulator OFF)	T _J = 25°C		1.3		V
			−40°C ≤ T _J ≤ 125°C		2		
I _H	ON/OFF pin input current	V _{LOGIC} = 2.5 V (regulator OFF)			5	15	μA
I _L		V _{LOGIC} = 0.5 V (regulator ON)			0.02	5	μA

- (1) All room temperature limits are 100% production tested. All limits at temperature extremes are specified via correlation using standard Statistical Quality Control (SQC) methods. All limits are used to calculate Average Outgoing Quality Level (AOQL).
- (2) Typical numbers are at 25°C and represent the most likely norm.
- (3) The switching frequency is reduced when the second stage current limit is activated. The amount of reduction is determined by the severity of current overload.
- (4) No diode, inductor, or capacitor connected to output pin.
- (5) Feedback pin removed from output and connected to 0 V to force the output transistor switch ON.
- (6) Feedback pin removed from output and connected to 12 V for the 3.3-V, 5-V, and the adjustable versions, and 15 V for the 12-V version, to force the output transistor switch OFF.
- (7) $V_{IN} = 40\text{ V}$.

D Programkod

```
/*
 * LARS
 * skapat av
 * kandidatprojektgruppen EENX-15-18-89 vid Chalmers Tekniska Högskola
 */

#include <Servo.h>

Servo LinAktu; // Linje r aktuator 1
Servo LinAktu2; // Linje r Aktuator 2

int posIn = 1300; // variabler för att lagra olika positioner för de linjer som ska
int posMiddle = 1500;
int posOut = 1700;

int PUL=7; //define Pulse pin
int DIR=6; //define Direction pin
int ENA=5; //define Enable Pin

int PUL2=10; //define Pulse pin
int DIR2=9; //define Direction pin
int ENA2=8; //define Enable Pin

int stepLength = 4000; // steglängden

// variabel för att spara listdata från Bluetooth-sändning
char data = 0;

void setup() {
    Serial.begin(9600);

    pinMode (PUL, OUTPUT);
    pinMode (DIR, OUTPUT);
    pinMode (ENA, OUTPUT);
    pinMode (PUL2, OUTPUT);
    pinMode (DIR2, OUTPUT);
    pinMode (ENA2, OUTPUT);

    digitalWrite(ENA,HIGH);
    digitalWrite(ENA2,HIGH);

    LinAktu.attach(11, 1000, 2000);
    LinAktu2.attach(12, 1000, 2000);

    LinAktu.write(posIn);
    LinAktu2.write(posIn);
    delay(3000);
    LinAktu.write(posOut);
    LinAktu2.write(posOut);
    delay(3000);
}

void loop() {
```

```

    if (Serial.available() > 0)
    {
        data = Serial.read();           //L s inkommande data och spara i data
        if (data == '1'){               //Om siffran '1' skickats, g ett steg
            walk();
        }
    }
}

void walk(){
    LinAktu.write(posOut);
    LinAktu2.write(posOut);
    delay(3000);

    //Mittbenet h nger fritt, och f rs fram t medans det s nks
    LinAktu.write(posIn);
    LinAktu2.write(posIn);
    for (int i=0; i<stepLength; i++)
    {
        digitalWrite(DIR,LOW);
        digitalWrite(DIR2,HIGH);
        digitalWrite(PUL,HIGH);
        digitalWrite(PUL2,HIGH);
        delayMicroseconds(50);
        digitalWrite(PUL,LOW);
        digitalWrite(PUL2,LOW);
        delayMicroseconds(50);
    }
    //Mittbenet r fram t och roboten har fallit fram t, ytterbenen r fria
    delay(500);

    // Mittbenet sitter mot backen och ytterbenen f rs fram t
    for (int i=0; i<stepLength; i++)
    {
        digitalWrite(DIR,HIGH);
        digitalWrite(DIR2,LOW);
        digitalWrite(PUL,HIGH);
        digitalWrite(PUL2,HIGH);
        delayMicroseconds(50);
        digitalWrite(PUL,LOW);
        digitalWrite(PUL2,LOW);
        delayMicroseconds(50);
    }
    delay(1000);
}

```

E MATLAB-kod

E.1 LQR

```
%% LQR design for LARS

clear;
clc;
LARSpendel % loading the variables/parameters

% Approximation of the sign block using  $\text{sign}(x)=c_{\text{atan}}*\arctan(x)$ 
c_atan=3.114815; % fitting coefficient

% Defining the simulink block to be linearized
mdl='LARS_model_lin';
open_system(mdl);

% Defining model inputs/outputs
io(1)=linio('LARS_model_lin/Constant',1,'input');
io(2)=linio('LARS_model_lin/Subsystem',1,'output');

% Linearizing the model
disp('Linearized model at WP [Th1=180,Th2=0]:');
linsys=linearize(mdl,io,0);
disp(' ');

%% Plotting the results + LQR design

% within the figure command you can change the position on the screen
% first two numbers (in pixels) + the size of the figure (last two numbers)
% 500 – width, 600 – height
figure('OuterPosition',[40,40,500,600]);

% differnet weightings
q=[1,100,1000,5000];

% Defining the plot colors
ql=length(q);
cmap=hsb(ql);

% declaring the legendtext size
legendtext=cell(1,ql);

disp('LQR design:');
for j=1:ql
    % Defining the wighting matirces
    Q=q(j)*diag([1,1,1]);
    R=1;
    % LQR design
    K=lqr(linsys,Q,R);
    % Displaying the results
    fprintf('q=%d\nK=',q(j));
    disp(K);
    % set up the legend text
    legendtext{j}=sprintf('q=%d',q(j));
```

```

% Simualtion
sim('LARS_model_test.slx')
% Plotting the results
subplot(2,1,1)
plot(Sim_t,Sim_y,'Color',cmap(j,:))
hold on;
subplot(2,1,2)
plot(Sim_t,Sim_u,'Color',cmap(j,:))
hold on;
end
% Additional settings for the plot
subplot(2,1,1)
grid on
xlabel('time [s]');
ylabel('$\Phi_y$', 'Interpreter', 'latex');
title('Ytterben');
legend(legendtext, 'Location', 'Best');
legend('boxoff');
axis([0,10,165,185])

subplot(2,1,2)
grid on
xlabel('time [s]');
ylabel('$\Phi_i$', 'Interpreter', 'latex');
title('Innerben');
legend(legendtext, 'Location', 'Best');
legend('boxoff');
axis([0,10,-80,20])

```

E.2 Simulering av mekanisk modell

```

1 %% Mechanical modell
2
3 %Properties
4 g = 9.82; %Gravity
5 m1 = 3.482 ; %Massa ytterben
6 l1 = 0.43 ; %Lngd ytterben
7 l1c = 0.198 ; %Position p masscentrum i
   ytterbenet
8 J1 = 0.1008; %Trghetesmomentet ytterben
9 m2 = 2.28 ; %Massa mittenben
10 l2 = 0.43; %Lngd mittenben
11 l2c = 0.24 ; %Position p masscentrum i
   mitteneben
12 J2 = 0.0776; %Trghetsmoment mittenben
13
14 %Constants
15 c1=m1/2*l1c^2+m2/2*l1^2+J1/2; %Konstanter till mekaniska modellen
16 c2=m2/2*l2c^2+J2/2;
17 c3=m2*l1*l2c;
18 c4=(m1*l1c+m2*l2c)*g;
19 c5=m2*g*l2c;
20
21 %Friction , Viscous(b) and Coulomb(Tc)
22 b1= 0.55;
23 b2=0.2;
24 Tc1=1.55;
25 Tc2=3.7;
26
27 %% Plotting results
28
29 plot(Sim_t, Sim_phi_i, 'r')
30 hold on;
31 plot(Sim_t, Sim_phi_y, 'k')
32 hold on;
33
34 % Additional settings for the plot
35 figure('OuterPosition',[40,40,500,600]);
36 grid on
37 xlabel('time [s]');
38 ylabel('$\Phi$', 'Interpreter', 'latex');
39 title('Ytterben');
40 axis([0,10,-110,175])

```

E.3 Tyngpunktsuträkning

```
1
2 %% Ytterben :
3
4 Topplock=0.04;
5 Frambaksida=0.15;
6 Yttersida=0.212;
7 Insida=0.205;
8 Motorfast=0.047;
9 printadfotgrej=0.130;
10 Fot=0.094;
11 Aktuatorstang=0.004;
12
13 %% Innerben :
14 Topplockm=0.057;
15 Framsidam=0.286;
16 Baksidam=0.314;
17 Sidam=0.248;
18 Bottenm=0.119;
19
20 %% Misc :
21 Stang=0.462;
22 Kilforband=0.047;
23 Axelkoppling=0.026;
24 Kullager=0.044;
25 Kullagerhus=0.135;
26 Batteri=0.312;
27 Motor=0.5;
28 Aktuator=0.074;
29
30 %% distanser
31 upp=440+12;
32 axel=328+12;
33 mitten=215+12;
34 bott=0;
35
36 %% b e r kningar
37 %% utan motor, batteri o aktuator
38 innertot=upp*(Topplockm)+axel*(Stang+Kilforband*2+Axelkoppling*2+
    Kullager*2)+mitten*(Framsidam+Baksidam+Sidam+Sidam)+bott*(Bottenm);
39 innerVikt=(Topplockm+Stang+Kilforband*2+Axelkoppling*2+Kullager*2+
    Framsidam+Baksidam+Sidam+Sidam+Bottenm)
40 Innerchassi=innertot/innerVikt
41
42 yttertot=upp*(Topplock)+axel*(Motorfast+Kullagerhus)+mitten*(
    Frambaksida*2+Yttersida+Insida)+bott*(Fot+printadfotgrej+
    Aktuatorstang);
43 ytterVikt=(Topplock+Motorfast+Kullagerhus+Frambaksida*2+Yttersida+
    Insida+Fot+printadfotgrej+Aktuatorstang)
44 Ytterchassi=yttertot/ytterVikt
45
46 %% med allt
47 innertotA=upp*(Topplockm)+axel*(Stang+Kilforband*2+Axelkoppling*2+
    Kullager*2)+mitten*(Framsidam+Baksidam+Sidam+Sidam)+bott*(Bottenm+
    Batteri);
```

```

48 InnerViktA=(Topplockm+Stang+Kilforband*2+Axelkoppling*2+Kullager*2+
    Framsidam+Baksidam+Sidam+Sidam+Bottenm+Batteri)
49 InnerA=innertotA/InnerViktA
50
51 yttertota=upp*(Topplock)+axel*(Motorfast+Kullagerhus+Motor)+mitten*(
    Frambaksida*2+Yttersida+Insida)+bott*(Aktuator+Fot+printadfotgrej+
    Aktuatorstang);
52 YtterViktA=(Topplock+Motorfast+Kullagerhus+Frambaksida*2+Yttersida+
    Insida+Fot+printadfotgrej+Aktuatorstang+Aktuator+Motor);
53 YtterA=yttertota/YtterViktA
54 %% TOT
55 totVikt=2*YtterViktA+InnerViktA;
56 tot=(InnerA*InnerViktA+2*YtterA*YtterViktA)/(totVikt)

```

E.4 Enkätprogram

$$A = [3, 3, 4, 4, 4, 4, 5, 5, 5, 5, 5, 6, 6, 6, 6, 6, 6, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 7]$$
$${}^2\text{B} = [1, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 4, 4, 4, 4, 5, 5, 5, 5, 6, 6, 6, 6, 6, 6, 6, 6, 6, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 8, 8, 8, 8,$$

```

3
4 subplot(1,2,1)
5 histogram(A)
6 title('Frga 1')
7 xlim([0.5 10.5]);
8 xlabel('Betyg')
9 ylabel('Antal rster')
10 subplot(1,2,2)
11 histogram(B)
12 title('Frga 2')
13 xlim([0.5 10.5]);
14 xlabel('Betyg')
15 ylabel('Antal rster')

```


E.5 Vinkelprogram

```
1 %% Fall 1, hela faller
2 time = [0,1,2,3,4,5,6,7,8]
3 angle1 = [0,3,5,8,11,23,30,45,85]
4 angle2 = [175,170,170,170,170,170,170,175,180]
5
6 %% Fall 2 mittenbenet faller
7 time =
    [0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27]./8
8 angle1 =
    [180,180,180,180,180,177,172,168,163,150,140,115,87,40,0,-27,-28,-24,...
9     0,5,4,0,0,0,0,0,0,0]
10
11 fitOptions1 = fitoptions('Method','SmoothingSpline','SmoothingParam',
    ,0.998);
12
13 [curve1, goodness, output] = fit(time',angle1','smoothingspline',
    fitOptions1);
14
15 plot(curve1,'k')
16 hold on;
17 scatter(time,angle1,40,'k');
18 legend('Anpassad kurva','Mittenbenet')
19 xlabel('Tid')
20 ylabel('Vinkel')
21 title('Vinkel vid vertikalt slpp av mittenbenet')
22
23 %% Fall 3, hela faller hela vgen
24
25
26 angle1 =
    [180,180,175,175,172,167,162,135,90,45,5,-35,-50,-40,-15,15,22,19,14,...
27 10,-3,-14,-18,-12,-3,10,14,12,8,0,-7,-13,-11,-8,0];
28 angle2 =
    [0,0,2,2,0,4,10,35,22,-10,-20,-25,-23,-30,-15,12,25,25,12,-3,-3,-3,...
29 -3,-3,3,12,16,12,8,-3,-3,-3,-3,0];
30 angle2 = angle2+angle1;
31 time = (1:length(angle1))./8;
32
33 fitOptions1 = fitoptions('Method','SmoothingSpline','SmoothingParam',
    ,0.998);
34 fitOptions2 = fitoptions('Method','SmoothingSpline','SmoothingParam',
    ,0.998);
35
36
37 [curve1, goodness, output] = fit(time',angle1','smoothingspline',
    fitOptions1);
38 [curve2, goodness, output] = fit(time',angle2','smoothingspline',
    fitOptions2);
39
40 plot(curve1,'k')
```

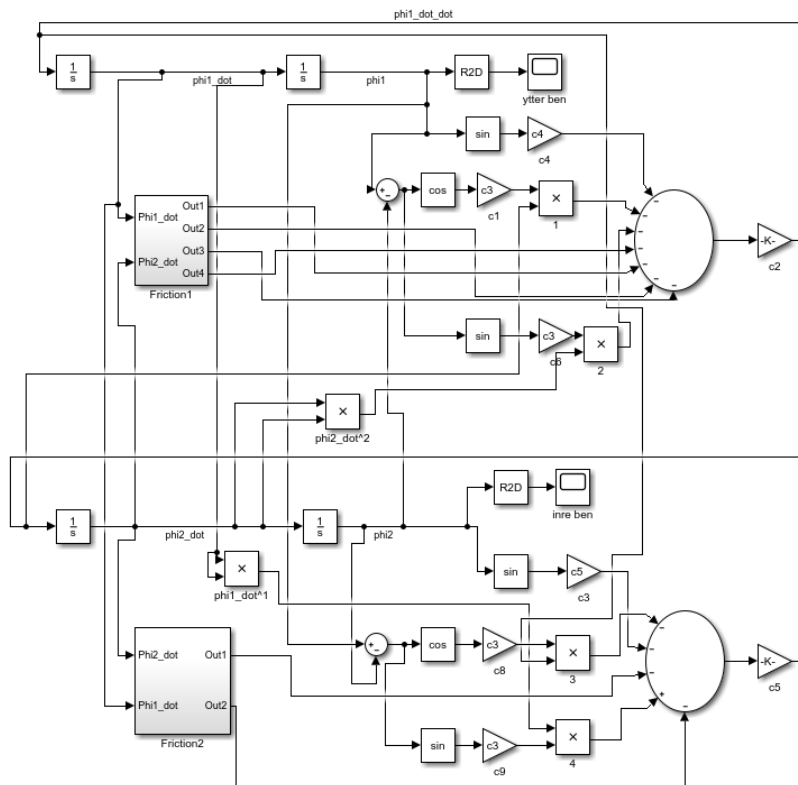
```

41 hold on;
42 scatter(time,angle1,40,'.k');
43 %legend('Data Angle 1','Data Angle 1')
44 hold on;
45 plot(curve2,'r')
46 scatter(time,angle2,40,'.r');
47 legend('Anpassad kurva vinkel 1','Data Vinkel 1','Anpassad kurva vinkel
      2','Data Vinkel 2')
48 xlabel('Tid')
49 ylabel('Vinkel')
50 title('Vinkel 1 och 2 fr vertikalt slpp av roboten')

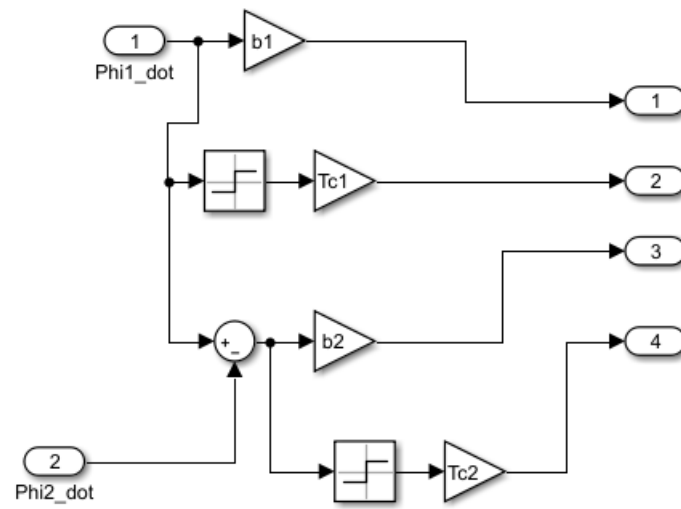
```

F Simulink

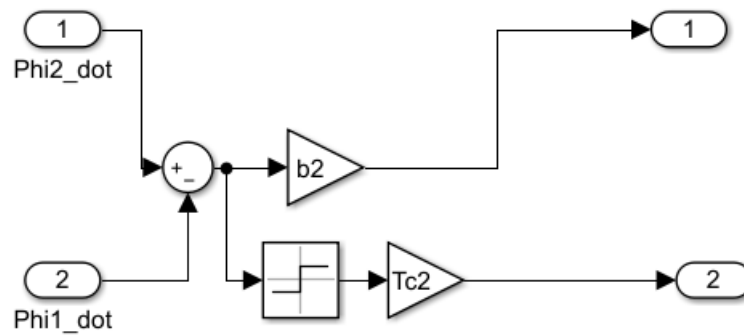
F.1 Dubbelpendels rörelse



Figur 78: Mekaniska modellen av dubbelpendels rörelse i Simulink

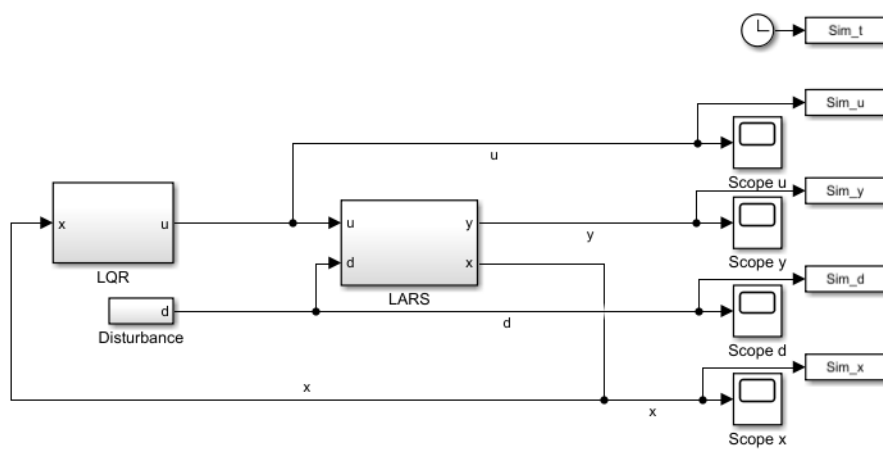


Figur 79: Friktion 1



Figur 80: Friktion 2

F.2 LQR



Figur 81: LQR simulering

G Enkät

Kandidatarbetesenkät TARS

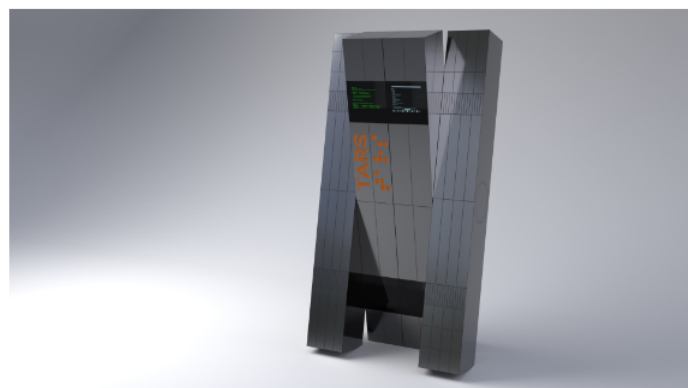
Vi har under vårt kandidatarbete byggt roboten TARS från filmen Interstellar (2014). Några av kraven var att den skulle likna roboten från filmen och att den ska se estetiskt tilltalande ut. Genom att svara på denna enkät hjälper du oss se om vi har uppfyllt våra mål. Tack!

*Required

#1



#2



Hur mycket liknar #1 och #2 varann enligt dig? *

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Ser ingen likhet överhuvudtaget	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Ser ingen skillnad överhuvudtaget

Hur estetisk tilltalande är #1 enligt dig? *

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Väldigt ful	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Väldigt fin

Figur 82: Enkät