



CHALMERS

UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



TARS

- Roboten från Interstellar

Kandidatarbete inom System- och Reglerteknik

CAROLINE ANSIN

KARL-OSKAR GUNNARSSON

JONAS HEJDERUP

HUGO MÅNSSON

ELIAS NEHMÉ

NICOLE TRAN LUU

KANDIDATARBETE 2018: EENX15-18-19

Design- och konstruktion av en TARS-inspirerad robot

Ett försök i att designa och konstruera en gående robot, inspirerad
av robotkaraktären TARS från filmen Interstellar

CAROLINE ANSIN
KARL-OSKAR GUNNARSSON
JONAS HEJDERUP
HUGO MÅNSSON
ELIAS NEHMÉ
NICOLE TRAN LUU



Institutionen för Elektroteknik
Avdelningen för System- och Reglerteknik (SysCon)

EENX15-18-19

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2018

© CAROLINE ANSIN, 2018.
© KARL-OSKAR GUNNARSSON, 2018.
© JONAS HEJDERUP, 2018.
© HUGO MÅNSSON, 2018.
© ELIAS NEHMÉ, 2018.
© NICOLE TRAN LUU, 2018.

Handledare: Adrian Ilka, Post doc, Elektroteknik
Examinator: Nikolce Murgovski, Docent, Elektroteknik

Kandidatarbete 2018:EENX15-18-19
Institutionen för Elektroteknik
Avdelningen för System- och Reglerteknik (SysCon)
Chalmers tekniska högskola
SE-412 96 Göteborg
Telefon: +46 31 772 1000

Omslagsbild: Bild av den konstruerade TARS-roboten framför Chalmers kårhus.

Skriven i L^AT_EX
Göteborg, Sverige 2018

FÖRORD

Denna rapport är ett kandidatarbete skrivet under vårterminen 2018 vid Chalmers tekniska högskola vid avdelningen för System- och Reglerteknik på Institutionen för Elektroteknik. Arbetet är utfört av sex studenter med bakgrund från programmen Maskinteknik samt Automation och Mekatronik. Rapporten beskriver försöket kring att återskapa en TARS-inspirerad robot från Interstellar.

Genom arbetet har hjälp tillhandahållits av ett flertal personer som vi vill tacka; handledaren för gruppen Adrian Ilka och examinatorn Nikolce Murgovski som har hjälpt oss genom arbetet och svarat på våra frågor. Anders Boström som har hjälpt till med rörelseekvationerna och Jonas Fredriksson som har hjälp till med momentberäkningarna vid val av aktuator. Med simuleringen och reglersystemen har vi fått hjälp av Yiannis Karayiannidis, Ahmet Kayhan och Ramin Jaberzadeh Ansari. Med konstruktion och byggandet av roboten har vi fått hjälp från Göran Stigler, Reine Nohlborg och Jan Bragee i Chalmers prototypverkstad. Dessutom vill vi tacka Chalmers robotförening som har bistått med lokal, diverse komponenter samt vägledning och hjälp. Till sist vill vi tacka Akira B Higaki, LL-Teams, Steven H. Collins, Martijn Wisse och Andy Ruina som har gett oss tillåtelse att använda deras bilder i denna rapport.

SAMMANFATTNING

TARS är en robot som introducerades i filmen Interstellar från 2014. Roboten består av fyra rektangulära block som är kopplade med varandra vilket kan skapa en rörelse genom att rotera varje block individuellt. Två av gångsätten för TARS efterliknar rörelsen för gående robotar.

Målet med arbetet som utförts vid Chalmers tekniska högskola var att konstruera en TARS-inspirerad robot som har ett liknande utseende och rörelse som TARS samt utveckla en teoretisk modell för robotens stabilitet. De andra funktionerna hos TARS, såsom robotens artificiella intelligens, betraktades inte. I arbetet utvecklades ett koncept som verifierades med SimMechanics. Utifrån konceptet dimensionerades robotens olika komponenter och en konstruktion modellerades i CATIA V5. Robotens dynamik modellerades och användes som bas för att designa robotens reglersystem.

Resultatet av arbetet var en robot, med storleken 1000x705x156 mm, som kunde röra sig framåt, bakåt och svänga vänster eller höger. Roboten styrdes med hjälp av Bluetooth och Android-applikationen Arduino Bluetooth Controller. Simulering av reglersystem med återkoppling utfördes i Simulink men på grund av begränsad tid var det inte möjligt att implementera reglersystemet. Den totala kostnaden för material och komponenter för arbetet var 4809,71 kr.

SUMMARY

TARS is a robot that was introduced in the 2014 film Interstellar. The robot consists of four rectangular blocks that are connected to each other. The movement of the robot is created by individually rotating each block which closely resembles the motion of a walking robot.

The project was performed at Chalmers University of Technology and the goal was to construct a TARS-inspired robot that would have similar appearance and movements as TARS and develop a theoretical model for the stability. The other functions with TARS, for example the artificial intelligence, was not considered. In the project, a concept was developed which was verified using SimMechanics. The concept components were dimensioned and designed using CATIA V5. The dynamics of the robot was modelled and was used as a base to design the control system of the robot.

The result of the project was a 1000x705x156 mm sized robot that could move forwards, backwards and turn left or right. The robot was controlled by using Bluetooth and the Android app Arduino Bluetooth controller. Simulation of the control systems was carried out by using Simulink, however due to the limited time, the control system was never implemented. The total cost of materials and components for the project was 4809,71 SEK.

Keywords: TARS, walking robot, gående robot, Interstellar.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	INLEDNING	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte	2
1.3	Precisering av frågeställningen	2
1.4	Avgränsningar	3
1.5	Rapportens disposition	3
2	TIDIGARE PROJEKT KRING GÅENDE ROBOTAR	4
2.1	TARS-inspirerade robotar	4
2.2	Passive-dynamic walkers	5
2.3	Humanoida robotar	6
3	KONCEPTVAL OCH MODELLERING	7
3.1	Konceptgenerering och val av koncept	7
3.1.1	Det valda konceptet	8
3.2	Beräkning av vevslängens längd	9
3.3	Mekanisk modellering och simulering	10
4	KOMPONENTVAL	12
4.1	Val av mikrokontrollerkort	12
4.2	Val av aktuator	12
4.2.1	Momentberäkning för val av aktuator	13
4.2.2	Val av motortyp	15
4.2.3	Dimensionering av DC-motor	16
4.3	Val av motordrivarkort	18
4.4	Val av vinkelsensor och trycksensor	18
4.5	Val av rullningslager	19
4.6	Val av energiförsörjning	20
4.7	Val av trådlöst kommunikationssätt	21
4.8	Kretsschema	22
5	KONSTRUKTION	24
5.1	Robotens konstruktion	24
5.2	Konstruktion av blocken	25
5.3	Konstruktion av motorpaket	26
5.3.1	Konstruktion av lagerhus	26

5.3.2	Konstruktion av motorfäste	27
5.3.3	Konstruktion av vevaxel	28
5.3.4	Verifiering av vevaxelns hållfasthet	29
6	REGLERSYSTEM	30
6.1	Öppen styrning	30
6.2	Matematisk Modell	31
6.2.1	Elektrisk modell	31
6.2.2	Mekanisk modell	32
6.3	Reglersystem på linjär tillståndsform	36
6.4	Design av styrsignal till reglersystem	38
6.5	Återkoppling	39
7	PROGRAMMERING OCH MJUKVARA	41
7.1	Implementering av trådlös fjärrkontroll	41
7.2	Flödesschema för huvudprogrammet	42
8	VERIFIERING OCH RESULTAT	44
8.1	Konstruktion	44
8.2	Simulering och verifiering av öppen styrning	45
8.3	Simulering av återkopplat system	46
8.4	Verifiering av robot	47
8.4.1	Verifiering av fjärrkontroll	47
8.4.2	Verifiering av rörelse	48
8.4.3	Verifiering av batteritid	49
9	DISKUSSION	50
9.1	Konstruktion och komponentval	50
9.2	Styrning och reglering	51
9.3	Rörelse	51
9.4	Miljö och hållbarhet för material	52
9.5	Samhälleliga och etiska aspekter	53
9.6	Förbättringsmöjligheter	53
9.6.1	Förbättringsmöjligheter för stabiliteten	53
9.6.2	Förbättringsmöjligheter för konstruktionen	54
10	SLUTSATS	55
	REFERENSER	56
	BILAGOR	I
A	Konceptval och modellering	I
A.1	Kravspecifikation	I
A.2	Funktionsstruktur	II
A.3	Morfologisk matris	III
A.4	Eliminering av lösningar	VI
B	Komponentval	VII
B.1	Komponentlista	VII

	B.2	Värden från momentberäkning	VIII
	B.3	Värden från lagerberäkning	IX
	B.4	Kretsschema och simulering över spänningsfall	X
C		Reglersystem	XII
	C.1	SimMechanics-modell	XII
	C.2	Värden från den matematiska modellen	XIV
	C.3	Beräkning av tröghetsmoment	XV
	C.4	Friläggning när de inre blocket är i kontakt med marken . . .	XVIII
	C.5	Algoritmen för styrsignalen	XXI
	C.6	Simulering av det återkopplade systemet i Simulink	XXII

1

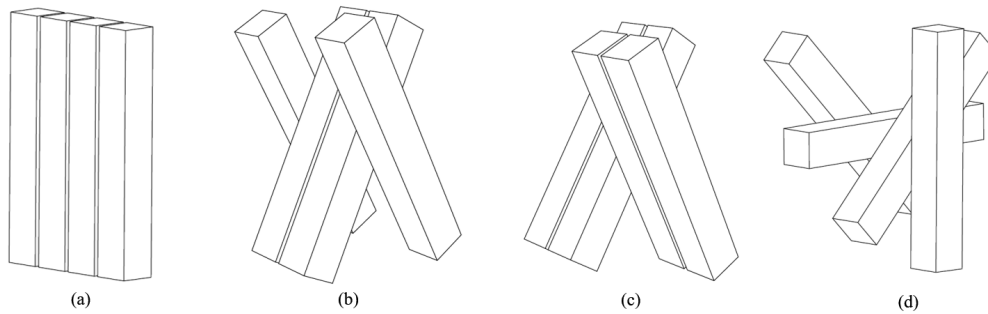
INLEDNING

För att skapa en bild av vad som behandlas i detta kandidatarbete inleds rapporten med projektets bakgrund och syfte och försätts med precisering av frågeställningen och avgränsningar. För att få en bättre förståelse på rapportens upplägg avslutas kapitlet med en översikt av rapportens disposition.

1.1 Bakgrund

I filmen *Interstellar* introduceras den gående roboten TARS. Genom åren har det skett många framsteg kring gående robotar. Från L.A Ryggs primitiva patent om en mekaniserad häst till dagens humanoida robotar, som Hondas robot ASIMO som kan gå upp för trappor och undvika hinder [1], [2]. Gående robotar har fördelar jämfört med rullande robotar, speciellt i komplexa terrängar där rullande robotar sällan kan övervinna hinder som är högre än halva hjulets radie. För gående robotar är begränsningen istället robotens frigångshöjd, vilket oftast är högre än hjulets radie [3]. Dessa egenskaper gör att gående robotar är anpassade att användas i svårtillgängliga miljöer och kan därför användas till exempel vid minröjning. Nackdelen med gående robotar är att de använder sig av komplexa mekanismer som kräver ett avancerat reglersystem med en mängd sensorer för få roboten att gå [3]. Detta resulterar i höga kostnader jämfört med rullande robotar. Dessutom är gående robotar generellt sett väldigt energikrävande, till exempel Hondas ASIMO som har en kort användningstid per batteriladdning [4].

TARS är sammankopplad med fyra rektangulära block vilket ger TARS en funktionell design, se Figur 1. Genom att individuellt rotera blocken på olika sätt kan den snabbt och smidigt ta sig framåt. Filmen visar att TARS-roboten har tre olika gångsätt vilket kan ses i Figur 1, i rapporten benämns dessa gångsätten enligt Figur 1. Vid filminspelningen byggdes ingen fungerande TARS utan istället användes ett metallskal som styrdes av en människa [5].



Figur 1: TARS består av fyra rektangulära block. I figuren visas olika tillstånd och gångsätt: (a) är startpositionen, (b) är gångsätt 1, vilket liknar en kryckgång, (c) är gångsätt 2 vilket liknar människogången och (d) är gångsätt 3, då den rullar framåt.

Det finns flera fördelar med att realisera TARS. Exempelvis förenklas underhållet av roboten, eftersom den har en modulär design bestående av fyra huvuddelar. Att förverkliga denna design skulle dessutom ge samma fördelar som med gående robotar fast med en mindre komplex konstruktion. Däremot finns det väldigt lite dokumentation om själva TARS-robotens dynamik och konstruktion.

1.2 Syfte

I detta arbete ska en robot liknande TARS från filmen *Interstellar* konstrueras. Syftet är att undersöka hur en sådan robot, bestående av fyra rätblocksformade ben, kan byggas och programmeras för att själv kunna förflytta sig med ett eller flera olika gångsätt.

1.3 Precisering av frågeställningen

I detta arbete kommer följande delproblem lösas:

- Bestämma en matematisk modell för robotens dynamik.
- Finna en mekanisk konstruktion som gör robotens rörelse realiserbar.
- Implementera ett trådlöst kommunikationssätt för att styra roboten.
- Få roboten att ta sig framåt utan att ramla.

1.4 Avgränsningar

På grund av den begränsade tiden på 18 veckor och en budget på 5000 SEK gjordes följande avgränsningar:

- Endast robotens gående rörelse kommer att undersökas.
- Enbart gångsätt 1 kommer att implementeras.
- Robotens rörelsegång kommer endast att testas på plana underlag med hög friktion och under vindstilla förhållanden.

1.5 Rapportens disposition

I Kapitel 2 redovisas tidigare lösningar på liknande problem. Kapitel 3 beskriver tillvägagångssättet, som har använts för att ta fram det slutgiltiga konceptet och simulering av konceptet i SimMechanics. Därefter beskrivs komponentvalen i Kapitel 4. Konstruktionen som modellerades i CATIA V5 och konstruktion av komponenter behandlas i Kapitel 5. Kapitel 6 tar upp styrningen av roboten och de beräkningar och matematiska modelleringar som gjorts för att skapa ett återkopplat reglersystem. I kapitel 7 förklaras hur koden som styr roboten är uppbyggd samt hur den trådlösa kommunikationen till roboten fungerade. I Kapitel 8 redogörs för hur roboten testats och resultat presenteras. Kapitel 9 är en diskussionsdel och i Kapitel 10 erhålls slutsatserna.

2

TIDIGARE PROJEKT KRING GÅENDE ROBOTAR

För att få en bild av de problem som behövde lösas samt för att få inspiration till hur lösningar kunde utformas, genomfördes studier av liknande robotar. Först studerades endast robotar som tydligt inspirerats av TARS. Då inte tillräckligt många hittades utökades sökningarna till andra typer av fyrbenta robotar. Dessutom undersöktes humanoida robotar för att få ytterligare inspiration då deras rörelse är lik TARS.

2.1 TARS-inspirerade robotar

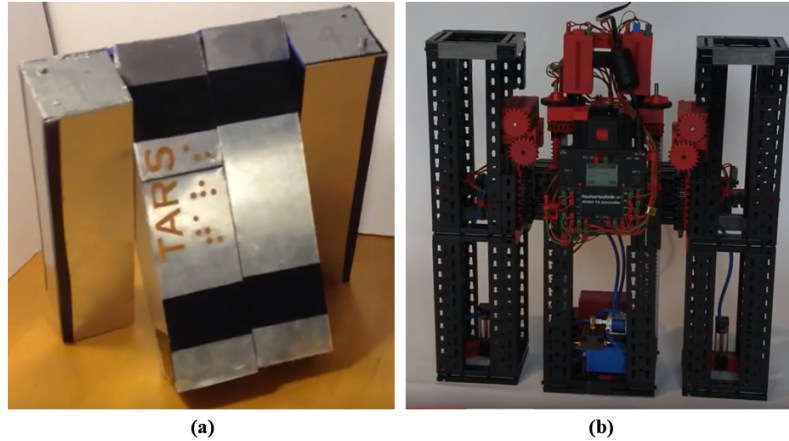
På hemsidan Instructables har användaren TechMartian lagt upp en instruktion på hur man kan bygga en modell av TARS i papp [6], vilket kan ses i Figur 2. Här finns instruktioner för konstruktionen och programmeringen av servomotorernas rörelser. Instruktionen för roboten tycks däremot inte fungera som den ska då benen inte höjs, utan istället slår i golvet vid fel tillfällen.



Figur 2: TechMartian TARS robot och är återgiven utifrån BY-NC-SA [6].

På Youtube finns ett stort antal videos på hemmabyggda robotar som har inspirerats av TARS. Ett exempel är Akira B Higaki robot, som höjer och vinklar upp benen när den går, vilket gör att gångstilen påminner mycket om TARS [7], se Figur 3. Däremot höjs och vinklas benen inte samtidigt, vilket gör att roboten blir långsam. Ett annat exempel är användaren LL-Teams som har lagt upp en film på en robot byggd med de LEGO-liknande konstruktionsblocken Fischertechnik [8], vilket kan ses i Figur 3. Unikt för denna robot är att en stång trycks ut ur botten av de block som har kontakt med marken för att roboten ska tippa framåt och därefter kunna ta nästa steg. Ett tredje videoexempel är från The Robotics Club som har byggt en enkel robot som inte vinklar benen

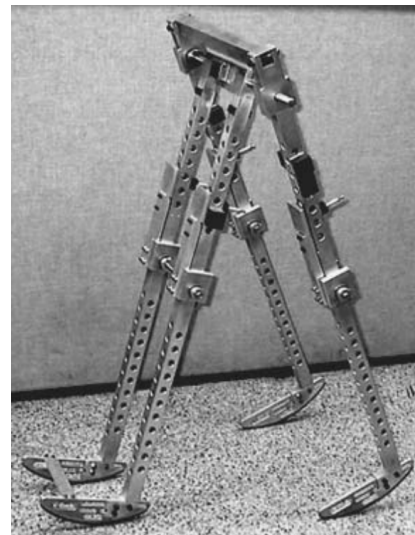
framåt när den går, utan hela tiden låter dem vara lodräta [9]. På detta sätt blir det lättare att få roboten att balansera men gångarten efterliknar inte TARS-gången på samma sätt.



Figur 3: (a) visar Higaki TARS robot som är återgiven med tillstånd [7]. (b) visar LL-Teams TARS robot som är återgiven med tillstånd [8].

2.2 Passive-dynamic walkers

På grund av den begränsande informationen om robotens dynamik från de tidigare TARS projekten utökades sökningen till att inkludera forskning kring andra typer av gående robotar. Passive-dynamic walkers är robotar vars design liknar TARS med fyra stela ben. De är en klass av robotar som ursprungligen kom från McGreers forskning från 1990 [11]. Robotarna utnyttjar gravitationen för att förflytta sig framåt och behöver alltså få eller inga aktuatorer för att röra sig. Dessutom behövs inget regelsystem för att hålla balansen. Den här klassen av robotar kan ha olika typer av ben. De kan ha raka ben liksom TARS, vilket kan ses i Figur 4, eller ben med leder liknande knän. Passive-dynamic walkers kan endast gå i lätt nedförsbacke och klarar inte av komplexa terränger då deras dynamik har svårt att hantera störningar. Detta resulterar i att det finns få praktiska tillämpningar för denna typ av robot.



Figur 4: Ett exempel på en Passive-dynamic walker med fyra stela ben från [10]. Bilden är återgiven med tillstånd.

2.3 Humanoida robotar

Ett exempel på robotar som kan hantera en mer komplex terräng är humanoida robotar som består av två ben och armar samt en torso. Till skillnad från TARS har roboten bara två ben med tre leder på varje ben istället för TARS fyra stela ben. Ett exempel på en humanoid robot är Hondas Asimo i Figur 5. I varje led finns det servomotorer med harmoniska växlar som gör att roboten kan rotera och lyfta sina ben [13]. Roboten har dessutom trycksensor i foten och gyroskop och accelerometer i kroppen som används för robotens ZMP, Zero Moment Point, reglersystem för att kunna hålla balansen [14]. Resultatet av detta är att roboten går likt en människa och klarar av hinder såsom trappor. Roboten har en tillsynes mer komplex konstruktion jämfört med TARS.



Figur 5: Den humanoida roboten Asimo som består av två armar och ben samt en torso [12]. Bilden är publicerad av CC BY-SA 3.0.

3

KONCEPTVAL OCH MODELLERING

För framtagning av lösningar till robotens delfunktioner och val av ett färdigt koncept, genomfördes konceptgenerering och konceptval, vilket beskrivs i detta kapitel. Kapitlet innehåller också en beskrivning om det valda konceptet och sedan hur konceptet virtuellt modellerades, simulerades och verifierades i programvaran SimMechanics.

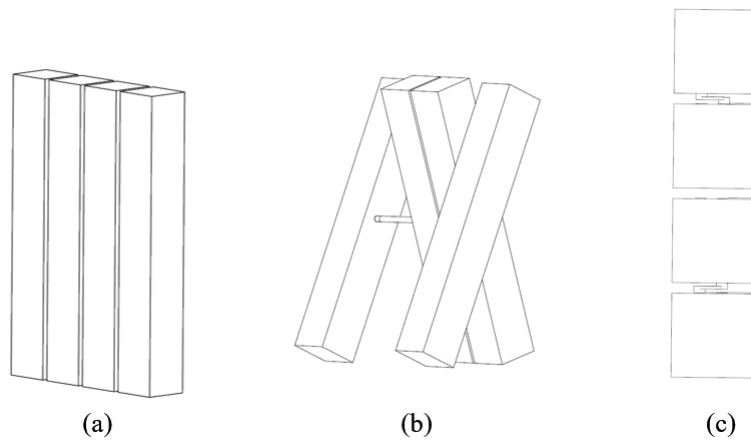
3.1 Konceptgenerering och val av koncept

För framtagningen av konceptet togs mycket inspiration från produktutvecklingsmetoden från Värde modellen [15]. Utifrån projektets syfte, frågeställning och avgränsningar skapades en kravspecifikation där krav ställdes på till exempel funktion, form och livslängd. Kravspecifikationen kan ses i Bilaga A.1. Från kravspecifikationen togs en funktionsstruktur fram där huvudfunktionen, förflytta sig framåt, delades upp i delfunktioner, se Bilaga A.2. Utifrån funktionsstrukturen identifierades delproblemen och lösningar till delproblemen togs fram genom idégenerering. Dessa lösningar placerades i en morfologisk matris för att generera helhetskoncept, se Bilaga A.3. Genom att kombinera alla dellösningar på ett systematiskt sätt kunde ett stort antal koncept genereras. Därefter eliminerades koncept tills endast en återstod. Till en början sällades koncept innehållande dellösningar som inte var realiserbara eller av olika skäl var omöjliga att kombinera. De kunde till exempel vara omöjliga att kombinera på grund av geometriska skäl, att de delvis utgjorde samma funktion eller att de tillsammans inte uppfyllde alla delfunktioner.

3.1.1 Det valda konceptet

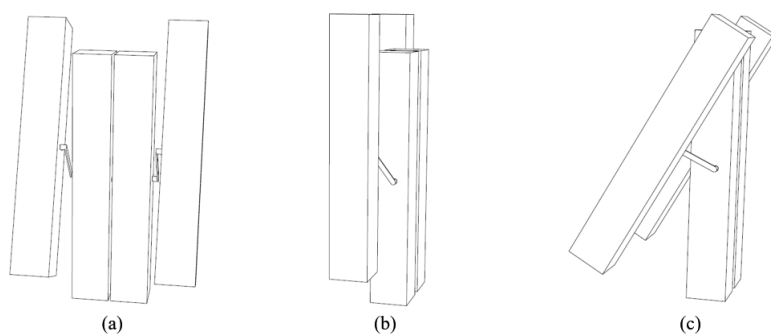
Det valda konceptet består av fyra rektangulära block med två vevaxlar som binder ihop de yttre blocken med de inre, se Figur 6. De inre blocken sitter ihop och rör sig som en del eftersom endast gångsätt 1 ska implementeras. Vevaxelns funktion är att få blocken att rotera och lyfta. Detta uppnås med aktuatorer som är sammankopplade med vevaxeln i varje ände, som monteras i mitten av varje block.

Lösningen med vevaxeln valdes eftersom det är en enkel lösning som både kan höja och sänka blocken samt rotera dem. De andra koncepten som löste dessa funktioner eliminerades då de var instabila eller krävde extra komponenter vilket skulle gjort lösningen dyrare och mer komplex.



Figur 6: Skiss av det valda konceptet. (a) visar startpositionen, (b) positionen efter första steget och (c) är en vy ovanifrån i startläget.

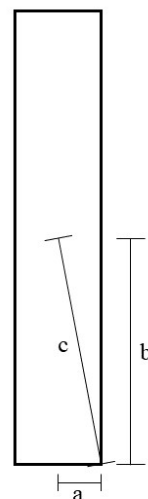
När roboten förflyttar sig med gångsätt 1 börjar den lyfta upp ytterblocken genom att rotera aktuatorerna i innerblocken. När ytterblocken lyfts från marken börjar aktuatorerna i dem rotera, vilket får dem att vinklas framåt och få en infallsvinkel till marken, se Figur 7. När ytterblocken nått marken igen kan nästa steg påbörjas genom att upprepa samma sekvens fast med motsatta aktuatorer. I det valda konceptet är det också möjligt att rotera roboten i sidled genom att förflytta ytterblocken åt motsatt håll. När roboten exempelvis ska rotera åt vänster, roteras de två aktuatorerna på vänster sida av roboten bakåt och på höger sida roteras de framåt. Roboten stabiliseras med ett regelsystem som kräver sensorer som mäter blockens vinkel och när blocken vidrör marken.



Figur 7: Olika vyer av konceptet under ett steg med gångsätt 1. (a) visar roboten framifrån när blocken lyfts, (b) visar samma läge från sidan och (c) visar när de lyfta blocken vinklats framåt.

3.2 Beräkning av vevslängens längd

För att kunna verifiera konceptets mekanik beräknades hur lång vevslängen för vevaxeln behövde vara. Vevslängens funktion är att undvika att hörnen på blocken slår i marken när de svänger framåt. För att beräkna den längd som minst krävs användes Pythagoras sats, se Ekvation (1) och Figur 8. Resultatet blev att avståndet från centrum av blocket till hörnen är 505,6 mm, vilket innebär att vevaxeln behöver vara minst 5,6 mm lång, se Ekvation (2). Beräkningen använder dimensionen för roboten från kravspecifikationen (Bilaga A.1). Om det block som är på marken däremot står snett är 5,6 mm inte tillräckligt. Då det inte fanns en övre gräns för hur lång vevaxeln kunde vara, samt att en längre vevaxel möjliggör att roboten kan gå snabbare då den kan ta längre steg, valdes en stor säkerhetsmarginal och axeln gjordes 40 mm lång.



Figur 8: Sträckan a är halva blockets bredd, b är halva blockets höjd och c är avståndet från centrum av blockets sida till hörnet.

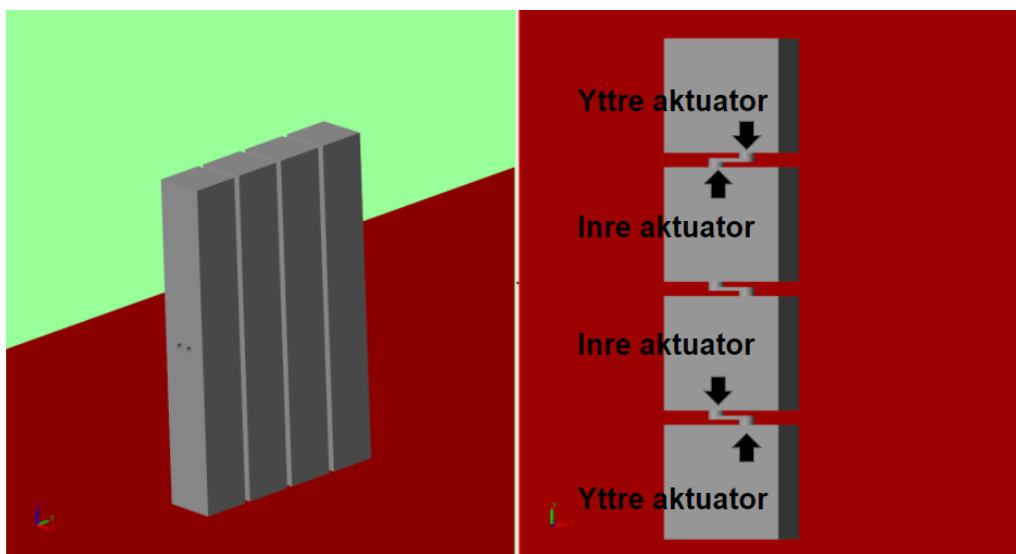
$$c = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{75^2 + 500^2} = 505,59 \text{ mm} \quad (1)$$

$$c - b = 5,59 \approx 5,6 \text{ mm} \quad (2)$$

3.3 Mekanisk modellering och simulering

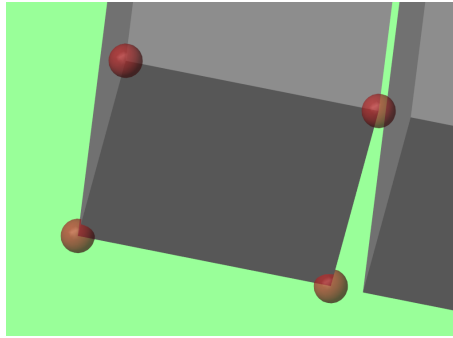
För att verifiera att konceptets mekanik var realiserbar, gjordes en virtuell modellering och simulering i SimMechanics. Detta är ett bibliotek i Simulink där mekaniken för koncept kan modelleras och simuleras. Den största frågeställningen var om roboten skulle kunna gå utan att ramla eller om tyngdpunkten skiftade för mycket bakåt under rörelsen.

SimMechanics utförde simuleringen på en förenklad CAD-modell av konceptet som skapades i programmet Inventor 2017. Modellen har en enklare konstruktion än det tänkta konceptet för roboten då detta förenklade modelleringen och simuleringen i SimMechanics. Den förenklade CAD-modellen har de yttre dimensionerna som är specificerade i kravspecifikationen (Bilaga A.1) samt vevslängens längd som är beräknad i Avsnitt 3.2. Det övergripande arbetssättet för den mekaniska simuleringen baserades på Walking Robot av Mathworks Student Competition Team [16]. För att möjliggöra rörelse lades leder på vardera sida av axlarna för att efterlikna aktuatorer. Aktuatorernas placering ses i Figur 9. Inga leder lades till mellan de två mittenblocken då de under gångsätt 1 ska vara låsta i förhållande till varandra.



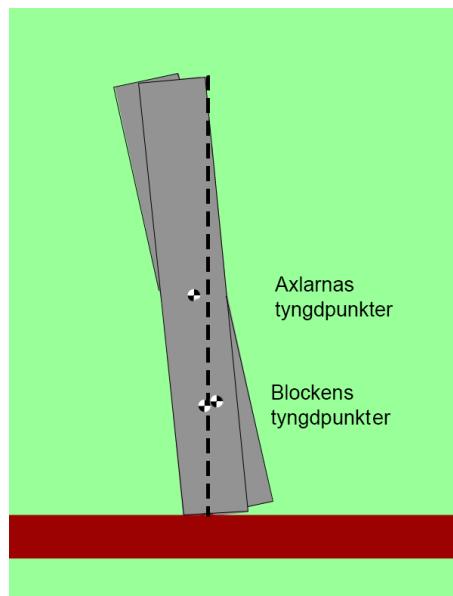
Figur 9: Aktuatorernas placering vid ändarna av vevaxlarna. De inre respektive de yttre rör sig synkroniserat i par.

Modellen utvecklades vidare i SimMechanics genom att ett golv skapades som hade kontakt med roboten. För att skapa kontakten utnyttjades biblioteket Simulink Contact Forces library [17]. Med detta bibliotek kunde kontakten mellan en plan yta och en sfär simuleras. I varje block skapades en referensram i varje hörn där sfärer modellerades. Detta bibliotek kan inte modellera kontakt mot hörn och därför användes sfärerna. Sfärerna för ett block ses i Figur 10. Hur rörelsen implementerades i SimMechanics går igenom i Avsnitt 6.1.



Figur 10: Sfärerna som simulerar kontakt med golvet i skala 1:10.

Simuleringen visar att konceptet var möjligt att realisera. Simuleringen kan ses på Youtube hos kontot TARS EENX15-18-19 [18]. Den mekaniska simuleringen för roboten kan från upprätt läge ta tre steg och därefter dra ihop blocken till ursprungsläget. Anledningen till att denna sekvens valdes var för att detta kunde verifiera att roboten kan utföra alla delmoment av gångsätt 1. Roboten kunde ej utföra denna sekvens när tyngdpunkten låg i höjd med axlarna, det vill säga i centrum av varje block. Roboten ramlade då bakåt eftersom tyngdpunkten i vissa delar av rörelsesekvensen hamnade för långt bak. Tyngdpunkten flyttades därför ner till en fjärdedel av blockets höjd från marken och roboten kunde då hålla balansen. De förflyttade tyngdpunkterna kan ses i Figur 11. Hade tyngdpunkten varit i centrum hade roboten tippat bakåt vilket den streckade linjen visualiserar.



Figur 11: Förflyttning av blockens tyngdpunkter från centrum till en fjärdedel ner för att roboten ska kunna hålla balansen under rörelsen. Hade blockens tyngdpunkter varit i mitten hade den totala tyngdpunkten för roboten varit för långt bak och roboten hade ramlat.

4

KOMPONENTVAL

När modelleringen och simuleringen hade verifierat att den valda lösningen var realiserbar behövde komponentval göras. I detta kapitel förklaras vilka val som gjordes. I Bilaga B.1 kan alla komponenter ses.

4.1 Val av mikrokontrollerkort

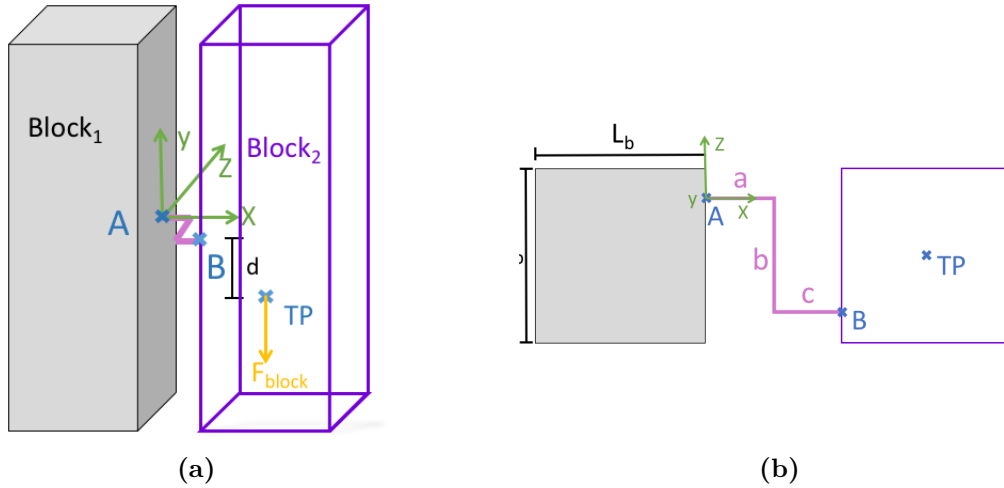
Mikrokontrollerkortet har som funktion att skicka signaler till aktuatorer, läsa av sensorer och beräkna nya signaler för aktuatorer utifrån ett reglersystem. Vid valet av mikrokontrollerkort togs hänsyn till programmeringsspråket, antalet digitala och analoga portar samt priset. Arduino Mega uppfyllde alla dessa krav och valdes. Kortet har en spänning på 5 V och har 16 analoga portar och 54 digitala portar, där 15 portar kan användas till pulsbreddmodellering [19]. Pulsbreddmodellering är en teknik som kan variera spänningen genom att snabbt stänga av och sätta på spänningen för olika frekvenser [20]. Arduino Mega-kortet programmeras i Arduino IDE.

4.2 Val av aktuator

Aktuatorns funktion är att generera tillräckligt med moment för att kunna rotera vevaxeln under en viss vinkelhastighet. När aktuatoren valdes togs det hänsyn till aktuatorns moment, vinkelhastighet och pris. Beräkningarna som utfördes för att bestämma kravet på aktuatorns moment förklaras i följande avsnitt liksom val av motortyp och dimensionering av motor.

4.2.1 Momentberäkning för val av aktuator

För att veta det krävda momentet för att rotera vevaxeln gjordes en momentberäkning i det läge där momentet är som störst. Detta är precis när roboten lämnar sitt ursprungsläge, se Figur 12. För beräkningen antas roboten endast bestå av två block eftersom roboten rör sig symmetriskt.



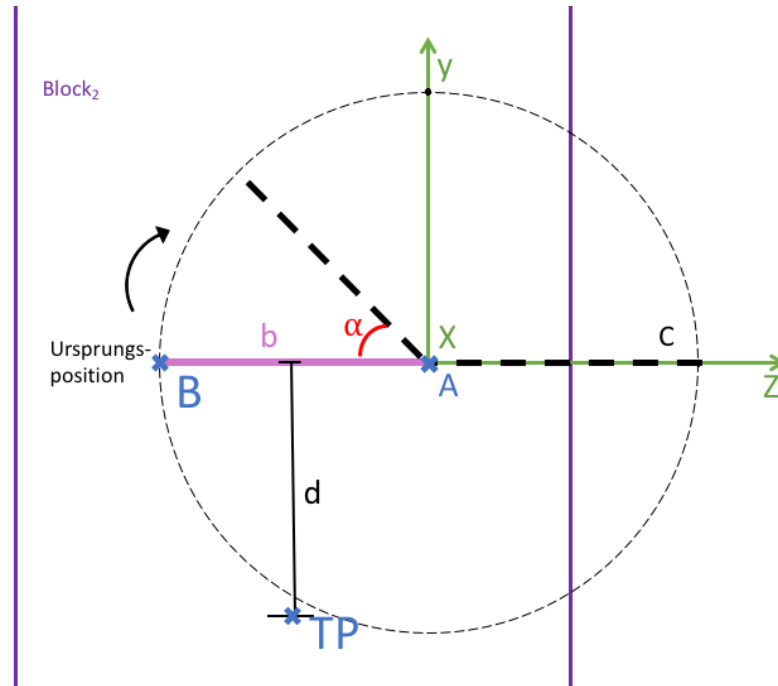
Figur 12: (a) visar blockens ursprungsposition från sidan. Punkterna A och B motsvarar fästpunkterna för den inre och yttre aktuatoren. (b) visar blockens ursprungsposition ovanifrån.

Det totala momentet som krävs för att lyfta blocket är summan av tröghetsmomentet, $M_{trög}$ och vridmomentet utgående från blockets tyngdpunkt, M_{vrid} , se Ekvation (3). För beräkning av vridmomentet se Ekvation (4). Värdena som användes till variablerna kan ses i Bilaga B.2. Tröghetsmomentet uteslöts från beräkningen eftersom den endast bidrar under accelerationsfasen. Momentberäkningen gäller endast under den konstanta fasen för att få det nominella momentet som krävs.

$$M_{driv} = M_{trög} + M_{vrid} \quad (3)$$

$$M_{vrid} = \mathbf{F}_{kraft} \times \mathbf{L}_{TP}, \quad \begin{cases} \mathbf{F}_{kraft} = [0, -F_{TP}, 0], & F_{TP} = m_{block} \cdot g \\ \mathbf{L}_{TP} = [\mathbb{X}, \mathbb{Y}, \mathbb{Z}] \end{cases} \quad (4)$$

Under rörelsen krävs ett varierande moment för att lyfta blocket på grund av att hävarmen i y- och z-led varierar. Dessa varierar som en sinus- och cosinuskurva med vinkeln α och radien b , enligt Figur 13. Ekvationen för hur y- och z-axeln varierar kan ses i Ekvation (5). Momentberäkningen för den inre och yttre aktuatoren är lika, men momentkurvan för den yttre aktuatoren är förskjuten i sidled. Detta beror på att ekvationen för hävarmen kommer att vara olika. I följande beräkning kommer endast momentkurvan för den inre aktuatoren tas fram.



Figur 13: Koordinaterna för hävarmen, $L_{TP,1}$ börjar i punkten B. Vid punkten C har roboten gått ett steg. d är avståndet från enhetscirkelns origo till blockets tyngdpunkt. Vinkeln α visar axelns vinkel under rörelsen.

$$\mathbf{L}_{TP,1} = [\mathbb{X}, \quad \mathbb{Y}, \quad \mathbb{Z}] \quad \begin{cases} \mathbb{X} = (a + c + \frac{L_b}{2}) \\ \mathbb{Y} = \sin(180 - \alpha) - d \\ \mathbb{Z} = \cos(180 - \alpha) \end{cases} \quad (5)$$

Med hjälp av graferna från Avsnitt 6.1, Figur 29, kunde ett samband mellan tid och vinkel skapas. Enligt grafen varierar vinkeln linjärt med tiden. Detta gav sambandet enligt Ekvation (6).

$$\alpha = (kt + m) \frac{2\pi}{360} \rightarrow \alpha = \frac{-(13\pi t)}{18} \quad (6)$$

Momentkurvan för den inre aktuatoren kan ses i Figur 14. Varje steg beräknades ta 1,5 s. Vid vartannat steg kommer den inre aktuatoren behöva gå 30° extra under samma tid på grund av att den behöver rotera i förhållande till marken för att utöva gångsätt 1. Från grafen kan man se att det största momentet som blir uppmätt är 2,85 Nm som kommer krävas för att aktuatoren ska kunna rotera vevaxeln.

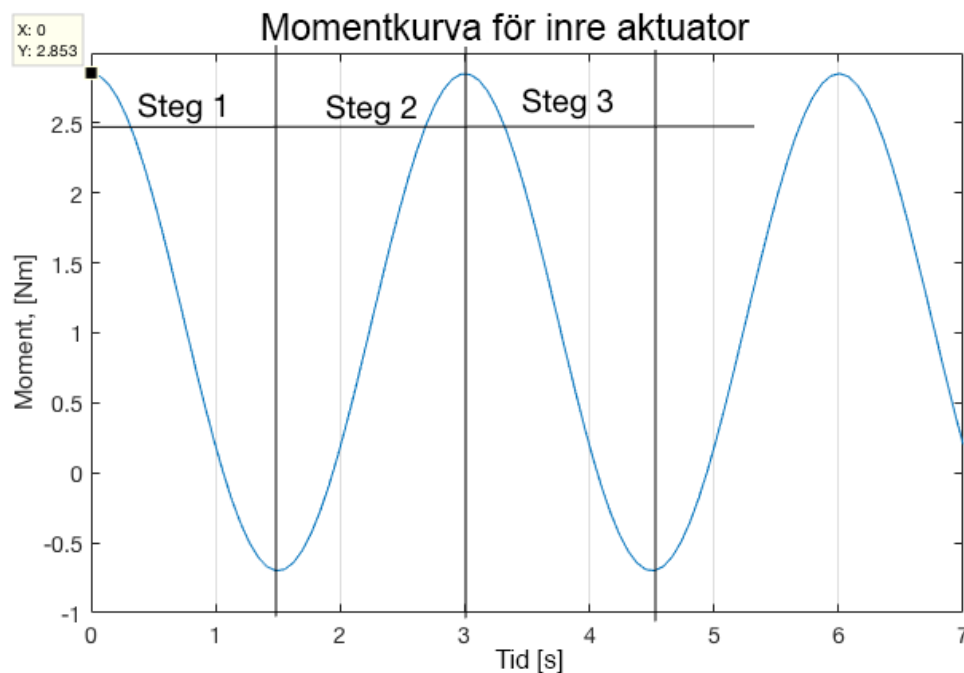


Figure 14: Moment-tid-kurva för den inre aktuatoren. På x-axeln visas tiden medan y-axeln visar momentet. Det största momentet uppgår till 2,85 Nm.

4.2.2 Val av motortyp

Enligt momentberäkningen i Avsnitt 4.2.1 krävs det 2,85 Nm för att rotera vevaxeln och konceptvalet krävde att vevaxeln skulle roteras kontinuerligt. Enligt kravspecifikationen (Bilaga A.1) ska roboten ta ett steg på maximalt 1,5 s. Ett steg motsvarar ett halvt varv för vevaxeln och således måste vinkelhastigheten för motorn vara minst 20 rpm, se Ekvation (7). Dessutom ska motorn positionsregleras för att få roboten att gå på ett bestämt sätt. Utifrån dessa krav evaluerades tre typer av elmotorer: servomotor, stegmotor och DC-motor med encoder.

$$f = \frac{\omega}{2\pi} 60 = \frac{\frac{\pi \text{ rad}}{1,5 \text{ s}}}{2\pi} 60 = 20 \text{ rpm} \quad (7)$$

En servomotor är en elmotor med ett inbyggt reglersystem som kan programmeras med Arduinos inbyggda servobibliotek [21]. De flesta servomotorer som uppfyller momentkravet och ligger inom budgeten kan endast rotera 180°. De servomotorer som kan rotera kontinuerligt är antingen för svaga eller för dyra.

En stegmotor är en DC-motor som rör sig i steg, där ett steg är en bestämd vinkel [20]. Fördelen med stegmotorn är att de kan positionstyras precist utan att implementera ett reglersystem. Dessutom kan de roteras kontinuerligt. Med en hög utväx-

ling uppfyller stegmotorn momentkravet, men inte kravet på vinkelhastigheten. En annan nackdel med stegmotorer är att de är tyngre än de andra motoralternativen då de har en järnkärna.

En DC-motor med utväxling klarar av momentkravet och har tillräckligt hög vinkelhastighet. Till skillnad från servomotor måste ett reglersystem implementeras för att kunna positionstyra motorn. Reglersystemet använder sig av en encoder för att mäta vinkelhastigheten och riktningen på motoraxeln. Fördelarna med DC-motorer är att de har lägre vikt och pris än stegmotorer samtidigt som de uppfyller moment- och varvtalskraven. På grund av dessa fördelar valdes DC-motorer med encoders som aktuatorer för vevaxeln.

4.2.3 Dimensionering av DC-motor

Dimensioneringen av DC-motorn använde data från Tabell 1 som visar vilka motorer som jämfördes och vilka parametrar som användes för dimensioneringen. Att just dessa motorer jämfördes beror på att de passade projektets budget samtidigt som yttre dimensioner som är mindre än 150 mm långa och därmed får plats i blocket. Alla modeller använder samma typ av encoder, vilket är en hallsensor med två kanaler. En hallsensor ger ett spänningsutslag när den känner av ett magnetfält. På motoraxeln finns magneter och beroende på hur lång tid det tar mellan varje utslag kan hastigheten beräknas. Den ena kanalen på sensorn används för att mäta vinkelhastigheten. Den andra kanalen har en fasvridning på 90° från den första kanalen för att bestämma riktningen.

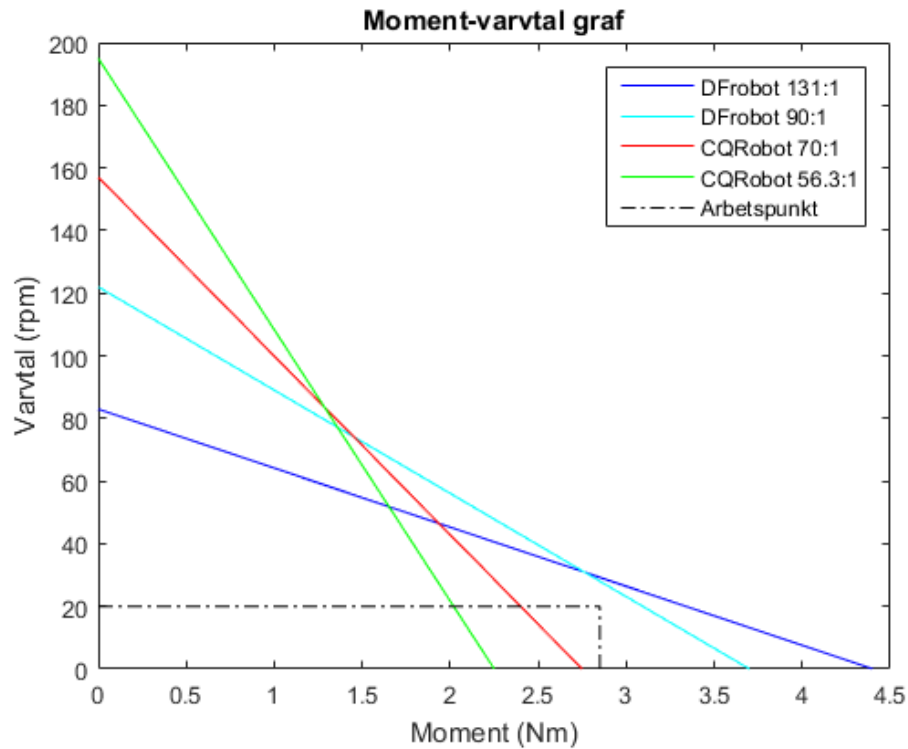
Tabell 1: Data på potentiella motorer som kommer att användas för att dimensionera motorn. Motorerna kommer ifrån två olika tillverkare, DFrobot och CQRobot. Data för motorerna kommer ifrån [22], [23] och [24].

Modell	Utväxling	Startmoment T_s	Max varvtal ω_{max}
DFrobot 131:1	131:1	4,40 Nm	83 rpm
DFrobot 90:1	90:1	3,70 Nm	122 rpm
CQRobot 70:1	70:1	2,75 Nm	157 rpm
CQRobot 56,3:1	56,3:1	2,25 Nm	195 rpm

För att verifiera att motorerna klarar av momentkravet då motorn har vinkelhastigheten på 20 rpm gjordes det en moment-varvtal-graf. Sambandet mellan momentet och varvtalet fås enligt Ekvation (8) [20]. Motorns moment, T , fås av det linjära sambandet mellan startmomentet, T_s , och förhållandet mellan varvtalet, ω och maximala varvtalet, ω_{max} .

$$T(\omega) = T_s \left(1 - \frac{\omega}{\omega_{max}}\right) \quad (8)$$

Enligt Figur 15 eliminerades CQRobot 56,3:1 och 70:1 eftersom de inte klarade av momentkravet då deras moment-varvtal kurvor ligger under arbetspunkten.



Figur 15: Moment-varvtal-graf. De färgade linjerna visar hur motorerna ändrar sitt varvtal utifrån momentet. Den streckande linjen visar arbetspunkten.

Det är rekommenderat att motorns arbetsvarvtal ska vara 70 % av motorns maximala varvtal, enligt Ekvation (9). Resultatet för alla modeller presenteras i Tabell 2.

$$\omega_{arb} = 0,7 \omega_{max} \quad (9)$$

Tabell 2: Tabellen presenterar resultatet för beräkningen av arbetsvarvtalet enligt Ekvation (9).

Model	Arbetsvarvtal ω_{arb}	Maxvarvtal ω_{max}
DFrobot 131:1	58 rpm	83 rpm
DFrobot 90:1	85 rpm	122 rpm

Resultat från Tabell 2 visar att DFRobot 131:1 ligger närmast arbetsvarvtalet, därav eliminerades DFRobot 90:1. Eftersom endast DFRobot 131:1 återstod valdes den som motor till vevaxeln. DFRobot 131:1 har en driftspänning på 12 V och har en stoppström på 7 A [23]. För att kunna styra motorn krävs det ett motordrivarkort.

4.3 Val av motordrivarkort

För att kunna ändra hastigheten och riktningen på den valda motorn krävs ett drivarkort som ska klara av en spänning på 12 V och en ström på 7 A som krävs för att driva motorn som valdes i Avsnitt 4.2.3. Därav valdes Cytron 10 A 5-25 V Dual Channel DC Motor Driver eftersom den klarar av att driva motorer med en spänning mellan 5-36 V och kan leverera upp till 10 A ström kontinuerligt och 30 A under 10 s [25]. Drivarkortet ändrar riktningen på motorn genom att byta polaritet vilket görs med en h-brygga. Hastigheten ändras genom att ändra spänningen vilket görs med pulsbreddmodellering.

4.4 Val av vinkelsensor och trycksensor

För att kunna implementera ett regelsystem behövs information om vilken vinkel rätblocken befinner sig i samt om roboten har kontakt med marken eller inte. Därav ansågs någon form av vinkelsensorer och trycksensorer nödvändiga.

För vinkelsensor valdes delvis motorernas encoder, men också en ytterligare sensor som skulle vara oberoende av hur motorerna roterar. För detta valdes komponenten MPU6050 som innehåller ett gyroskop och accelerometer som kan ge information om blockens position, hastighet och acceleration [26].

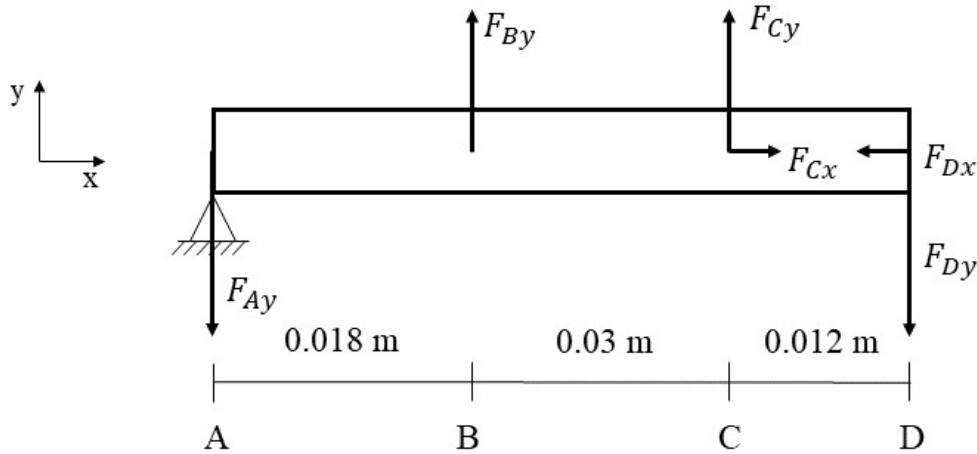
För val av trycksensorer valdes en enkel kontaktswitch av namnet Makerbot Endswitch [27]. Denna fästs på kanterna av rätblockens fötter och kan då ge information om huruvida roboten är på väg att börja ta ett steg, är på väg att slutföra ett steg eller om steget är helt slutfört.

4.5 Val av rullningslager

Rullningslager behövs i vardera ände av vevaxeln för att ta upp radiella krafter samtidigt som de möjliggör rotation av axeln. Dessa krav klarar SKF 6201/C3, ett enkelspårigt kullager med relativt lågt pris. En beräkning av lagrens livslängd gjordes för att säkerställa att de skulle fungera tillräckligt länge. Denna gjordes enligt SKF:s nya livslängdsteori, se Ekvation (10). Där $a_1 = 1$, då det räknas med en tillförlitlighet på 90 %. a_{skf} är beroende av η_c , P , P_u och κ och kan tas fram från Tabell 1-4 i SKF:s produktkatalog för rullningslager [28]. Samtliga konstanter redovisas i Bilaga B.3.

$$L_{10} = a_1 a_{skf} \left(\frac{C}{P} \right)^p \quad (10)$$

För att beräkna den dynamiska lagerbelastningen, C , frilades axeln enligt Figur 16, där kullagren sitter i punkterna B och C. De radiella stödkrafterna från kullagren är F_{By} och F_{Cy} . F_{Ay} är stödkraften från motorn och F_{Dy} är lasten som uppstår när axeln roterar och lyfter ett ben. De axiella krafterna, F_{Cx} och F_{Dx} , bedömdes vara så små att de kunde försummas. Övriga krafter beräknades med Ekvation (11)-(15).



Figur 16: Friläggning av vevaxeln. F_{By} och F_{Cy} är de radiella stödkrafterna från kullagren. F_{Ay} är stödkraften från motorn och F_{Dy} är lasten som uppstår när axeln roterar och lyfter ett ben.

$$\uparrow: -F_{Ay} + F_{By} + F_{Cy} - F_{Dy} = 0 \quad (11)$$

$$\hat{A}: 0,018 F_{By} + (0,018 + 0,03) F_{Cy} - (0,018 + 0,03 + 0,012) F_{Dy} = 0 \quad (12)$$

$$\hat{B}: 0,018 F_{Ay} + 0,03 F_{Cy} - (0,03 + 0,012) F_{Dy} = 0 \quad (13)$$

$$\hat{C}: (0,018 + 0,03) F_{Ay} - 0,03 F_{By} - 0,012 F_{Dy} = 0 \quad (14)$$

$$F_{Dy} = mg = 39,24 \text{ N} \quad (15)$$

$$\rightarrow F_{Ay} = 9,81 \text{ N}, F_{By} = 0 \text{ N}, F_{Cy} = 49,05 \text{ N}, F_{Dy} = 39,24 \text{ N}$$

Lösning av ekvationssystemet gav att den största belastningen låg på lager C som uppgick till 0,049 kN. Med detta värde kunde a_{SKF} läsas av i tabell 2 i SKF:s produktkatalog till cirka 2,5 och värdet för livslängden kunde då tas ut, se Ekvation (16). Den beräknade lagerlivslängden blev 8 200 miljarder varv och eftersom roboten tar ett steg per halvt varv kan den ta 16 400 miljarder steg innan rullningslagren går sönder, vilket bedömdes vara mer än tillräckligt.

$$L_{10} = a_1 a_{skf} \left(\frac{C}{P} \right)^p = 1 \cdot 2,5 \left(\frac{7,28 \text{ kN}}{0,049 \text{ kN}} \right)^3 = 8\,200 \text{ miljarder varv} \quad (16)$$

4.6 Val av energiförsörjning

För att tillgodose motorer och övriga elektriska komponenter med energi valdes det att använda två olika batterilösningar. Vid valet av dessa lösningar togs det hänsyn till batteriernas vikt, storlek, spänning, kapacitet och pris.

Eftersom motorerna har en rekommenderad spänning på 12 V för att drivas, enligt Avsnitt 4.2.3, letades endast efter batterier som kunde leverera denna spänning. Valet stod mellan att ha ett batteri per motor eller att flera motorer skulle dela på ett batteri med högre kapacitet. Genom att ha ett batteri per motor kan varje batteri vara mindre och därmed ha en mindre påverkan på vikten för varje block. Används endast ett batteri blir vikten ojämnt fördelad i roboten vilket kan påverka stabiliteten. Beslutet blev därför att använda fyra laddningsbara litium-polymerbatterier från Zippy Compact. Dessa har vardera en kapacitet på 2700 mAh och en spänning på 11,1 V [29].

För att verifiera att batterierna har tillräckligt lång batteritid betraktades batteriernas spänningsfall och kapacitet. För batteriernas spänningsfall utfördes en simulering i Simscape när motorerna har ett konstant arbetsmoment. Simuleringen visar ett spänningsfall på 2 mV/s vilket innebär att batterierna håller i ca 50 min innan de är under 5 V, vilket är den minsta spänningen för motordrivarkortet. Detta kretsschema och simuleringsresultat kan ses i Bilaga B.4.

För batterikapaciteten på 2700 mAh beräknades hur länge de skulle hålla vid motorernas maxkapacitet. Beräkningen använder motorernas stoppström på 7000 mA. Vilket gav resultatet 22 min innan de är helt tömda, enligt Ekvation (17).

$$\frac{2700 \text{ mAh}}{7000 \text{ mA}} \approx 22 \text{ min} \quad (17)$$

Dessa resultat analyserades och batterilösningen ansågs tillräckligt bra för ändamålet. För längre användning av roboten rekommenderas batterier med högre laddningskapacitet. Vid krav på bättre prestanda skulle även batterier med större voltspänning kunna användas, som exempelvis 14,8 V eller 18,5 V och därefter skalas ner till 12 V med en DC/DC-omvandlare.

För strömförsörjning av mikrokontrollen och de övriga elektriska komponenterna, som går att se i Tabell 3 samt Figur 17, valdes det att använda Clas Ohlsons Powerbank 3350 mAh. Powerbanken ansluts via USB och ger en spänning på 5 V vilket är den rekommenderade spänningen för den valda mikrokontrollen (Avsnitt 4.1). Powerbanken är enkel att ladda upp och kan strömförsörja systemet oberoende av systemets säkerhetsströmbrytare som går att se i kretsschemat i Avsnitt 4.8. Strömförsörjningen hade även kunnat ske genom samma batterier som för motorerna. Då hade dock spänningen behövt skalas ned till 5 V, vilket bedömdes vara mindre smidigt än lösningen med en Powerbank.

4.7 Val av trådlöst kommunikationssätt

Vid val av trådlös fjärrkontroll bestämdes det att använda Bluetooth som lösning. Bluetoothenheten ska enkelt kunna skicka och ta emot information, till och från mikrokontrollen, och därmed möjliggöra smidig trådlös styrning av roboten. För att genomföra detta valdes komponenten HC06, vilket är ett Bluetoothkort som är kompatibelt med den valda mikrokontrollen, Arduino Mega [30].

Andra alternativ som övervägdes för den trådlösa styrningen var bland annat att skicka signaler via Wi-Fi. Detta skulle dock innebära inköp av antingen ett Raspberry Pi-kort eller ett Arduino Wi-Fi shield. Eftersom det valdes att endast implementera ett Arduino Mega-kort valdes Raspberry Pi bort, då ett kommunikationssätt mellan de två olika typerna av kort hade behövt skapas. Ett Wi-Fi shield hade kunnat fungera, men det är betydligt dyrare och eftersom roboten inte planerades att manövreras längre än 15 m från användaren enligt kravspecifikationen (Bilaga A.1) ansågs Bluetooth som ett bättre val.

4.8 Kretsschema

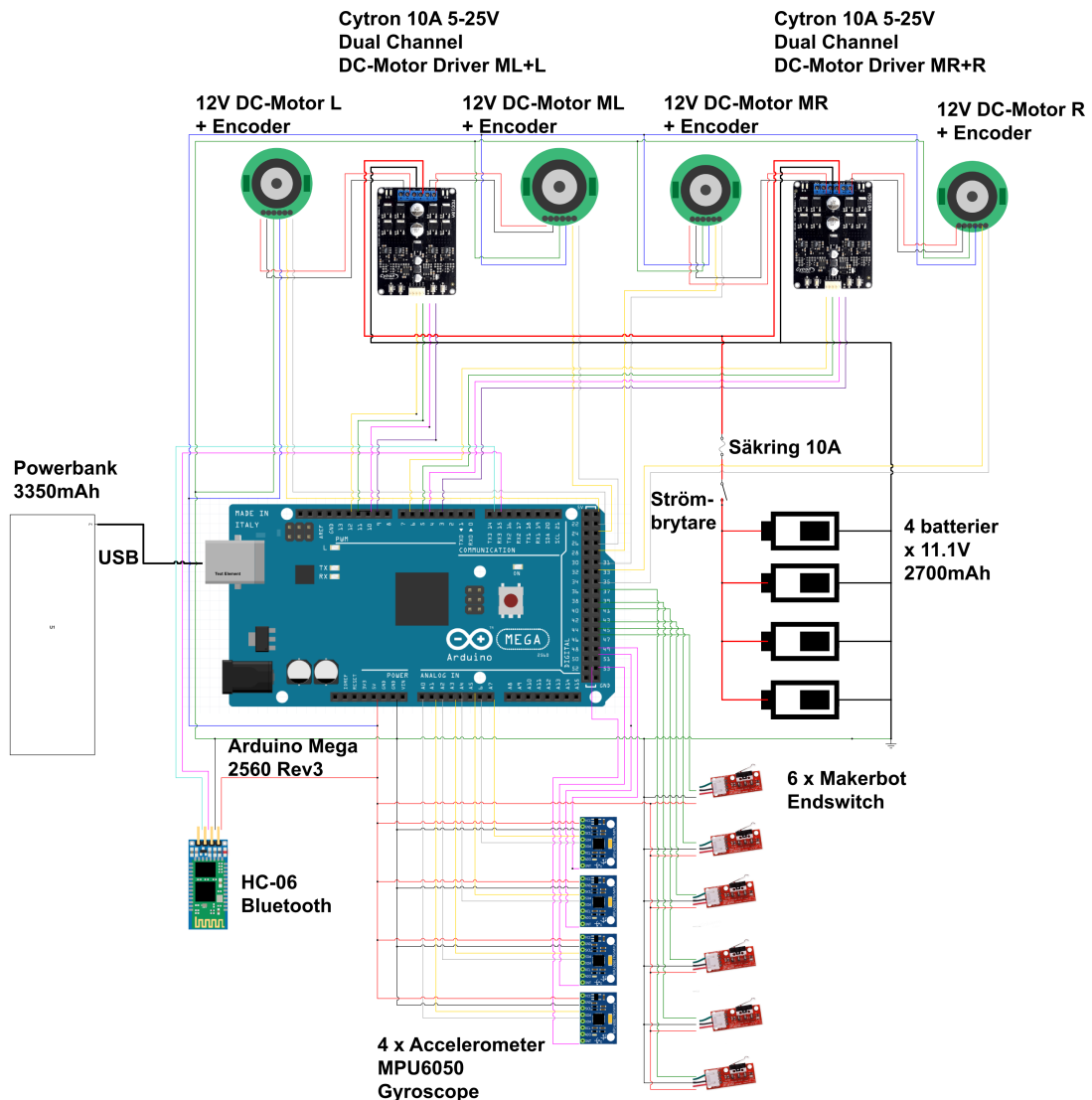
För att veta hur de olika elkomponenterna skulle kopplas designades ett kretsschema. För denna design användes två olika modelleringsverktyg.

Simulinkpaketet Simscape användes för att simulera delar av elsystemet tillsammans med motorerna. Detta för att få en bild av hur systemet skulle fungera och uppföra sig, samt för att ge information såsom batteriernas spänningsfall, strömförbrukning och motorernas varvtal, vid ett konstant givet moment. Detta kretsschema kan ses i Bilaga B.4.

För att rita upp den översiktliga bilden av hur hela det mekatroniska systemet skulle se ut, användes hemsidan CircuitLab. Kopplingsschemat från CircuitLab innehåller komponenterna som finns i Tabell 3 och går att se övergripande i Figur 17.

Tabell 3: Lista över innehållande komponenter för kretsschemat som går att se i Figur 17. För en mer utförlig komponent- samt prislista, se Bilaga B.1.

Typ av komponent	Modellnamn	Antal
Mikrokontroller	Arduino Mega 2560 Rev3	1
Batterier	ZIPPY Compact 2700 mAh	4
Motorer + encoders	DFrobot 131:1	4
Motorstyrkort	Cytron 10 A 5-25 V Dual Channel	2
Gyroskop	MPU6050	4
Kontaktswitchar	Makerbot Endswitch	6
Powerbank	Clas Ohlson 3350 mAh	1
Säkring	Flatstiftsäkring 10 A	1
Strömbrytare	Power Switch	1
Bluetooth-enhet	HC-06	1



Information om kabelfärg:

• 12V DC-Motor + Encoder	• Cytron MR+R	• Cytron ML+L	• Batterier	• Bluetooth	• MPU6050	• Makerbot Endswitch
Motor power +	PWM Motor MR	PWM Motor L	12V	5V	5V	Signal
Motor power -	DIR Motor MR	DIR Motor L	GND	GND	GND	GND
Encoder GND	PWM Motor R	PWM Motor ML		TX	SCL	5V
Encoder V					SDA	
Encoder A_out					INT	
Encoder B_out						

Figur 17: Övergripande bild av kretsschemat för robotens elektriska komponenter, där en lista över alla innehållande komponenter går att se i Tabell 3. I figuren går det att se hur alla komponenter har kopplats samman, samt vilka in- och utportar för mikrokontrollerkortet som har använts.

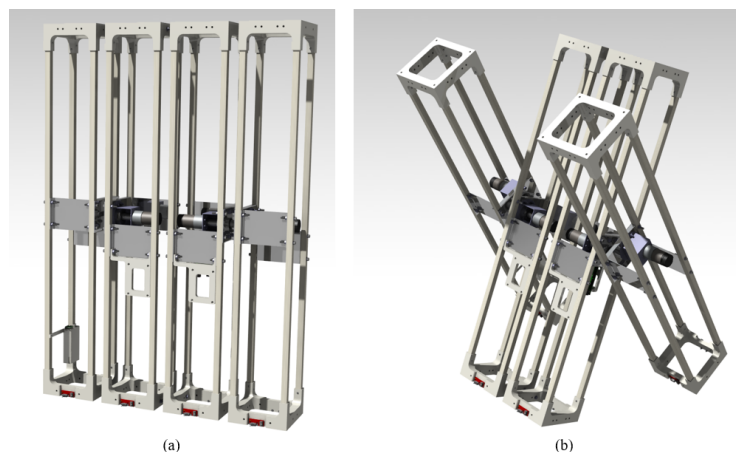
5

KONSTRUKTION

För konstruktionsfasen modellerades komponenterna för roboten i CAD-programmet CATIA V5 för att verifiera att komponenterna passar konstruktionen. Montering av roboten och tillverkning av komponenter gjordes i Chalmers prototypverkstad. Konstruktionen för de kritiska komponenterna samt en hållfasthetsberäkning för vevaxeln beskrivs i detta kapitel.

5.1 Robotens konstruktion

Utifrån de valda komponenterna och kraven från kravspecifikation (Bilaga A.1) modellerades den slutgiltiga konstruktionen i CAD-programmet CATIA V5. Resultatet ses i Figur 18. Konstruktionen består av fyra block. Mittenblocken är sammankopplade med gängstänger och rör sig som en del. De yttre blocken sitter sammankopplade med mittenblocken med en vevaxel som möjliggör att blocken kan lyftas och roteras. Dessutom är hela konstruktionen täckt med en 0,5 mm tjock aluminiumplåt för att efterlikna TARS utseende, notera att Figur 18 inte visar aluminiumplåten.



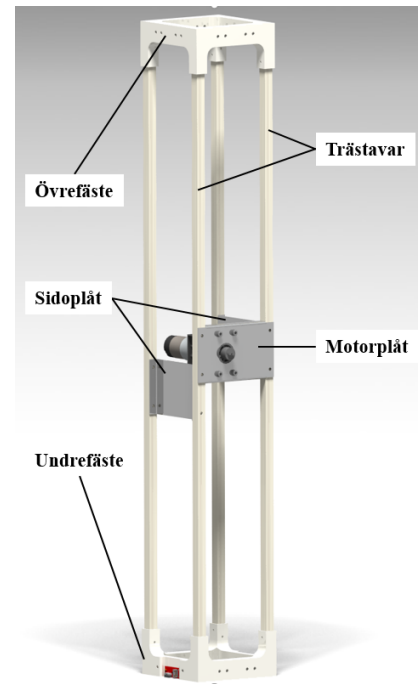
Figur 18: CAD-rendering av hela robotens konstruktion som visar två olika tillstånd. Roboten består av fyra block som kopplas samman med två vevaxlar. (a) visar robotens startposition och (b) visar roboten efter ett steg.

5.2 Konstruktion av blocken

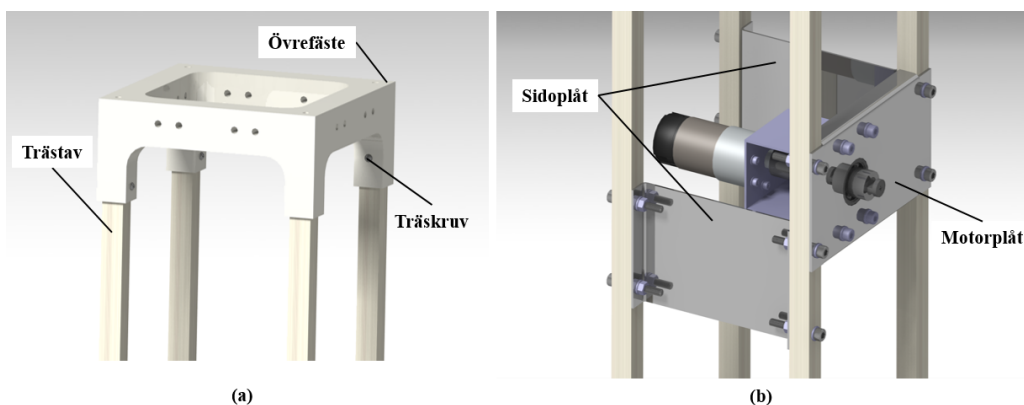
Ramarna till blocken består av björkstavar med ett mått på 1000x15x15 mm. Varje block består av fyra stavar som sitter ihop i botten och toppen med 3D-utskrivna fästena vars basyta är 150x150 mm, se Figur 19. Fästena är utskrivna i polymeren polylaktid.

På mitten av varje ram finns aluminiumplåtar som ger konstruktionen extra stabilitet och styvhet, se Figur 20. En plåt med en tjocklek på 2 mm agerar även som fäste för motorn. Motorplåtens övre och undre kant bockades för att göra plåten rigid. Plåtarna fästes vid stavarna med skruv och mutter medan de 3D-skrivna fästena sitter fast med träskruv (Figur 20).

Denna konstruktion har flera fördelar då björk och fästena har relativt låg densitet, vilket ger en lätt konstruktion [31]. Björk är dessutom billigare än exempelvis stål eller aluminium och är mer miljövänligt [32]. I ramarna finns det också extra utrymme för att montera flera komponenter om det skulle behövas.



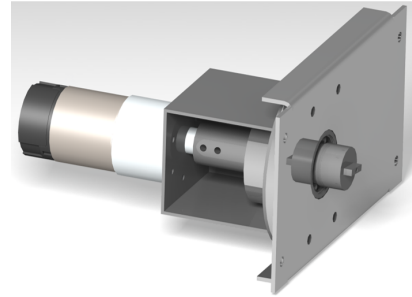
Figur 19: CAD-rendering av ett av de fyra blocken. Blocket innehåller fyra stavar som fästs på det övre och undre fästet. I mitten av blocket finns det aluminiumplåtar.



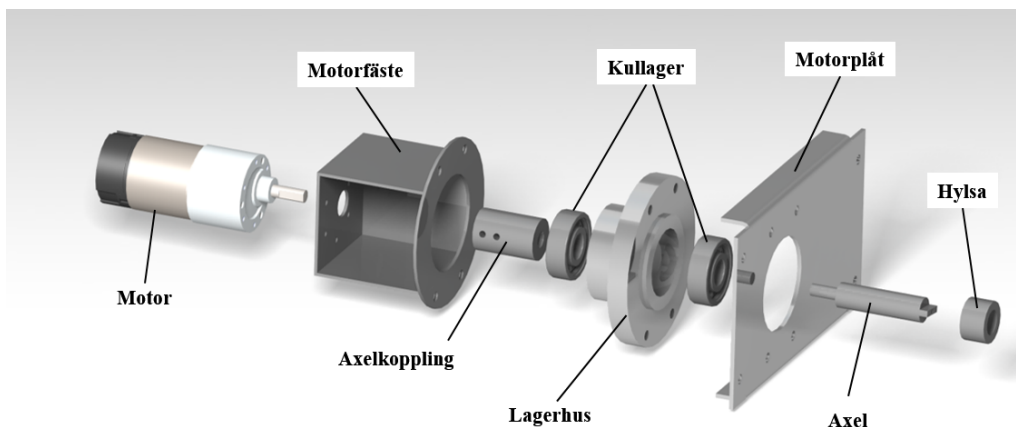
Figur 20: (a) visar en CAD-rendering av det övre fästet med träskruvar. (b) visar en CAD-rendering av sidoplåtarna och motorplåten samt visar skruvförbanden som användes för att fästa plåtarna på trästavarna.

5.3 Konstruktion av motorpaket

Motorpaketets funktion är att agera som fäste för motorn och axeln. Det är väsentligt att motorpaketet tar upp alla krafter som uppstår under robotens gång eftersom blocken endast är sammankopplade med vevaxeln. Dessutom måste konstruktionen endast tillåta axeln att rotera runt motoraxeln för att hålla blocken rigida. Paketet monterades på björkstavarna med hjälp av ett skruvförband (Figur 20). Ett monterat motorpaket kan ses i Figur 21 och alla huvudkomponenter som ingår i motorpaketet kan ses i Figur 22. I detta avsnitt kommer de kritiska komponenternas konstruktion beskrivas.



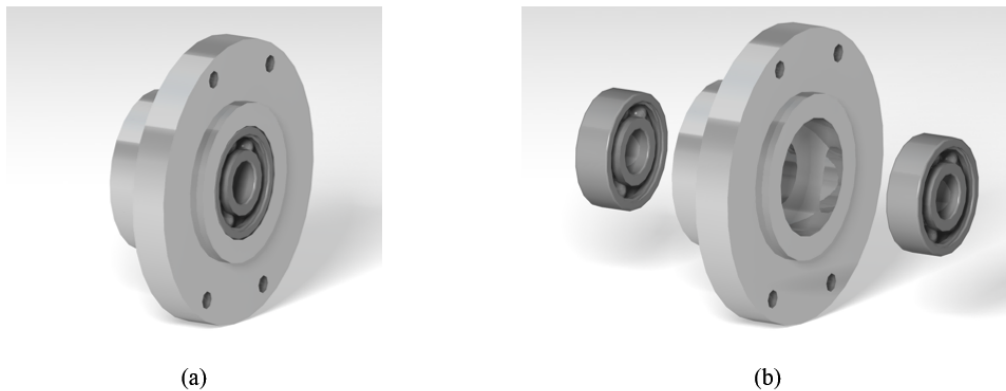
Figur 21: CAD-rendering av ett monterat motorpaket. Motorpaketet agerar som ett fäste för motorn och axeln.



Figur 22: En CAD-rendering som visar en exploderad vy över alla komponenter för motorpaketet.

5.3.1 Konstruktion av lagerhus

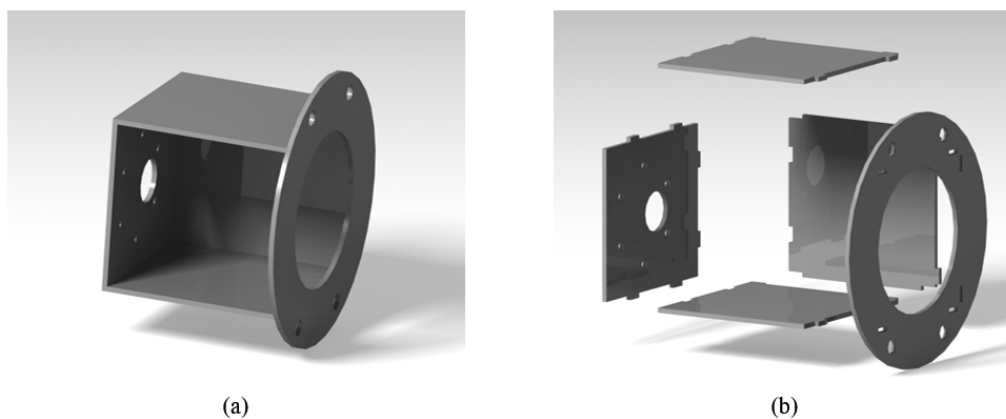
Kullagrena sitter i cylinderformade lagerhus gjorda av aluminium, se Figur 23. Lagerhusen är cylinderformade med en fläns för att de ska kunna fästas med skruvförband till motorplåten. På cylinderns topp och botten finns försänkningar för lagren. Dessa svarvades ut med en diameter på 31,97 mm för att lagrena, med ytterdiameter 32 mm, sedan pressades på plats.



Figur 23: CAD-rendering av motorpakets lagerhus och kullager. (a) visar ett monterat lagerhus med två kullager och (b) visar en exploderad vy.

5.3.2 Konstruktion av motorfäste

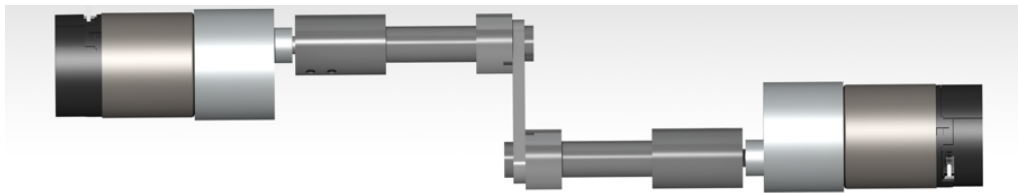
Motorn för vevaxeln monterades på ett fäste som är format som en låda där ena sidan har hål som matchar hålbilden på motorn, se Figur 24. På motstående sida sitter det en rund fläns med hål som möjliggjorde montering på lagerhuset med skruvförband. Fästets funktion är att säkerhetsställa att motoraxeln och vevaxeln är i led. Motorfästena består av 1,5 mm tjock stålplåt som skurits ut med en vattenskärare till flera delar för att sedan svetsas samman (Figur 24). Ståldelarna innehåller jack och utskärningar för att säkerhetsställa att de svetsas rakt. Anledningen till att stål valdes är att det är billigt och lätt att svetsa [33].



Figur 24: CAD-rendering av motorfästet för motorpaketet, (a) visar ett monterat fäste där ståldelarna har svetsas samman. (b) visar de olika ståldelarna som ska svetsas samman. Ståldelarna skars ut i en vattenskärare.

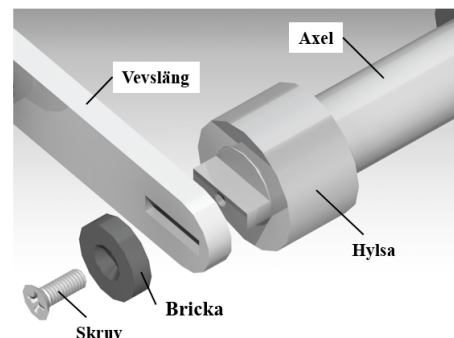
5.3.3 Konstruktion av vevaxel

Vevaxelns funktion är att möjliggöra att blocken kan roteras och lyftas samt att den kopplar samman två block. Vevaxeln består av en vevsläng som kopplar samman de två axlarna, se Figur 25. Vevslängen är en 4 mm tjock stålplåt som skars ut med en vattenskarare. I axeln finns det ett gängat hål som fästes vid vevslängen med en M3-skruv och bricka, se Figur 26. För att säkerhetsställa att vevslängen och axeln roterar tillsammans finns ett spår och en utskärning som låser fast komponenterna till varandra (Figur 26). Spåret på axeln gjordes genom att använda en fräs.

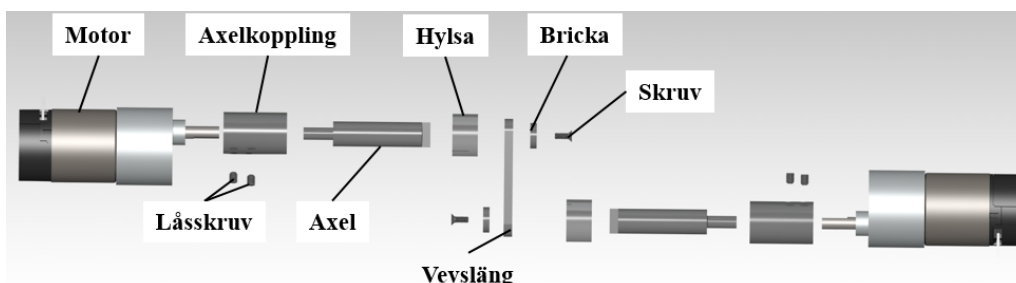


Figur 25: CAD-rendering av en monterad vevaxeln med motorerna. Figuren visar endast vevaxeln och motorerna för att illustrera hur de monteras.

Axeln är gjord av en stålcyllinder med en diameter på 12 mm och en längd på 60 mm. Den ena änden av axeln svarvades ner till 6 mm för att kunna limmas ihop med axelkopplingen, se Figur 27. Axelkopplingens funktion är att koppla ihop motoraxeln med vevaxeln. Kopplingen är gjord av en stålcyllinder med en diameter på 20 mm med ett 6 mm stort hål. Utsidan på axelkoppling finns det två 4 mm gängade hål där låsskruvarna fäster fast motoraxeln. Mellan vevslängen och motorplåten finns det en hylsa. Hylsans funktion är att ta upp radiella krafter och är gjord av 12 mm lång stålcyllinder med en diameter på 20 mm.



Figur 26: CAD-rendering som visar hur vevslängen och axeln kopplas samman.



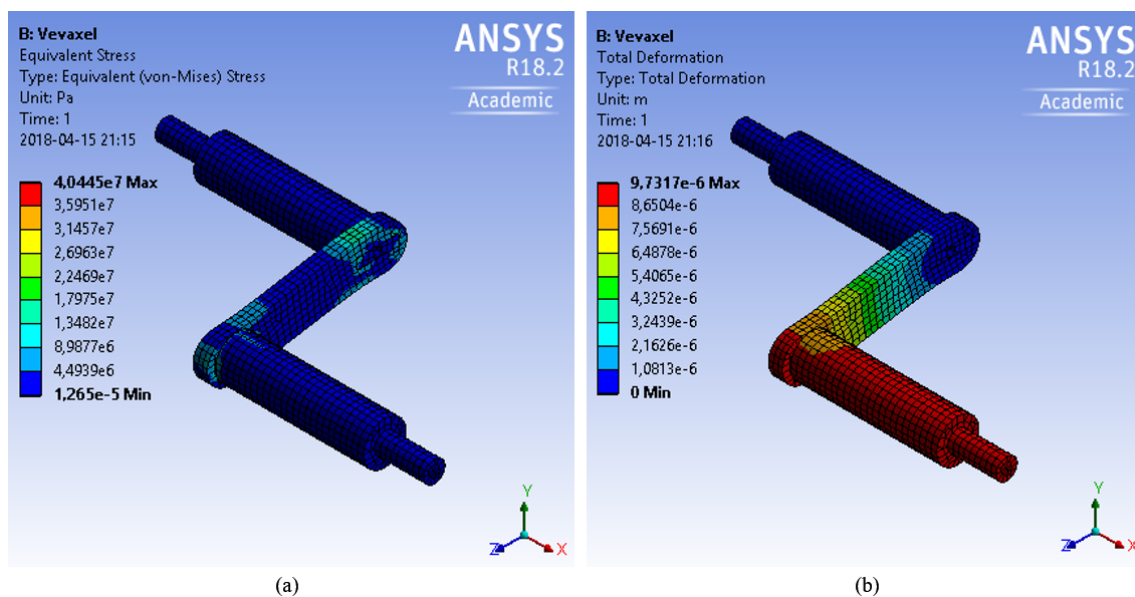
Figur 27: CAD-rendering som visar en exploderad vy över vevaxelns olika komponenter.

5.3.4 Verifiering av vevaxelns hållfasthet

Eftersom vevaxeln är det enda som kopplar samman blocken och utsätts för största delen av krafterna under rörelse behövdes dess hållfasthet verifieras. För att verifiera vevaxelns hållfasthet gjordes en simulering i Ansys Static Structural. Simuleringen beräknar den totala deformation och effektivspänningen som uppstår. Det mest kritiska fallet för vevaxeln är när ett block precis lämnat marken. Kraften som vevaxeln utsätts för då är nedåtriktad och motsvarar tyngden av ett block, se Ekvation (18). Tyngden för blocken fås från kravspecifikationen (Bilaga A.1).

$$F = m_{block} \cdot g = 49,1 \text{ N} \quad (18)$$

Beräkningen använder geometrin från CAD-modellen och materialet för vevaxeln är konstruktionsstålet S235JR. I simuleringen används ett fixt randvillkor för den axeln vars block är på marken. Den andra axeln utsätts för tyngdkraften och har ett randvillkor som endast tillåter att axeln förflyttar sig i y-riktningen (Figur 28). Dessutom använder sig simuleringen av friktionsfria kontaktytor mellan vevslängen och axlarna. Resultatet av simuleringen kan ses i Figur 28.



Figur 28: Resultat av Ansys-simuleringen av vevaxeln, (a) är effektivspänningen och (b) är totala deformationen. Simuleringen använder sig av flera olika randvillkor och belastar ena axeln med en nedåtriktad kraft på 39,7 N.

Den totala deformation är 0,0097 mm vilket kan försummas. Den maximala effektivspänningen blev 40,5 MPa vilket är under sträckgränsen för stålet som är 235 MPa [34]. Vevaxeln har alltså en säkerhetsmarginal på 5,8, se Ekvation (19).

$$\frac{235}{40,5} = 5,8 \quad (19)$$

6

REGLERSYSTEM

För att få roboten att gå på ett bestämt och stabilt sätt togs ett reglersystem fram. Detta kapitel behandlar ett reglersystem med öppen styrning och ett med ett återkopplat system. Kapitlet innehåller också framtagningen av robotens matematiska modell.

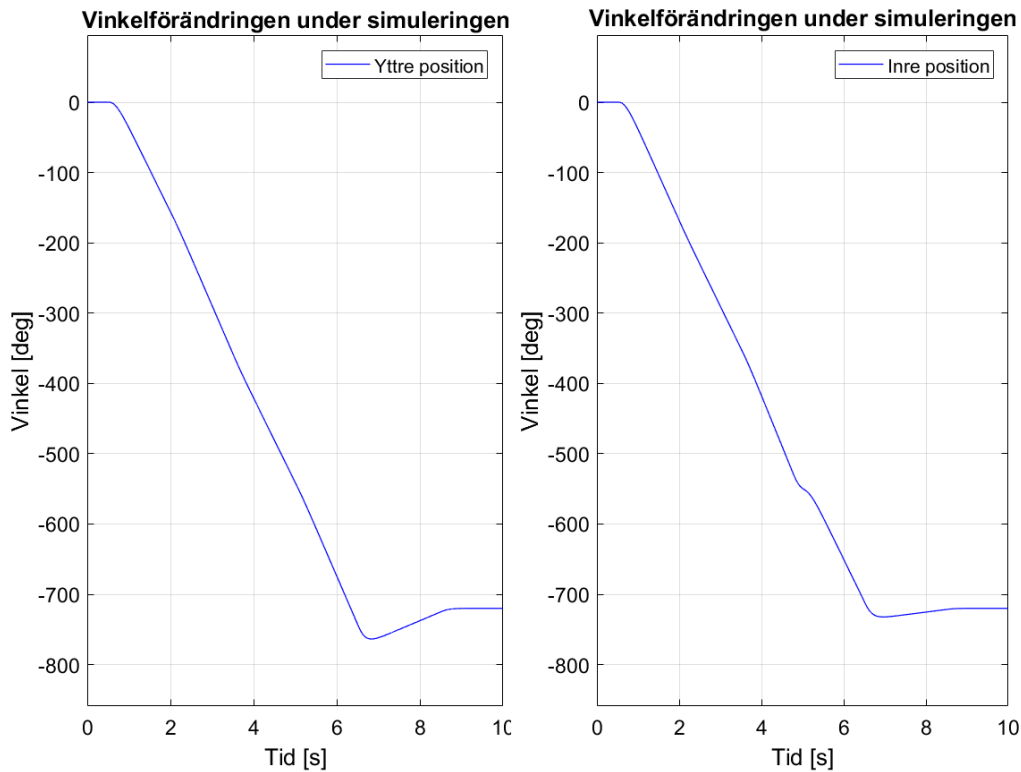
6.1 Öppen styrning

För att veta hur roboten uppför sig i öppen styrning utfördes en simulering i SimMechanics. I Avsnitt 3.3 beskrivs hur modellen, golv och kontaktytor för den mekaniska simuleringen skapades. Detta stycke kommer istället beskriva hur gångsätt 1 modellerades i SimMechanics, som lade grunden för den öppna styrningen som implementerades hos roboten. Detta skedde med hjälp av att implementera en sekvens av vinklar vid specifika tidpunkter för att rotera aktuatorerna, se Figur 29. En sekvens skapades för de yttre respektive inre aktuatorerna. För att simulera gången behöver aktuatorerna för blocken som är på marken roteras 180° . Samtidigt ska det upplyfta paret av aktuatorer vinkla sig 15° relativt marken för att få en lämplig infallsvinkel när blocken slår i marken.

För rörelsen avlästes stora accelerationer och krafter från aktuatorerna. För att minska de höga pikarna lades ett filter på signalen. Detta konstruerades som en överföringsfunktion och såg ut enligt Ekvation (20).

$$G(s) = \frac{100}{s^2 + 20s + 100} \quad (20)$$

Efter filtrering såg signalen ut enligt Figur 29. Med denna insignal kunde den modellerade roboten i Simulink ta tre steg med den öppna styrningen utan att ramla. Simuleringen tar däremot inte hänsyn till störningar. Problemet med den öppna styrningen är att den inte kan hantera störningar som inträffar på roboten när den går. För att hantera störningar måste roboten ha ett reglersystem med återkoppling.



Figur 29: Aktuatorernas position i grader under simuleringens förlopp, efter att signalerna har filterats.

6.2 Matematisk Modell

En matematisk modell krävs för att konstruera ett reglersystem. Till den matematiska modellen konstruerades en elektrisk och mekanisk modell för roboten. För beräkningar som har gjorts i detta avsnitt är värden tagna från Bilaga C.2.

6.2.1 Elektrisk modell

Den elektriska modellen beskriver förhållandet mellan insignalen, en varierande spänning, u , och utsignalen, ett drivande moment från DC-motorn, M . Spänningen ger upphov till en ström genom motorn, i , som påverkas av motorns resistans, R , induktans, L , och av motorns mot-EMK, k_u , se Ekvation (21). Strömmen i motorn ger sedan upphov till ett moment, M , som roterar vevaxeln, se Ekvation (22). När axeln börjar rotera inträffar ett spänningsfall, u_m . Spänningsfallet är proportionellt mot rotationshastigheten, ω_0 se Ekvation (23). Ekvation (21) beskrivs utifrån Kirchhoffs lagar. Då ytter- och innerblockens aktuatorer inte arbetar samtidigt så kommer det ge upphov till att spänningen och strömmen är olika för de olika motorerna. För ytterblocken kommer spänningen och strömmen att kallas för u_1 och i_1 medan de för de inre blocken kommer kallas för u_2 och i_2 .

$$-u(t) + R i(t) + L \frac{d}{dt} i(t) + u_m = 0 \quad (21)$$

$$M(t) = k_m i(t) \quad (22)$$

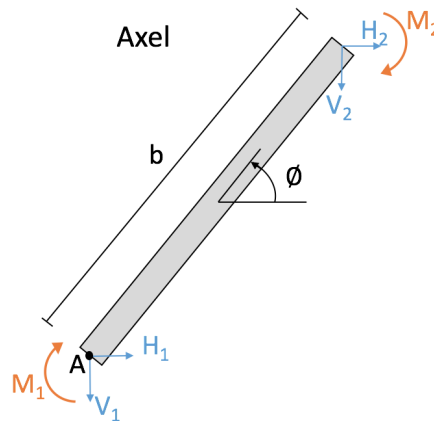
$$u_m = k_u \omega_0 \quad (23)$$

6.2.2 Mekanisk modell

Reglersystemet behöver en matematisk modell som beskriver rörelsen för roboten då den går framåt, vilket den mekaniska modellen beskriver. Den mekaniska modellen fås genom att frilägga robotens mekaniska system.

Vid friläggningen antas roboten endast ha två block, då blockparen är symmetriska och modellen betraktas från ett tvådimensionellt perspektiv, eftersom roboten enbart ska kunna förflytta sig i x- och y-led. Friläggningen består då av tre delar där en del representerar axelns vevlängd medan de andra två utgörs av det yttre samt det inre blocket. Vevaxelns massa försummas då den är liten i förhållande till resterande robot.

Friläggningen av vevaxeln kan ses i Figur 30 och parametrarna för friläggning kan ses i Bilaga C.2. För vevlängden finns det ett drivande moment i vardera ände, M_1 och M_2 , som kommer från motorerna. Momenten gör att axeln roterar vilket ger upphov till att vinkeln, ϕ , kommer att variera under rörelsen. Dessutom finns det kontaktkrafter mellan blocken och axeln vilket ger upphov till krafterna V_1 , H_1 , V_2 och H_2 .



Figur 30: Friläggning av axeln med längden b . I figuren ses momenten, M_1 och M_2 , kontaktkrafterna, V_1 , H_1 , V_2 och H_2 , samt vinkeln ϕ , som kommer variera under rotationen.

För axelns vevlängd ställdes kraft- och momentekvationer vid punkten A upp enligt Newtons andra lag, se Ekvation (24)-(26). Vinkeln ϕ i Ekvation (27) antas öka linjärt med tiden vilket kan ses i Figur 29 från Avsnitt 6.1.

$$\hat{A} : \sum M - M_1 - M_2 - V_2 b \cos(\phi) - H_2 b \sin(\phi) = 0 \quad (24)$$

$$\rightarrow: H_1 + H_2 = 0 \quad (25)$$

$$\uparrow: -V_1 - V_2 = 0 \quad (26)$$

$$\phi = \omega_0 \cdot t \quad (27)$$

Under rörelsen förekommer det tre olika fall för den mekaniska modellen. Ett fall är när båda blocken är i marken medan de andra fallen är när ett av blocken har lyfts från marken. Då roboten kan antas vara stabil när båda blocken är i marken, betraktas endast de fall då ett av blocken är lyft från marken. Ekvationerna nedan beskriver det fall då de yttre blocken vidrör marken. För att se hur ekvationerna ser ut när de inre blocken vidrör marken se Bilaga C.4.

För det yttre och inre blocket ser friläggningen ut enligt Figur 31. Från axeln kommer momentet, M_1 och kontaktkrafterna, V_1 och H_1 , in och blockets tyngd ger upphov till en gravitationskraft, mg . Dessutom finns det en friktions- och normalkraft, F_1 och N_1 , som uppstår vid kontakt med marken. Under rörelsen kommer vinkeln, θ_1 , att variera. Det inre blocket har en liknande friläggning som det yttre blocket. Skillnaden ligger i storleken på moment och krafter samt med annan vinkel, θ_2 .

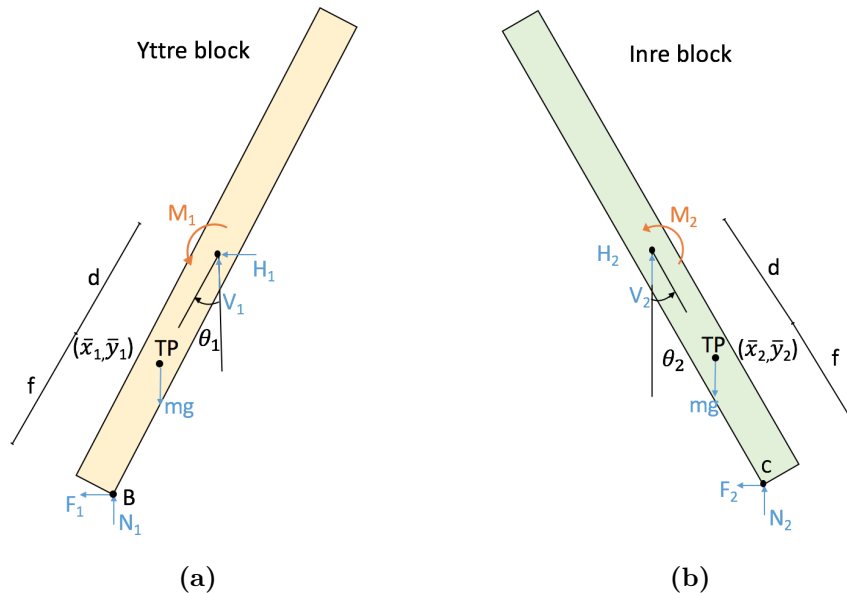


Figure 31: Friläggning av det yttre och inre blocket med kontaktkrafter mellan axel och block samt mellan mark och block. Ett moment från motorn får blocket att rotera med θ_1 eller θ_2 grader medan tyngdkraften inverkar. Om blocket är lyft från marken kommer kontaktkraften, i detta fall, F_2 och N_2 , vara noll. (a) Visar friläggningen av det yttre blocket medan (b) visar friläggning av det inre blocket.

För det fall då det yttre blocket är i kontakt med marken och det inre blocket är lyft från marken beräknas momentet från punkt B för det yttre blocket med ekvation (28). Punkten B kan ses i Figur 31. Blockets tröghetsmoment, I_z , beräknades i Bilaga C.3.

$$\begin{aligned} \hat{B}: \quad I_z \ddot{\theta}_1 = & -M_1 - V_1 (f + d) \sin(\theta_1) - \\ & H_1 (f + d) \cos(\theta_1) + mg f \sin(\theta_1) \end{aligned} \quad (28)$$

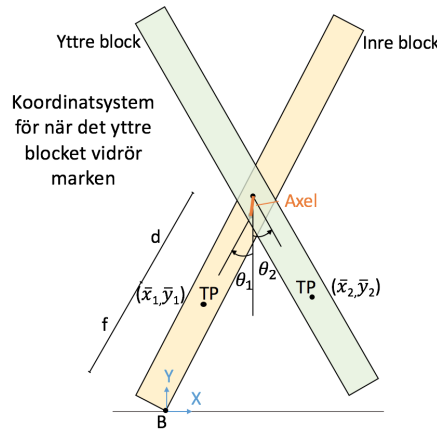
För det inre blocket beräknades momentet i tyngdpunkten, TP, se Ekvation (29). Ekvationer i x- och y-led ställdes upp enligt Ekvation (30) och (31).

$$\hat{TP}: I_z \ddot{\theta}_2 = M_2 - V_2 d \sin(\theta_2) + H_2 d \cos(\theta_2) \quad (29)$$

$$\rightarrow: -H_2 = m \ddot{x}_2 \quad (30)$$

$$\uparrow: V_2 - mg = m \ddot{y}_2 \quad (31)$$

För moment- och kraftekvationerna behövdes accelerationen i punkten $(\bar{x}_2, \bar{y}_2)$ tas fram utgående från ett koordinatsystem i den punkt som är fixerad under hela rörelsen, då det yttre blocket är i kontakt med marken, se Figur 32. Ekvationerna för positionen blev då enligt (32) och (33).



Figur 32: Positionen $(\bar{x}_2, \bar{y}_2)$. Koordinatsystemets placering är när det yttre blocket är i kontakt med marken. För att se koordinater för axel se Figur 30.

$$\bar{x}_2 = (f + d) \sin(\theta_1) + b \cos(\phi) + d \sin(\theta_2) \quad (32)$$

$$\bar{y}_2 = (f + d) \cos(\theta_1) + b \sin(\phi) - d \cos(\theta_2) \quad (33)$$

Därefter deriverades positionen med avseende på tiden två gånger för att få ut accelerationen. Ekvation (27) för ϕ substitueras in i ekvation (32) och (33). Detta resulterade i ekvationerna (34) och (35).

$$\ddot{x}_2 = (f + d) \ddot{\theta}_1 \cos(\theta_1) - (f + d) \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_1) - b \omega_0^2 \cos(\omega_0 t) + d \ddot{\theta}_2 \cos(\theta_2) - d \dot{\theta}_2^2 \sin(\theta_2) \quad (34)$$

$$\ddot{y}_2 = -(f + d) \ddot{\theta}_1 \sin(\theta_1) - (f + d) \dot{\theta}_1^2 \cos(\theta_1) - b \omega_0^2 \sin(\omega_0 t) + d \ddot{\theta}_2 \sin(\theta_2) + d \dot{\theta}_2^2 \cos(\theta_2) \quad (35)$$

Genom insättning av Ekvation (30) i (25) och (31) i (26) kunde kontaktkrafterna lösas ut från ekvationssystemet, vilket kan ses i Ekvation (36) och (37).

$$H_1 = -H_2 = m\ddot{x}_2 \quad (36)$$

$$V_1 = -V_2 = -m(g + \ddot{y}_2) \quad (37)$$

I ekvationssystemet återstår nu tre ekvationer, Ekvation (24), (28) och (29). För dessa sattes kontaktkrafterna in. De återstående ekvationerna blev då enligt Ekvationerna (38)-(40).

$$-M_1 - M_2 - m(g + \ddot{y}_2) b \cos(\phi) - m\ddot{x}_2 b \sin(\phi) = 0 \quad (38)$$

$$I_z \ddot{\theta}_1 = -M_1 + m(g + \ddot{y}_2)(f + d) \sin(\theta_1) - m\ddot{x}_2(f + d) \cos(\theta_1) + mg f \sin(\theta_1) \quad (39)$$

$$I_z \ddot{\theta}_2 = M_2 - m(g + \ddot{y}_2)d \sin(\theta_2) - m\ddot{x}_2 d \cos(\theta_2) \quad (40)$$

För systemet utvecklades ekvationerna (39) och (40) där accelerationen i x- och y-led, Ekvation (34) och (35), substituerades in. Resultatet blev Ekvation (41) och (42). Dessa ekvationer kan sedan användas för att dimensionera reglersystemet.

$$\begin{aligned} & \underbrace{\left(I_z + m(f + d)^2 (\sin^2(\theta_1) + \cos^2(\theta_1)) \right)}_{a_{22}} \ddot{\theta}_1 + \\ & \underbrace{\left(m d (f + d) (-\sin(\theta_1) \sin(\theta_2) + \cos(\theta_1) \cos(\theta_2)) \right)}_{a_{24}} \ddot{\theta}_2 = \\ & \underbrace{-M_1 + mg f \sin \theta_1 + m(f + d) \sin(\theta_1) \left(g - (f + d) \dot{\theta}_1^2 \cos(\theta_1) - \right.}_{b_2} \\ & \left. b \omega_0^2 \sin(\omega_0 t) + d \dot{\theta}_2^2 \cos \theta_2 \right) + m(f + d) \cos(\theta_1) \left((f + d) \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_1 + \right. \\ & \left. b \omega_0^2 \cos(\omega_0 t) - d \dot{\theta}_2^2 \sin(\theta_2) \right) \end{aligned} \quad (41)$$

$$\begin{aligned}
& \underbrace{\left(m d (f + d) \left(\sin(\theta_1) \sin(\theta_2) + \cos(\theta_1) \cos(\theta_2) \right) \right)}_{a_{42}} \ddot{\theta}_1 + \\
& \underbrace{\left(I_z + m d^2 \left(\sin^2(\theta_2) + \cos^2(\theta_2) \right) \right)}_{a_{44}} \ddot{\theta}_2 = \\
& \underbrace{M_2 + m d \sin(\theta_2) \left(g - (f + d) \dot{\theta}_1^2 \cos(\theta_1) - b \omega_0^2 \sin(\omega_0 t) + \right.}_{b_4} \\
& \left. d \dot{\theta}_2^2 \cos \theta_2 \right) + m d \cos(\theta_2) \left((f + d) \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_1 + \right. \\
& \left. b \omega_0^2 \cos(\omega_0 t) - d \dot{\theta}_2^2 \sin(\theta_2) \right)
\end{aligned} \tag{42}$$

6.3 Reglersystem på linjär tillståndsform

Utifrån den elektriska och mekaniska modellen skapades ett reglersystem på linjär tillståndsform. Systemet skrivs på detta sätt för att det ska gå att återkoppla det. Från de elektriska och mekaniska ekvationerna utfördes ett variabelbyte för att skriva om ekvationerna till ett första ordningens system. Variabelbytet gjordes enligt nedan.

$$\begin{aligned}
x_1 &= \theta_1 & x_2 &= \dot{\theta}_1 & x_3 &= \theta_2 & x_4 &= \dot{\theta}_2 & x_5 &= i_1 & x_6 &= i_2 \\
\dot{x}_1 &= x_2 & \dot{x}_2 &= \ddot{\theta}_1 & x_3 &= x_4 & \dot{x}_4 &= \ddot{\theta}_2 & \dot{x}_5 &= \dot{i}_1 & \dot{x}_6 &= \dot{i}_2
\end{aligned}$$

Från den mekaniska modellen utfördes en variabelsubstitution och momentekvation (22) sattes in i ekvationerna (41) och (42). För den elektriska modellen, Ekvation (21), skedde också en variabelsubstitution enligt Ekvation (43) och (44).

$$\dot{x}_5 = \underbrace{\frac{u_1 - R x_5 - k_u \omega_0}{L}}_{b_5} \tag{43}$$

$$\dot{x}_6 = \underbrace{\frac{u_2 - R x_6 - k_u \omega_0}{L}}_{b_6} \tag{44}$$

Efter variabelsubstitutionen sattes dessa ekvationer in i ett matrissystem, Ekvation (45), så $\dot{\mathbf{x}}$ fås och blir enligt Ekvation (46).

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 & a_{24} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{42} & 0 & a_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}_1} \underbrace{\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{bmatrix}}_{\dot{\mathbf{x}}} = \underbrace{\begin{bmatrix} x_2 \\ b_2 \\ x_4 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \end{bmatrix}}_{\mathbf{b}} \quad (45)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{b} = \mathbf{E} \quad (46)$$

För att få systemet till linjär tillståndsform beräknades Jacobianen enligt Ekvation (49) och (50). Arbetspunkten sattes vid $x_{1,0} = x_{2,0} = x_{3,0} = x_{4,0} \approx 0$, eftersom vinklarna θ_1 och θ_2 kommer pendla kring 0 grader och vinkelhastigheten antas vara låg. Arbetspunkterna för $x_{5,0}$ och $x_{6,0}$ är enligt Ekvation (47) och (48), då derivatan av strömmen vid denna punkt är lika med noll. För $\mathbf{C}$ -matrisen, Ekvation (51), bestämdes vilka utsignaler som systemet ska ha. Den linjära tillståndsmodellen kunde sedan skrivas som Ekvation (52) och (53) där insignalen kommer vara spänningen hos motorerna medan utsignalen är vinklarna, θ_1 och θ_2 .

$$x_{5,0} = \frac{u_1 - k_u \omega_0}{R} \quad (47)$$

$$x_{6,0} = \frac{u_2 - k_u \omega_0}{R} \quad (48)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial E_1}{\partial x_1} \right|_{x_{1,0}, x_{2,0}, x_{3,0}, x_{4,0}, x_{5,0}, x_{6,0}} & \cdots & \left. \frac{\partial E_1}{\partial x_6} \right|_{x_{1,0}, x_{2,0}, x_{3,0}, x_{4,0}, x_{5,0}, x_{6,0}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left. \frac{\partial E_6}{\partial x_1} \right|_{x_{1,0}, x_{2,0}, x_{3,0}, x_{4,0}, x_{5,0}, x_{6,0}} & & \left. \frac{\partial E_6}{\partial x_6} \right|_{x_{1,0}, x_{2,0}, x_{3,0}, x_{4,0}, x_{5,0}, x_{6,0}} \end{bmatrix} \quad (49)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial E_1}{\partial u_1} \right|_{x_{1,0}, x_{2,0}, x_{3,0}, x_{4,0}, x_{5,0}, x_{6,0}} & \left. \frac{\partial E_1}{\partial u_2} \right|_{x_{1,0}, x_{2,0}, x_{3,0}, x_{4,0}, x_{5,0}, x_{6,0}} \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \quad (50)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (51)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(t)\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (52)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \quad (53)$$

6.4 Design av styrsignal till reglersystem

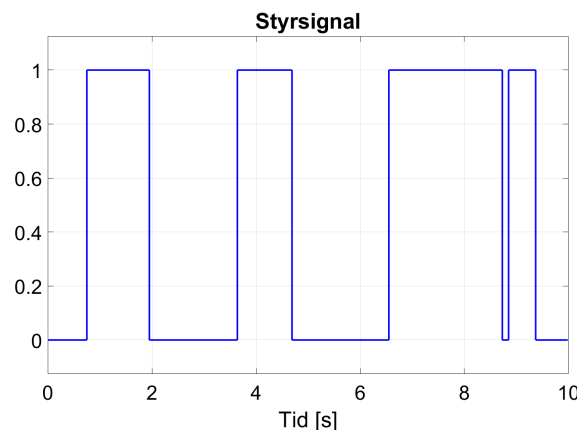
En styrsignal för reglersystemet designades för den simulerade mekaniska modellen i SimMechanics från Avsnitt 6.1. Detta gjordes för att reglersystemet kräver ett övre styrsystem som kan veta vilka block som är i marken och vilket steg den ska ta härnäst. Med hjälp av detta styrsystem kan det återkopplade reglersystemet styra roboten.

SimMechanics beräknar styrsignalerna för roboten genom att skicka in insignaler. Arbetsgången för att få fram styrsignalen delades in i två delar. Hela den mekaniska modellen med algoritmen för styrsignalen kan ses i Bilaga C.1

I det första steget behövdes insignalen som innehåller information om när de olika blockens fram- respektive bakkant är i kontakt med marken. Denna information kunde hämtas från blockens kontakt med marken som hade modellerats, se Avsnitt 3.3. Roboten är symmetrisk, vilket innebär att de två inre blocken respektive de två yttre blocken har samma insignal. Totalt blir det fyra insignaler, två insignaler för de inre blockens fram- och baksida och två insignaler för de yttre blockens fram- och baksida. Dessa signaler gjordes om till digitala signaler som antog värdet 1 vid kontakt och 0 vid ingen kontakt.

I det andra steget användes de digitala värdena från det första steget som indata till en Matlabfunktion, se Bilaga C.5, som beräknade vilket steg roboten var på beroende på vilka punkter som hade kontakt med marken. Den färdiga algoritmen för styrsignalen återkopplades här inte för att styra den mekaniska modellen, utan den styrdes med öppen styrning. Algoritmen för styrsignalen modellerades endast med hjälp av den mekaniska modellen för att senare kunna användas ihop med det återkopplade reglersystemet, där styrsignalen ska styra vilka motorer som regleras av reglersystemet.

För rörelsen från den mekaniska simuleringen ser styrsignalen ut enligt Figur 33. När styrsignalen är noll ska reglersystemet få de inre blockparet röra sig medan ett värde på ett ska reglersystemet få de yttre blockparet att röra sig.



Figur 33: Styrsignalen för rörelsen från den mekaniska simuleringen.

6.5 Återkoppling

Ett återkopplat system hämtar information från utsignalen för att styra systemet på ett önskvärt sätt. Där behövs en regulator som kan beräkna signaler till roboten utifrån skillnaden mellan de faktiska vinklarna $\mathbf{y}$ och referensvinklarna $\mathbf{w}$ och på så sätt minimera felet utifrån de störningar som uppstår, se Ekvation (54). Regulatorn har till uppgift att minimera skillnaden mellan dessa, se Ekvation (55). Den regulator som implementerades är en PI-regulator. En PI-regulator har en proportionell förstärkning och en integrerande del. Denna regulator typ har till uppgift att höja förstärkningen för låga frekvenser vilket ger lägre kvarstående fel. Däremot fås försämrade stabilitetsmarginaler som en deriverande del kan förbättra. Anledningen varför PID-regulator inte valdes var för att minska komplexiteten hos regulatorn. När en regulator implementeras är insignalen felet, $\mathbf{e}$, för att få ut spänningen, $\mathbf{u}$. För detta system kommer en linjär kvadratisk regulator användas eftersom systemet beskrivs av linjära tidsvarianta differentialekvationer [35].

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} \theta_{1,ref} \\ \theta_{2,ref} \end{bmatrix} \quad (54)$$

$$\mathbf{e} = \mathbf{y} - \mathbf{w} \quad (55)$$

Spänningen, $\mathbf{u}$, fås med hjälp av regulatorverkan, $\mathbf{K}$, som multipliceras med en utökad $\mathbf{x}_{aug}$ -vektor som beror av $\mathbf{x}$ och felet, $\mathbf{e}$, se Ekvation (56), och Ekvationerna (58)-(59) för det utökade systemet.

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K} \mathbf{x}_{aug} \quad (56)$$

$$\mathbf{z} = \int \mathbf{e} dt \quad (57)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\mathbf{z}} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{A}_{6 \times 6} & \mathbf{0}_{6 \times 2} \\ \mathbf{C}_{2 \times 6} & \mathbf{0}_{2 \times 2} \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}_{aug}} \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{z} \end{bmatrix}}_{\mathbf{x}_{aug}} + \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{B}_{6 \times 2} \\ \mathbf{0}_{2 \times 2} \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}_{aug}} \mathbf{u} \quad (58)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{y} \\ \mathbf{z} \end{bmatrix}}_{\mathbf{y}_{aug}} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{C}_{2 \times 6} & \mathbf{0}_{2 \times 2} \\ \mathbf{0}_{2 \times 6} & \mathbf{I}_{2 \times 2} \end{bmatrix}}_{\mathbf{C}_{aug}} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{z} \end{bmatrix} \quad (59)$$

$\mathbf{K}$ -matrisen är given som Ekvation (60) [35]. $\mathbf{K}$ beräknas på detta sätt eftersom $\mathbf{A}$ -matrisen varierar med tiden och $\mathbf{K}$ -matrisen måste då ständigt uppdateras. $\mathbf{K}$ -matrisens värden ändras genom att $\mathbf{P}(t)$ beräknas med hjälp av den differentials Riccati-Ekvationen (61). I den differentials Riccati-Ekvationen finns matriserna $\mathbf{Q}$ och $\mathbf{R}$ vars värden bestäms ifrån en kvadratisk kostfunktion, J , Ekvation (62). J ska minimeras för att optimera systemet. $\mathbf{Q}$ och $\mathbf{R}$ är symmetriska positivt definita

diagonalmatriser, för att J inte ska få ett negativt värde, se Ekvation (63) och (64). Deras värden i matrisen kan förändras för att påverka signalerna i $\mathbf{x}$ och $\mathbf{u}$. q_1 påverkar till exempel x_1 , vinkeln θ_1 . q_1 kan då sättas till att bli ett högre värde för att förhindra att θ_1 ändrar värden för snabbt. På samma sätt kan värdena minskas i fall detta beteende är önskvärt.

$$\mathbf{K}(t) = -\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}_{aug}^T\mathbf{P}(t) \quad (60)$$

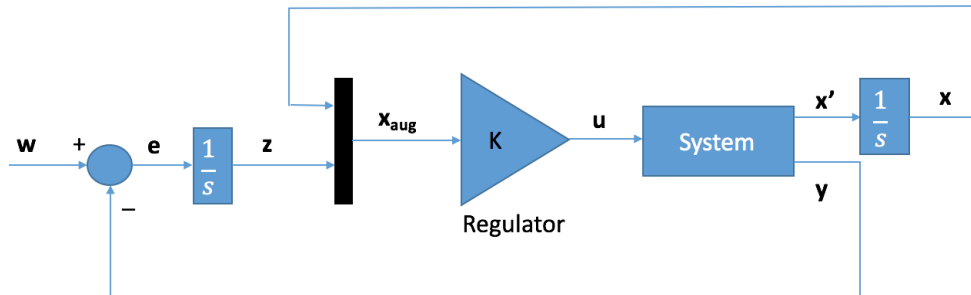
$$-\dot{\mathbf{P}}(t) = \mathbf{A}_{aug}^T(t)\mathbf{P}(t) + \mathbf{P}(t)\mathbf{A}_{aug}(t) + \mathbf{Q} - \mathbf{P}(t)\mathbf{B}_{aug}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}_{aug}^T\mathbf{P}(t) \quad (61)$$

$$J = \int_0^\infty \mathbf{x}^T\mathbf{Q}\mathbf{x} + \mathbf{u}^T\mathbf{R}\mathbf{u}dt, \quad (62)$$

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} q_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \\ 0 & & q_8 \end{bmatrix} \quad (63)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_1 & 0 \\ 0 & r_2 \end{bmatrix} \quad (64)$$

Det återkopplade systemet implementerades i Simulink där blockschemat ser ut på ett liknande sätt som i Figur 34. $\mathbf{Q}$ - och $\mathbf{R}$ -värdena kunde då itereras fram genom att titta på graferna för simuleringarna. Eftersom det finns två olika reglersystem, beroende på om det är de inre eller yttre blocken som vidrör marken, finns det en switch som bryter $\mathbf{A}$ -matrisen efter en period. Perioden 3 s lång, vilket är tiden för två steg som har fått från kravspecifikationen (Bilaga A.1). Denna switch fungerar likt den kontrollsignal som designades i Avsnitt 6.4.



Figur 34: Blockschemat över det återkopplade systemet. w är referensvinklar. u är spänningen. y är utsignal och x innehåller information om vinklar, vinkelhastighet och ström.

Referenssignalerna, $\theta_{1,ref}$ och $\theta_{2,ref}$, som skickas in till systemet varierar periodiskt mellan -15° till 15° . För att se hur Simulinkmodellen ser ut se Bilaga C.6.

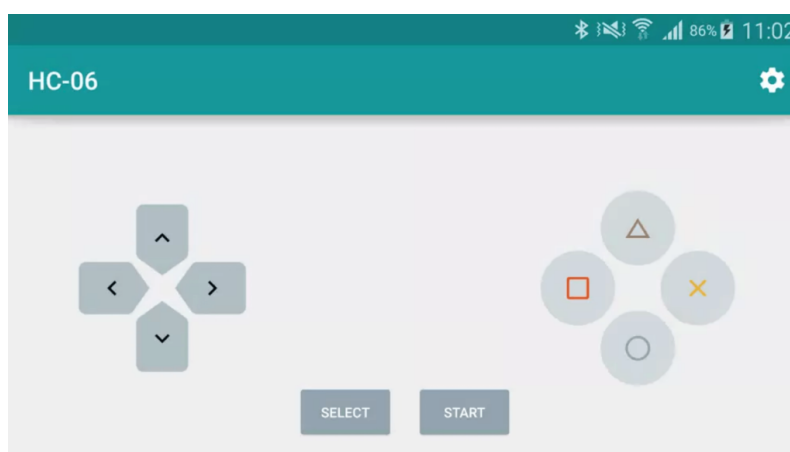
7

PROGRAMMERING OCH MJUKVARA

För att få roboten att utföra sina rörelser behövde den programmeras. I följande kapitel beskrivs hur den trådlösa kontrollen implementerades, beskrivning av knapparnas funktioner och hur den slutgiltiga koden är uppbyggd.

7.1 Implementering av trådlös fjärrkontroll

Bluetooth-enheten HC06 installerades och konfigurerades med hjälp av en guide på YouTube från användaren Tinkernut Labs [36]. För kontrollering av Bluetoothsignalerna används en Android-applikation till telefonen, Arduino Bluetooth Controller av Giumig Apps, se Figur 35. Applikationen konverterar varje knapp till signaler, som sedan skickas vidare till Arduino Mega-kortet. Kortet omvandlar i sin tur signaler till rörelser som ta ett steg framåt, ta ett steg bakåt, stanna och rotera se Figur 35.



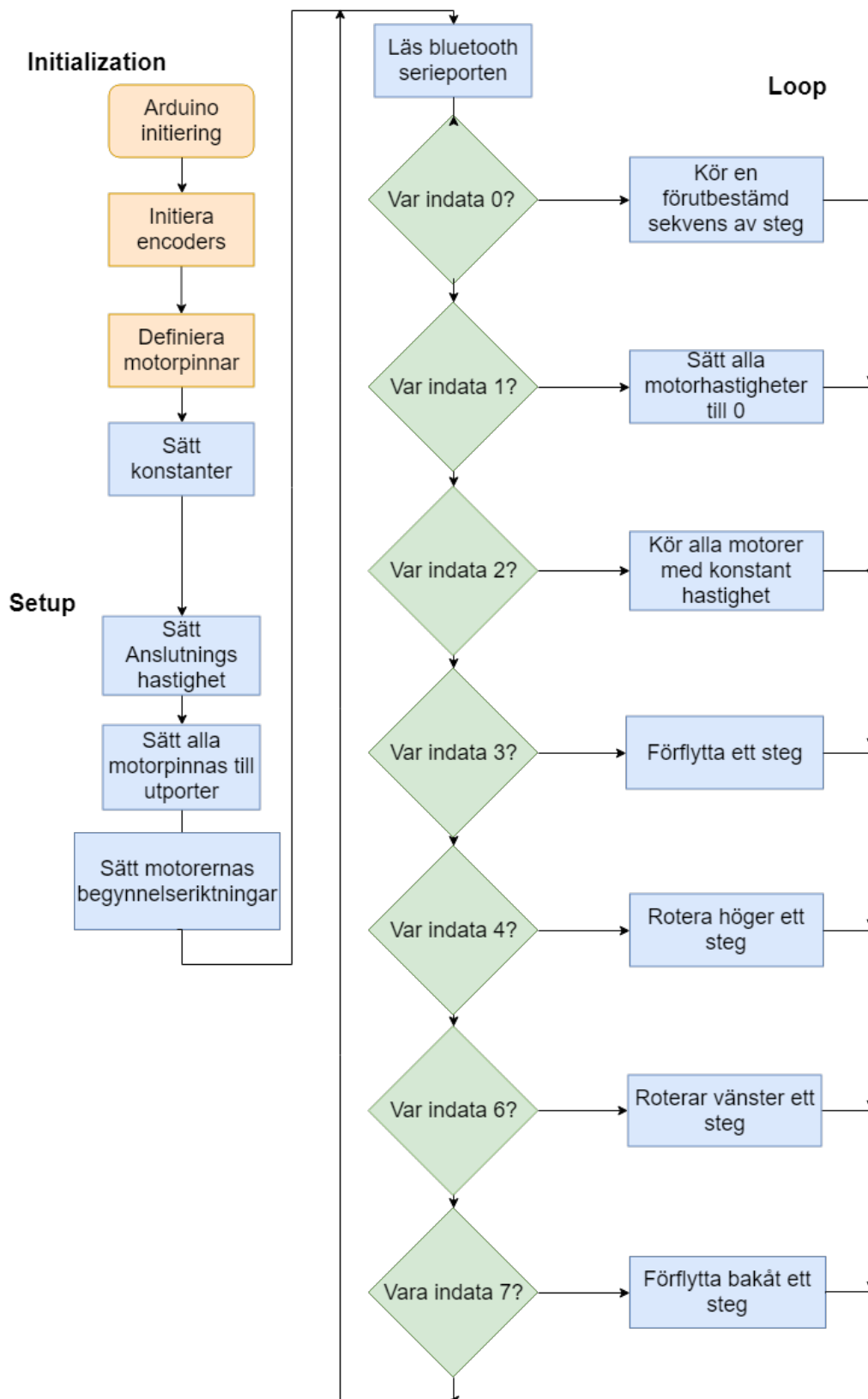
Figur 35: Gränssnitt för Arduino Bluetooth Controller. Varje knapp skickar ett unikt kommando till Arduino Mega-kortet som sedan överför signalen till en specifik rörelse. Fjärrkontrollen har tio knappar. Vid konfigurerings av dessa användes åtta. De olika kommandona beskrivs i Tabell 4.

7.2 Flödesschema för huvudprogrammet

Flödesschemat på Arduino-koden som styr roboten återfinns i Figur 36. Koden är indelad i tre delar enligt figuren med två inledande delar, Initialization och Setup och sedan en huvudloop. De två första delarna används endast vid uppstart av programmet för att verifiera alla in- och utvariabler. Sedan kommer huvudloopen, som läser av insignalen från Bluetooth-enheten och därefter konverterar varje insignal till en specifik rörelse. Se Tabell 4 för knapparnas olika funktioner.

Tabell 4: Tabellen presenterar vilken insignal varje knapp har och vilken funktion den utför.

Knapp	Insignalnummer	Funktion
Kvadrat	0	Kör en förutbestämd sekvens av steg
Cirkel	1	Stanna upp
Triangel	2	Förflytta sig framåt med en konstant hastighet
Pil uppåt	3	Ta ett steg framåt
Pil åt höger	4	Rotera ett steg åt höger
Start	5	Återställ hela programmet
Pil åt vänster	6	Rotera ett steg åt vänster
Pil nedåt	7	Ta ett steg bakåt



Figur 36: Flödesschema för robotens kod. Består av tre delar, Initialization, Setup och huvuddelen, en loop som kontinuerligt läser insignaler från Bluetooth-enheten och styr roboten därefter.

8

VERIFIERING OCH RESULTAT

För att verifiera att kraven som ställdes i kravspecifikationen (Bilaga A.1) uppfyllades gjordes ett antal tester av den fysiska konstruktionen, fjärrkontrollen, rörelsen och batteritiden. Detta kapitel redovisar resultaten av de test som gjordes. Testen utfördes när konstruktionen inte var täckt med plåt. Även simuleringarna av reglersystemen testades.

8.1 Konstruktion

En konstruktion av roboten skapades. Efter ihopmontering av komponenter, koppling av kablar mellan elektriska komponenter samt inklädnad med aluminiumplåt, blev resultatet av robotens utsida och insida enligt Figur 37 och 38. Den slutgiltiga konstruktionen väger 15,37 kg, där varje block har en vikt på 3,84 kg. Konstruktionens dimension blev 1000x705x156 mm. Den totala kostnaden efter tillverkning och inköp av komponenter sammanställdes till 4809,71 SEK, se Bilaga B.1 för pris.

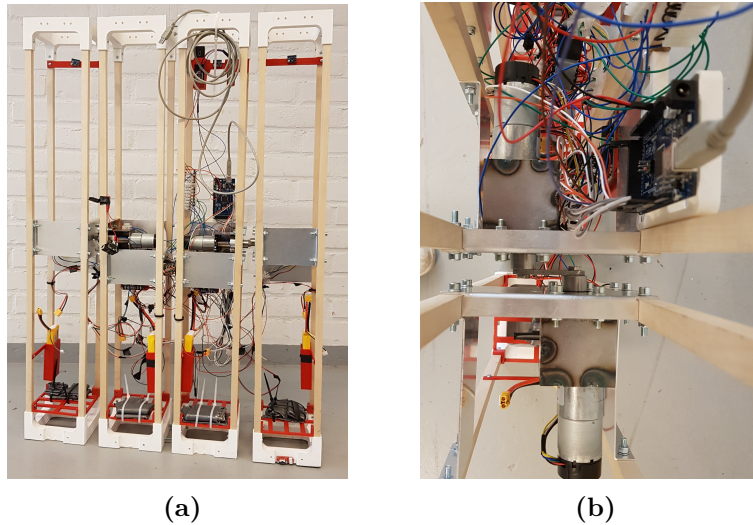


(a)



(b)

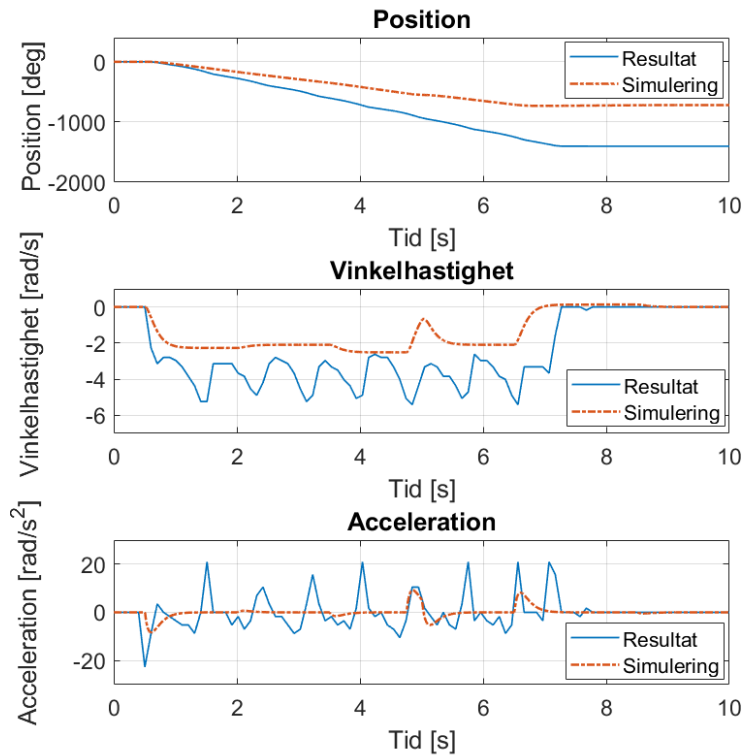
Figur 37: (a) visar resultat av den konstruerande roboten framifrån. (b) visar robotens position när den tar ett steg framåt.



Figur 38: (a) visar resultat av robotens insida. Den nedre delen består av viktplattor i bly, trycksensorer och batterier. I mellandelen återfinns motorpaket, vevaxlar och styrkort. Den övre delen innehåller Bluetooth-enhet, powerbank och accelerometrar. (b) visar robotens insida, sett ovanifrån, där bland annat motorpaket, vevaxel och elkablar synliggörs.

8.2 Simulering och verifiering av öppen styrning

Det öppna styrsystemet implementerades i roboten. Därför verifierades likheten mellan robotens rörelse jämfört med simuleringen för den öppna styrningen från Avsnitt 3.3 och 6.1. Test utfördes för att få fram motorns verkliga position, hastighet och acceleration. Anledningen till varför robotens motor mäts är för att simuleringen får sitt resultat från aktuatorerna. Resultatet kan ses i Figur 39 och Tabell 5. Testet utfördes genom att låta roboten köra samma sekvens på 10 s som simuleringen använde. Fördröjningen var på 0,5 s innan en konstant rörelse på 7 s påbörjades, därefter slutade motorerna rotera. Vinklarna från motorns encoder sparades och utnyttjades för att få fram grafer på position, vinkelhastighet samt acceleration. Den data som användes är från simuleringen och robotens inre motor.



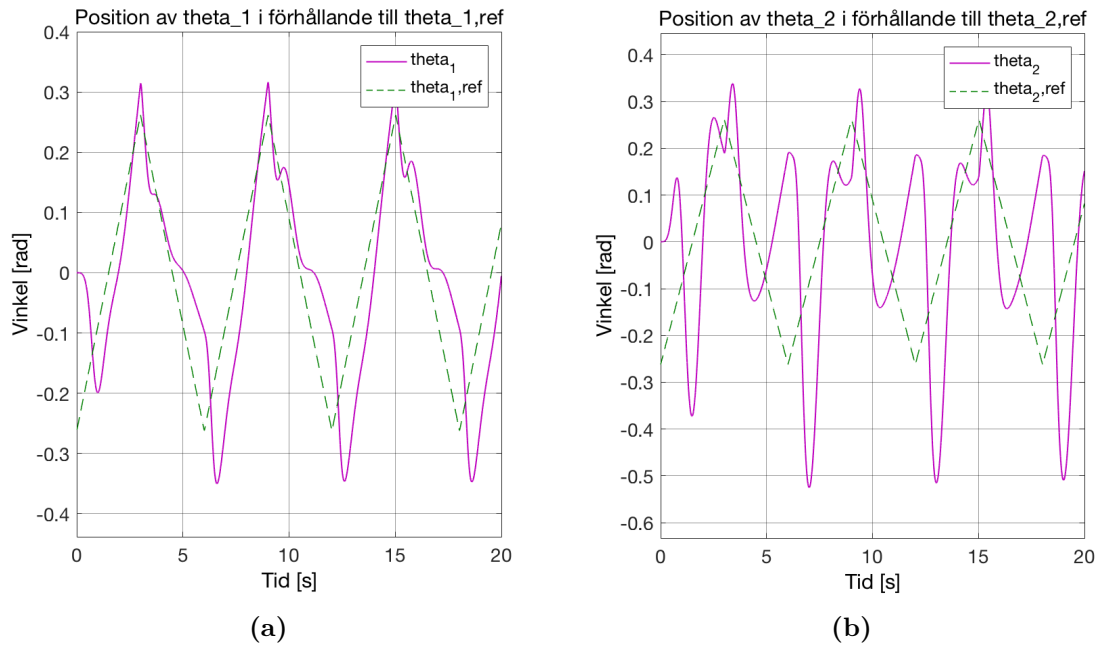
Figur 39: Jämförelse av robotens dynamik under ett 10 s test och dynamiken från den mekaniska simuleringen. Intressanta resultat från figuren kan ses i Tabell 5.

Tabell 5: Tabellen presenterar data av position, vinkelhastighet och -acceleration som mättes under en 10 s cykel. Datan är för roboten samt för den simulerade modellen från det öppna styrsystemet.

Funktion	Värde robot	Värde simulering
Total vinkel	1403°	720°
Maximal vinkelhastighet	-5,5 rad/s	-2,1 rad/s
Medelvinkelhastighet	-2,4 rad/s	-1,3 rad/s
Maximal vinkelacceleration	23 rad/s ²	15 rad/s ²

8.3 Simulering av återkopplat system

För att verifiera hur väl det återkopplade systemet följer referensvinklarna som skickas in plottades dessa. Resultatet blev enligt Figur 40. Referensvinklarna är periodiska och varierar från -15° till 15° medan θ_1 varierar mellan -20° till 17° och θ_2 varierar mellan -29° till 19° . Simuleringen utfördes i Simulink.



Figur 40: Simulering av det återkopplade systemet visar hur vinklarna förhåller sig till referensvinkeln. (a) Visar θ_1 och $\theta_{1,ref}$. θ_1 varierar mellan -20° till 17° . (b) Visar θ_2 och $\theta_{2,ref}$. θ_2 varierar mellan -29° till 19° .

8.4 Verifiering av robot

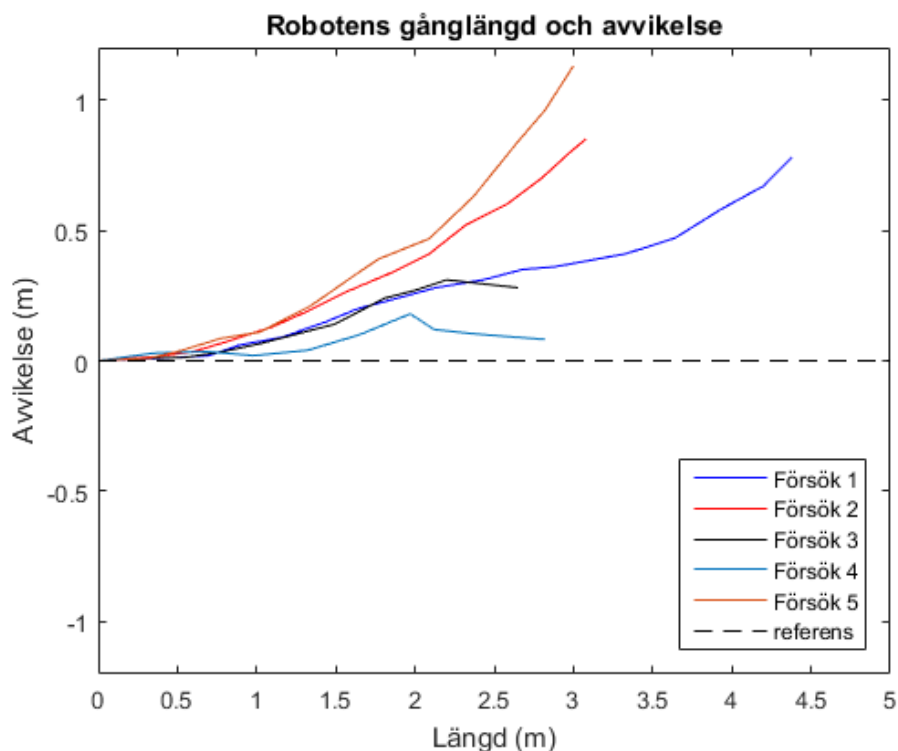
För att verifiera robotens funktion och se om den uppnådde projektets syfte utfördes test för fjärrkontrollen, robotens rörelse och batteritid. För att minska eventuella felkällor utfördes alla test i samma miljö, det vill säga inomhus med plana högfriktionsunderlag. Videoklipp på den simulerade rörelsen samt den verkliga robotens rörelse kan hittas på YouTube på kontot TARS EENX15-18-19 [37].

8.4.1 Verifiering av fjärrkontroll

Vid test av den trådlösa fjärrkontrollen var det möjligt att ansluta till robotens mikrokontroller och kommandon kunde skickas från den mobila enheten till roboten, varefter roboten utförde rörelser som gå ett steg framåt, bakåt, rotera åt vänster och höger. Rörelserna kunde styras på ett avstånd uppmätt till 40 m utan någon märkvärd fördröjning. Roboten kunde manövreras på avstånd upp till 85 m men då med en viss fördröjning. Testet utfördes inomhus i en lång korridor.

8.4.2 Verifiering av rörelse

Robotens framåtrörelse verifierades genom att testa hur långt den kunde gå rakt fram utan att ramla. Roboten gick i genomsnitt 3,19 m framåt och avvek 0,62 m från centrumlinjen, se Figur 41. Under rörelsen lutade blocken stundtals inåt. Under testet gavs motorerna en spänning på 6 V och roboten stannade mellan varje steg för att återfå balansen. Efter var fjärde steg mättes hur långt roboten hade gått samt hur mycket den avvek från centrumlinjen. Detta repeterades sedan tills roboten antingen ramlade eller kolliderade med väggen. Testet upprepades fem gånger. Efter testet kalibrerades motorerna och motorernas spänning justerades individuellt. Avvikelsen från centrum minskade då.



Figur 41: Figuren visar resultatet när TARS-roboten går rakt fram, x-axeln visar längden på gången och y-axeln visar avvikelsen från referenslinjen. Fem försök utfördes där de färgade linjerna visar resultatet för de olika försöken.

Det testades även hur långt roboten kunde gå om den som styrde tilläts rotera roboten för att kompensera för avvikelsen och vinkeln på ett block relativt marken och på så sätt stabilisera upp roboten. Vid detta test kunde den gå mer än 10 m utan att ramla.

Längden på varje steg och tiden det tog för varje steg under framåtgången mättes. Resultatet från testet kan ses i Tabell 6. Testet utfördes genom att låta roboten ta fem steg utan att stanna mellan stegen och mäta sträckan den gått och tiden det tog. Testet utfördes fem gånger.

Dessutom verifierades robotens förmåga att rotera i sidled. Testet utfördes genom att räkna hur många steg åt ett visst håll det tog roboten att rotera 90°. Resultatet blev att roboten tar 8 steg åt antingen vänster eller höger för att rotera 90°. Resultaten från alla tester i detta avsnitt finns i Tabell 6.

Tabell 6: Tabellen presenterar alla resultat från verifieringen av robotens rörelse.

Test	Värde robot
Genomsnitt längd	3,19 m
Avvikelse från centrumlinje	0,62 m
Medelsteglängd	80 mm
Medelstegstid	1,05 s
Rotationssteg	8 st

8.4.3 Verifiering av batteritid

Användningstiden verifierades och resultatet är att roboten har en användningstid på 3 h vid maximal strömförbrukning. Detta testades genom att koppla in ett 12 V nätaggregat som en strömkälla istället för batterierna. Sedan mätte nätaggregatet strömförbrukningen under två steg och den maximala strömmen under rörelsen noterades till 0,9 A. Robotens batteritid beräknades genom att dividera batteriets kapacitet på 2,7 Ah med den uppmätta strömförbrukningen, se Ekvation (65).

$$\frac{2,7 \text{ Ah}}{0,9 \text{ A}} = 3 \text{ h} \quad (65)$$

9

DISKUSSION

Utifrån kravspecifikationen (Bilaga A.1) diskuteras de framtagna resultaten, förbättringsmöjligheter samt problem som uppstod under projektet.

9.1 Konstruktion och komponentval

Den totala kostnaden för alla komponenter som användes till att bygga roboten blev 4809,71 SEK vilket är under kravet på 5000 SEK. Detta uppnåddes genom att robotens mekanik använder en vevaxel som kan lyfta och rotera blocken till skillnad från andra lösningar som använder två separata mekaniska system för robotens rörelse (Bilaga A.3). Detta innebär att färre komponenter behövdes för robotens konstruktion. En annan anledning är att roboten använder sig av DC-motorer vilka är billigare än andra typer av motorer med samma vridmoment. Detta leder dock till en sämre precision. Till exempel ger motorernas encoder väldigt brusig data vilket kan ses i Figur 39 från Avsnitt 8.2.

Robotens vikt är 3,84 kg per block vilket är lägre än kravet på 5 kg per block. Viktkravet uppnåddes för att blockens konstruktion består av en träram med 3D-skrivna fästen som har en låg densitet jämfört med stål eller aluminium. Något som höjde vikten var däremot blyskivorna som placerades på robotens nedre fäste. Detta gjordes eftersom tyngdpunkten låg högre upp än den beräknade tyngdpunkten från simuleringen som kan ses i Figur 11 från Avsnitt 3.3. Blyskivorna ökade då stabiliteten hos roboten.

Eftersom blocken byggdes som ramar gavs det utrymme för komponenter och kabeldragning som kan ses i Figur 38 från Avsnitt 8.1. Däremot uppstod det problem då kablarna var tvungna att dras genom blocken på grund av att mikrokontrollen endast fanns i ett av blocken. Kablarna behövde dessutom vara långa för att inte riskera att dras ur eller skadas under robotens rörelse, vilket ledde till att kabeldragningen blev oorganiserad (Figur 38).

Ett annat problem med konstruktionen var vevaxeln. För vevaxeln simulerades endast en nedåtriktad radiell kraft medan axiella krafter ej togs i åtanke. Roboten antogs att endast röra sig i två dimensioner. För den färdiga konstruktionen slår

ett av de yttre blocken i marken före det andra, vilket gör att roboten går snett. Detta beror på att blocken stundtals lutar inåt när den utsätts för axiella krafter som orsakar att vevslängen elastiskt deformeras.

9.2 Styrning och reglering

Styrningen som slutligen implementerades var ett öppet styrsystem. Både i den mekaniska simuleringen i SimMechanics och i den fysiska roboten kunde samma svagheter ses med denna styrning. Utan någon återkoppling tappar roboten alltmer balans för varje steg och ramlar till slut. Det positiva med styrningen är dock simpliciteten. Programmeringen av rörelsen gick snabbt liksom rörelsen bakåt och rotationen. Med hjälp av dessa funktioner kunde roboten styras manuellt. Styrningen sker genom att användaren inväntar nästa steg tills roboten har återfått sin balans. När roboten avviker från centrumlinjen kan användaren svänga tillbaka den. Roboten kan då gå en sträcka på mer än 10 m.

Avsnitt 8.2 presenterades resultaten på jämförelsen av robotens och simuleringens dynamik. Skillnaden mellan verkliga och simulerade rörelsen kan ses i Figur 39. I samtliga grafer syns det att det verkliga resultatet liknar simuleringens rörelsemönster. Det verkliga resultatet är däremot högre än det simulerade. Detta beror på att roboten körs under högre hastigheter än i simuleringen, då den hastigheten fungerade bättre med de valda DC-motorerna. En annan skillnad är de mjuka kurvorna som återfås på simuleringen medan den riktiga rörelsen är vassare. Detta beror på att simuleringens insignaler filtrerades med filtret från Ekvation 20 i Avsnitt 6.1. I den verkliga modellen användes aldrig ett filter och därav kurvorna.

Från simuleringen av det återkopplade systemet i Avsnitt 8.3 kan en viss fördröjning och störning ses i Figur 40. För θ_1 följer kurvan till stora delar $\theta_{1,ref}$ medan θ_2 frångår $\theta_{2,ref}$ mer med stora svängningar. Detta skulle kunna förbättras genom att ändra värdena i $\mathbf{Q}$ - och $\mathbf{R}$ -matrisen. Dessutom hade en deriverande del kunnat implementeras i systemet för att få förbättrade stabilitetsmarginaler.

9.3 Rörelse

Robotens huvudfunktion är att förflytta sig med ett gångsätt, vilket bestämdes till gångsätt 1. Den färdiga roboten förflyttar sig framåt och bakåt med 8 cm per steg genom att rotera vevaxeln. Dessutom kan roboten svänga genom att följa sekvensen som är beskriven i Avsnitt 3.1.1. För gångsättet som valdes lyckades inte implementeringen av rotation på 15° på det block som är lyft från marken, vilket är anledningen till den nuvarande steglängden. Denna rotation gick inte att implemen-

tera eftersom DC-motorn, för blocket som är på marken, inte kan hålla kvar sin axelposition. På grund av DC-motorns egenskaper måste det finnas ett regelsystem för att hålla kvar axelpositionen.

Robotens framåtrörelse avvek från centrumlinjen med 0,62 m i genomsnitt innan den ramlade (Figur 41). Detta beror delvis på de extra blyplattorna som lades till för att flytta ner tyngdpunkten. Blocken fick då olika mängd vikter, vilket resulterade i att vikten på de fyra blocken varierade. Dessutom kördes motorerna med samma program och med samma spänning. Detta bidrog till att blocken hade olika rotationshastigheter som ledde till avvikelsen från centrumlinjen. En annan orsak kan att vevaxeln stundtals böjer något block inåt. Genom att kalibrera motorerna och individuellt justera motorernas spänning kunde avvikelsen från centrum minskas men inte elimineras.

Ett annat krav var att roboten ska kunna förflytta sig fem steg utan att ramla. I dagsläget kan roboten ta sju kontinuerliga steg utan att den faller. Från kravspecifikationen skulle dessutom ett steg ta 1,5 s vilket roboten understiger med 1,05 s för varje steg. Roboten har alltså utrymme för att göras långsammare och eventuellt bli stabilare med långsammare steg. De valda DC-motorerna gjorde det dock svårt att göra roboten långsammare och därav behölls hastigheten.

En del av syftet är att roboten ska kunna styras med hjälp av en trådlös kontroll. Kontrollen har några inbyggda funktioner som fungerar väl med en knapp för att ta ett steg fram, ett steg bak, ett steg åt vänster och ett steg åt höger vilket roboten även kan utföra.

9.4 Miljö och hållbarhet för material

Roboten innehåller olika miljövänliga och hållbara materialval. Björkstavarna och fästena för blocken har en låg miljöpåverkan under sin livscykel. Björkstavarna och den biobaserade polymeren polyaktid är biologiskt nedbrytbara och förnyelsebara [38]. Motorpaketen innehåller komponenter som är gjorda av stål eller aluminium och har en miljöpåverkan då utvinningsprocesserna av metallerna är energiintensiva, vilket kräver fossila bränslen. Materialen är dock återvinningsbara.

Komponenterna med störst miljöpåverkan är litium-polymerbatterierna. De innehåller giftiga material såsom nickel och kobolt [39]. Batterierna har fördelen att de inte ger några utsläpp under användningen, dock har de en relativt kort livstid på 4-6 år. Dessutom är det svårt att återvinna litium ur batterierna, vilket gör att de inte anses som hållbara. Batterier är överlag inte miljövänliga men då konceptet krävde dessa batterier valdes de.

9.5 Samhälleliga och etiska aspekter

Robotteknik är ett ämne som innehåller många etiska aspekter. Robotar blir alltmer avancerade då de kan ta egna beslut, deras artificiella intelligens utvecklas och de förekommer alltmer i samhället. Detta leder till etiska frågor som innefattar hur robotarna ska tänka och fatta beslut, hur robotar ska ses i samhället samt vilka roller en robot ska kunna ha. Gällande den konstruerade roboten så har endast robotens rörelse utvecklats och inget AI-system. Roboten har inte heller någon beslutsplanering, vilket innebär att den inte behöver ställas inför de etiska beslut som tillkommer vid utveckling av dessa funktioner.

Den främsta etiska aspekten som är relevant för roboten är att ingen skada ska uppkomma på grund av den. Eftersom den är relativt stor med en vikt över 15 kg och förhållandevis instabil kan den utgöra en fara. Under genomförandet av projektet har därför roboten testats under uppsyn och på säkra ytor. Vid kommersiell användning av robotar liknande den som konstruerats i detta projekt bör någon form av sensorer och kollisiondetektering användas.

För tillfället kan roboten endast gå på plana ytor med hög friktion. Om roboten skulle vidareutvecklas för att klara mer komplicerad terräng skulle det finnas många användningsområden. Den kan exempelvis, som i filmen *Interstellar*, utvecklas med diverse armar och komponenter för att klara av mer specifika och avancerade uppgifter samt implementeras med fler rörelsemönster. Med dessa funktioner finns det en möjlighet att roboten kan ersätta mänskliga arbetare. Detta kan vara positivt då roboten är mer effektiv än en människa och kan utföra farliga arbeten.

9.6 Förbättringsmöjligheter

Det finns många möjligheter till förbättring för robotens stabilitet och konstruktion. Detta avsnitt behandlar några förbättringsmöjligheter till bristerna som presenterades i diskussionen ovan.

9.6.1 Förbättringsmöjligheter för stabiliteten

Instabiliteten är den största bristen hos roboten. En förbättringsmöjlighet kan vara att välja en annan typ av aktuator, exempelvis en stegmotor som kan hålla robotens position utan ett reglersystem. Detta hade dock höjt kostnaden för motorerna. Kostnaden hade kunnat minska genom att inhandla färre motorer. Mittenblocken rör sig tillsammans i gångsätt 1 och det hade därför räckt med tre motorer. Om rotationen på 15° elimineras skulle en motor kunnat lösa hela rörelsen. Båda dessa val hade dock krävt axelmekanik som kopplar en motor till två vevaxlar. Dock hade fler gångsätt inte kunnat implementeras, eller varit komplext att lösa.

Ett annat sätt att lösa stabilitetsproblemet är genom att implementera det återkopplade reglersystemet som enbart simulerades. Då hade trycksensorerna som inhandlades behövt implementeras vid bottenfästena på roboten för att känna av vilket steg roboten är på, likt den styrsignal som modellerades i Avsnitt 6.4. Det återkopplade reglersystemet skulle kunna vara svårt att implementera hos roboten då $\mathbf{A}$ -matrisen är tidsberoende och $\mathbf{K}$ -matrisen måste därför ständigt uppdatera sina värden. $\mathbf{K}$ -matrisen skulle däremot kunna anta ett konstant värde genom att vinkeln hos axeln mäts istället för att antas öka linjärt med tiden.

Ett reglersystem som är mindre komplext hade även kunnat implementeras i roboten. Detta skulle kunna stabilisera roboten till ett upprätt läge och invänta till roboten är stabil innan den tar nästa steg. För att jämföra och verifiera de olika reglersystemen hade de kunnat sammankopplas med den mekaniska simuleringen för att ge en uppfattning om hur rörelsen ser ut och vilken lösning som fungerar bäst. Till detta hade dessutom den elektriska modellen kunnat sammankopplas. Den elektriska modellen med batterierna hade då genererat en spänning som kunde driva motorerna som skulle ge upphov till en rörelse i den mekaniska modellen.

Problemet med tyngdpunkten löstes genom att placera blyskivor vid bottenplattorna. Detta problem hade istället kunnat lösas genom att ha större batterier med högre vikt, vilket dessutom hade ökat robotens batteritid. Ett annat alternativ hade varit att konstruera bottendelen i ett annat material. Det hade också varit möjligt att placera motorerna i bottendelen, men det hade krävt ett mer avancerat axel-, kedje- eller kugghjulssystem för att fortfarande få en hög rotationspunkt för blocken.

9.6.2 Förbättringsmöjligheter för konstruktionen

För att undvika en oorganiserad kabeldragning skulle varje block kunna ha ett individuellt system med mikrokontroller, ström, och motordrivare. Signaler skulle istället skickas trådlöst mellan blocken och inga kablar skulle då behövas dras mellan dem. Detta hade krävt en mer avancerad programmering, då kommunikationen mellan blocken måste ske snabbt och blockens rörelser måste synkroniseras.

En stor brist i konstruktionen var vevaxeln som bidrog till att blocken lutade inåt. En lösning skulle vara att konstruera vevaxeln i ett styvare material som kan ta upp de axiella krafterna utan att deformeras. Placeringen av axeln var inte heller optimal. Axeln hade kunnat placeras högre upp och tillsammans med den roterande rörelsen hade roboten då kunnat förflytta sig snabbare. Eventuellt hade även vertikal förflyttning av axlarna i roboten varit möjlig. Detta var ett lösningsförslag när konceptet skulle väljas men ansågs vara en komplex lösning som dessutom skulle bli svår att realisera inom projektets budget.

10

SLUTSATS

Projektets syfte var att undersöka hur en robot liknande TARS från filmen Interstellar skulle kunna konstrueras och programmeras för att gå framåt på minst ett gångsätt. Några delmål var att konstruera en matematisk modell för dynamiken samt att få roboten att gå med en trådlös styrning utan att ramla. I resultatet indikeras att den konstruerade roboten klarar av alla dessa mål, men den till synes enkla designen innebar en rad svårigheter. Framförallt var det svårt att balansera roboten.

För att öka stabiliteten hos roboten kan det återkopplade reglersystemet implementeras hos roboten för att få den att balansera. Detta reglersystem hade kunnat möjliggöra att roboten skulle kunna gå längre utan att ramla, samt att den skulle kunna hantera störningar, såsom ojämnheter i underlaget och liknande. Vidare skulle även ytterligare gångsätt kunna möjliggöras om de två blocken i mitten separerades så det blev en led mellan dem.

Till roboten skulle dessutom olika typer av sensorer kunna användas för att uppnå olika funktioner. Trycksensorerna som inhandlades skulle kunna implementeras. Dessa känner av när blocken slår i marken och talar om när nästa steg ska tas. En annan typ av sensor som detekterar föremål i robotens färdriktning skulle också kunna implementeras. Detta skulle kunna förhindra att roboten går in i väggar eller andra föremål.

Även om det finns stora förbättringsmöjligheter så uppfylldes projektets syfte. Detta tack vare att avgränsningar gjordes tidigt för att arbetet skulle ha en rimlig omfattning och svårighetsgrad. Den konstruerade roboten kan i dagsläget förflytta sig på ett gångsätt med framåt- och bakåtrörelse samt rotera. Detta styrs med en trådlös fjärrkontroll. Lämpliga förslag för vidareutvecklingen av TARS-roboten är att implementera ett reglersystem för roboten, samt att utveckla en matematisk modell för mer komplexa terrängar.

REFERENSER

- [1] L.A. Rygg. "Mechanical Horse". 428412. April 1893.
- [2] M. Hirose och K. Ogawa. "Honda humanoid robots development". I: *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* vol. 365 (jan. 2007), s. 11–19.
- [3] P. G. de Santos, E. Garcia och J.Estremera. *Quadrupedal Locomotion: An Introduction to the Control of Four-legged Robots*. London. England: Springer. 2006.
- [4] S. H. Collins m. fl. "Efficient Bipedal Robots Based on Passive-Dynamic Walkers". I: *American Association for the Advancement of Science* 307 (febr. 2005), s. 1082–1085.
- [5] J. Kehe. "How FX Wizards Brought Interstellar's Strange Bots to Life". 2014. [Online]. URL: <https://www.wired.com/2014/11/interstellar-droids/> (hämtad 2018-02-10).
- [6] TechMartian. "BUILD A MOVING TARS ROBOT FROM INTERSTELLAR". 2017. [Online]. URL: <http://www.instructables.com/id/Build-a-Moving-TARS-Robot-From-Interstellar/> (hämtad 2018-02-02).
- [7] A.B. Higaki. "TARS from Interstellar: A Walking Robot Invention (Award-Winning Engineering Project)". [Video]. *YouTube*, 2017. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=IdvzREqSIA4> (hämtad 2018-02-01).
- [8] LL-Team. "Fischertechnik walking robot / Laufroboter // olagino". [Video]. *YouTube*, 2017. URL: https://www.youtube.com/watch?v=NL_046zrg0s (hämtad 2018-02-01).
- [9] Tamborine Australia The Robotics Club. "Thriller - Three Legged Robot". [Video]. *YouTube*, 2015. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=dapJ9W8jXLU> (hämtad 2018-02-01).
- [10] S. H. Collins, M. Wisse och A. Ruina. "A Three-Dimensional Passive-Dynamic Walking Robot with Two Legs and Knees". I: *The International Journal of Robotics Research* 20 (juli 2001), s. 607–615.
- [11] T. McGeer. "Passive Dynamic Walking". I: *The International Journal of Robotics Research* 9 (april 1990), s. 62–82.
- [12] Wikimedia Commons. "File:ASIMO 4.28.11.jpg". 2011. [Online]. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ASIMO_4.28.11.jpg (hämtad 2018-04-06).
- [13] Honda. "Asimo Specification". (u.å.). [Online]. URL: <http://asimo.honda.com/asimo-specs/> (hämtad 2018-04-11).

-
- [14] T. Takenaka. "The control system for the Honda humanoid robot". I: *Age and Ageing* 35 (sept. 2006), s. 24–26.
 - [15] P. Lindstedt och J. Burenius. *The Value Model*. Nimba, NA: Nimba AB, 2006.
 - [16] Sebastian Castro. "MATLAB and Simulink Robotics Arena: Walking Robots". [Video]. *Mathworks*, 2017. URL: https://se.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/64227-matlab-and-simulink-robotics-arena--walking-robot?s_tid=srchtitle (hämtad 2018-04-13).
 - [17] S. Miller. "Simscape Multibody Contact Forces Library". 2018. [Online]. URL: <https://se.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/47417-simscape-multibody-contact-forces-library> (hämtad 2018-04-13).
 - [18] TARS EENX15-18-19. "TARS simulation ". [Video]. *You Tube*, 2018. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=mgNrWQpKpnQ&feature=youtu.be> (hämtad 2018-05-11).
 - [19] Arduino. "Arduino Mega 2560 rev3". (u.å.). [Online]. URL: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-mega-2560-rev3> (hämtad 2018-04-06).
 - [20] D.G. Alciatore och M.B Histan. *Introduction to Mechatronics and Measurement Systems*. 4ed. New York. USA: McGraw Hill. 2011.
 - [21] Arduino. "Servo library". (u.å.). [Online]. URL: <https://www.arduino.cc/en/Reference/Servo> (hämtad 2018-04-06).
 - [22] CQRobot. "6V, 78rpm, 14kg.cm/12V, 157rpm, 28kg.cm, Metal DC Geared Motor w/Encoder. for Projects Such as Robot, Custom Servo, Arduino and 3D Printers." (u.å.). [Online]. URL: https://www.amazon.com/18kg-cm-36kg-cm-Encoder-Projects-Printers/dp/B0756KVMVR/ref=pd_sbs_328_1?_encoding=UTF8&pd_rd_i=B01MEGLCPL&pd_rd_r=Q1WF1PP5HZ03K18MZX7Y&pd_rd_w=PDkVy&pd_rd_wg=4XpT5&refRID=Q1WF1PP5HZ03K18MZX7Y&th=1 (hämtad 2018-04-06).
 - [23] DFrobot. "Metal DC Geared Motor w/Encoder - 12V 83RPM 45Kg.cm". (u.å.). [Online]. URL: <https://www.dfrobot.com/product-633.html> (hämtad 2018-04-06).
 - [24] DFrobot. "Metal DC Geared Motor w/Encoder - 12V 122RPM 38Kg.cm". (u.å.). [Online]. URL: <https://www.dfrobot.com/product-1210.html> (hämtad 2018-04-06).
 - [25] RobotShop. "Cytron 10A 5-25V Dual Channel DC Motor Driver". (u.å.). [Online]. URL: <https://www.robotshop.com/en/cytron-10a-5-25v-dual-channel-dc-motor-driver.html> (hämtad 2018-04-06).
 - [26] Arduino Playground. "MPU-6050 Accelerometer + Gyro". (u.å.). [Online]. URL: <https://playground.arduino.cc/Main/MPU-6050> (hämtad 2018-05-09).
 - [27] RepRapPro.me. "Micro Switch med Kabel för 3D Skrivare". (u.å.). [Online]. URL: <http://reprappro.me/product/micro-switch-med-kabel-f5C%C3%5C%B6r-3d-skrivare> (hämtad 2018-05-09).
 - [28] SKF. *Rullningslager*. Göteborg, Sverige: SKF-koncernen, 2014.
 - [29] Hobby King. "ZIPPY Compact 2700mAh 3s 40c Lipo Pack". (u.å.). [Online]. URL: https://hobbyking.com/en_us/zippy-compact-2700mah-3s-40c-lipo-pack.html (hämtad 2018-04-06).

-
- [30] Kjell & Company. "Bluetooth-modul för Arduino". (u.å.). [Online]. URL: <https://www.kjell.com/se/sortiment/el-verktyg/arduino/moduler/bluetooth-modul-for-arduino-p87942> (hämtad 2018-04-06).
- [31] The Engineering ToolBox. "Densities of Wood Species". (u.å.). [Online]. URL: https://www.engineeringtoolbox.com/wood-density-d_40.html (hämtad 2018-04-06).
- [32] Index mundi. "Commodity prices". (u.å.). [Online]. URL: <https://www.indexmundi.com/commodities/> (hämtad 2018-04-06).
- [33] S. Kalpakjian och S. R. Schmid. *Manufacturing Process for Engineering Materials*. London. England: Pearson, 2007.
- [34] BE Group. "Mekaniska egenskaper". (u.å.). [Online]. URL: http://www.begroup.com/sv/BE-Group-sverige/Produkter/Stal_ror/Produktinformation/Stalsorter/Mekaniska-egenskaper-ny/ (hämtad 2018-04-06).
- [35] J. Abbott. "LQR Method (Dr. Jake Abbott, University of Utah)". [Video]. *Utah Telerobotics*, 2012. URL: <http://www.telerobotics.utah.edu/index.php/StateSpaceControl> (hämtad 2018-04-10).
- [36] Tinkernut Labs. Producent. "Arduino Bluetooth Basics". *YouTube*, 2014. [Video]. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=sXs7S048eIo> (hämtad 2018-04-05).
- [37] TARS EENX15-18-19. "TARS Walking". [Video]. *YouTube*, 2018. URL: <https://www.youtube.com/channel/UCZQdfVwXWe59Nm7BEoI35vw/featured> (hämtad 2018-05-14).
- [38] S. Madival m. fl. "Assessment of the environmental profile of PLA, PET and PS clamshell containers using LCA methodology". I: *Journal of Cleaner Production* 17 (sept. 2009), s. 1183–1194.
- [39] D. Hsing Po Kang, M. Chen och O. A. Ogunseitan. "Potential Environmental and Human Health Impacts of Rechargeable Lithium Batteries in Electronic Waste". I: *Environmental Science Technology* 47 (april 2013), s. 5495–5503.
- [40] DFRobot. "Interstellar TARS Robot Five Feet Walking Test". [Video]. *YouTube*, 2016. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=g3XoijrV5uw&t=17s> (hämtad 2018-04-17).
- [41] K. Åkesson. "Reglerteknik M". 2017. [Online]. URL: <https://pingpong.chalmers.se/courseId/8915/node.do?id=4142849&ts=1509665440954&u=1723343941> (hämtad 2018-02-10).
- [42] Wikipedia. "Polylactic acid". 2018. [Online]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Polylactic_acid (hämtad 2018-03-20).

Figurer

1	TARS består av fyra rektangulära block. I figuren visas olika tillstånd och gångsätt: (a) är startpositionen, (b) är gångsätt 1, vilket liknar en kryckgång, (c) är gångsätt 2 vilket liknar människogången och (d) är gångsätt 3, då den rullar framåt.	2
2	TechMartian TARS robot och är återgiven utifrån BY-NC-SA [6]. . .	4
3	(a) visar Higaki TARS robot som är återgiven med tillstånd [7]. (b) visar LL-Teams TARS robot som är återgiven med tillstånd [8]. . . .	5
4	Ett exempel på en Passive-dynamic walker med fyra stela ben från [10]. Bilden är återgiven med tillstånd.	5
5	Den humanoida roboten Asimo som består av två armar och ben samt en torso [12]. Bilden är publicerad av CC BY-SA 3.0.	6
6	Skiss av det valda konceptet. (a) visar startpositionen, (b) positionen efter första steget och (c) är en vy ovanifrån i startläget.	8
7	Olika vyer av konceptet under ett steg med gångsätt 1. (a) visar roboten framifrån när blocken lyfts, (b) visar samma läge från sidan och (c) visar när de lyfta blocken vinklats framåt.	9
8	Sträckan a är halva blockets bredd, b är halva blockets höjd och c är avståndet från centrum av blockets sida till hörnet.	9
9	Aktuatorernas placering vid ändarna av vevaxlarna. De inre respektive de yttre rör sig synkroniserat i par.	10
10	Sfärerna som simulerar kontakt med golvet i skala 1:10.	11
11	Förflyttning av blockens tyngdpunkter från centrum till en fjärdedel ner för att roboten ska kunna hålla balansen under rörelsen. Hade blockens tyngdpunkter varit i mitten hade den totala tyngdpunkten för roboten varit för långt bak och roboten hade ramlat.	11
12	(a) visar blockens ursprungsposition från sidan. Punkterna A och B motsvarar fästpunkterna för den inre och yttre aktuatoren. (b) visar blockens ursprungsposition ovanifrån.	13
13	Koordinaterna för hävarmen, $L_{TP,1}$ börjar i punkten B. Vid punkten C har roboten gått ett steg. d är avståndet från enhetscirkelns origo till blockets tyngdpunkt. Vinkeln α visar axelns vinkel under rörelsen.	14

14	Moment-tid-kurva för den inre aktuatoren. På x-axeln visas tiden medan y-axeln visar momentet. Det största momentet uppgår till 2,85 Nm.	15
15	Moment-varvtal-graf. De färgade linjerna visar hur motorerna ändrar sitt varvtal utifrån momentet. Den streckande linjen visar arbetspunkten.	17
16	Friläggning av vevaxeln. F_{By} och F_{Cy} är de radiella stödkrafterna från kullagren. F_{Ay} är stödkraften från motorn och F_{Dy} är lasten som uppstår när axeln roterar och lyfter ett ben.	19
17	Övergripande bild av kretsschemat för robotens elektriska komponenter, där en lista över alla innehållande komponenter går att se i Tabell 3. I figuren går det att se hur alla komponenter har kopplats samman, samt vilka in- och utportar för mikrokontrollerkortet som har använts.	23
18	CAD-rendering av hela robotens konstruktion som visar två olika tillstånd. Roboten består av fyra block som kopplas samman med två vevaxlar. (a) visar robotens startposition och (b) visar roboten efter ett steg.	24
19	CAD-rendering av ett av de fyra blocken. Blocket innehåller fyra stavar som fästs på det övre och undre fästet. I mitten av blocket finns det aluminiumplåtar.	25
20	(a) visar en CAD-rendering av det övre fästet med träskruvar. (b) visar en CAD-rendering av sidoplåtarna och motorplåten samt visar skruvförbanden som användes för att fästa plåtarna på trästavarna.	25
21	CAD-rendering av ett monterat motorpaket. Motorpaketet agerar som ett fäste för motorn och axeln.	26
22	En CAD-rendering som visar en exploderad vy över alla komponenter för motorpaketet.	26
23	CAD-rendering av motorpakets lagerhus och kullager. (a) visar ett monterat lagerhus med två kullager och (b) visar en exploderad vy.	27
24	CAD-rendering av motorfästet för motorpaketet, (a) visar ett monterat fäste där ståldelarna har svetsas samman. (b) visar de olika ståldelarna som ska svetsas samman. Ståldelarna skars ut i en vattenskärare.	27
25	CAD-rendering av en monterad vevaxeln med motorerna. Figuren visar endast vevaxeln och motorerna för att illustrera hur de monteras.	28
26	CAD-rendering som visar hur vevslängen och axeln kopplas samman.	28
27	CAD-rendering som visar en exploderad vy över vevaxelns olika komponenter.	28
28	Resultat av Ansys-simuleringen av vevaxeln, (a) är effektivspänningen och (b) är totala deformationen. Simuleringen använder sig av flera olika randvillkor och belastar ena axeln med en nedåtriktad kraft på 39,7 N.	29
29	Aktuatorernas position i grader under simuleringens förlopp, efter att signalerna har filtrerats.	31

30	Friläggning av axeln med längden b . I figuren ses momenten, M_1 och M_2 , kontaktkrafterna, V_1 , H_1 , V_2 och H_2 , samt vinkeln ϕ , som kommer variera under rotationen.	32
31	Friläggning av det yttre och inre blocket med kontaktkrafter mellan axel och block samt mellan mark och block. Ett moment från motorn får blocket att rotera med θ_1 eller θ_2 grader medan tyngdkraften inverkar. Om blocket är lyft från marken kommer kontaktkraften, i detta fall, F_2 och N_2 , vara noll. (a) Visar friläggningen av det yttre blocket medan (b) visar friläggning av det inre blocket.	33
32	Positionen $(\bar{x}_2, \bar{y}_2)$. Koordinatsystemets placering är när det yttre blocket är i kontakt med marken. För att se koordinater för axel se Figur 30.	34
33	Styrsignalen för rörelsen från den mekaniska simuleringen.	38
34	Blockschema över det återkopplade systemet. w är referensvinklar. u är spänningen. y är utsignal och x innehåller information om vinklar, vinkelhastighet och ström.	40
35	Gränssnitt för Arduino Bluetooth Controller. Varje knapp skickar ett unikt kommando till Arduino Mega-kortet som sedan överför signalen till en specifik rörelse. Fjärrkontrollen har tio knappar. Vid konfiguration av dessa användes åtta. De olika kommandona beskrivs i Tabell 4.	41
36	Flödesschema för robotens kod. Består av tre delar, Initialization, Setup och huvuddelen, en loop som kontinuerligt läser insignaler från Bluetooth-enheten och styr roboten därefter.	43
37	(a) visar resultat av den konstruerande roboten framifrån. (b) visar robotens position när den tar ett steg framåt.	44
38	(a) visar resultat av robotens insida. Den nedre delen består av viktplattor i bly, trycksensorer och batterier. I mellandelen återfinns motorpaket, vevaxlar och styrkort. Den övre delen innehåller Bluetooth-enhet, powerbank och accelerometrar. (b) visar robotens insida, sett ovanifrån, där bland annat motorpaket, vevaxel och elkablar synliggörs.	45
39	Jämförelse av robotens dynamik under ett 10 s test och dynamiken från den mekaniska simuleringen. Intressanta resultat från figuren kan ses i Tabell 5.	46
40	Simulering av det återkopplade systemet visar hur vinklarna förhåller sig till referensvinkeln. (a) Visar θ_1 och $\theta_{1,ref}$. θ_1 varierar mellan -20° till 17° . (b) Visar θ_2 och $\theta_{2,ref}$. θ_2 varierar mellan -29° till 19°	47
41	Figuren visar resultatet när TARS-roboten går rakt fram, x-axeln visar längden på gången och y-axeln visar avvikelser från referenslinjen. Fem försök utfördes där de färgade linjerna visar resultatet för de olika försöken.	48
42	Kravspecifikation. Här sätts krav på robotens prestanda, miljöpåverkan, livslängd, underhåll, material- och tillverkningsmetoder samt säkerhet.	I

43	Funktionsstruktur som presenterar delfunktionernas samverkan för att utföra en rörelse.	II
44	Morfologisk matris. Här presenteras olika lösningsförslag till de tre delfunktionerna höja och sänka block, rotera dem och stabilisera roboten.	III
45	Spänningsfall av batteri över 6 min. Motorer utsätts för konstant moment på 0,5 Nm. Strömförbrukningen hamnar på 0,68 A.	X
46	Övergripande kretsschema för elektrisk simulering i Simulink.	X
47	Momentdelen av kretsschemat för den elektriska simuleringen i Simulink.	XI
48	TARS-blocket för den mekaniska modelleringen. Här visas bland annat hur de olika blocken och axlarna är kopplade till varandra och lederna som lagts mellan dem.	XII
49	Toppnivån för SimMechanics-modellen. På vänstra sidan är roboten ansluten till planet med en led med sex frihetsgrader. Repeating table motion är blocket som förser den öppna styrningen. På höger sida om TARS beräknas styrsignalen.	XIII
50	Indelning av komponenter för beräkning av tröghetsmoment.	XV
51	(a) visar avståndet mellan tyngdpunkten och motoraxeln ovanifrån. Värden för variablerna som visas i figuren kan ses i Tabell 11. (b) visar avståndet mellan tyngdpunkten och motoraxeln från sidan. . . .	XVI
52	Kontrollsystemet i Simulink med referenssignalen, $\mathbf{w}$ och switchen, step. PI-regulatorn samt det tidsvarianta systemet. Från detta kan utsignal, insignal och andra tillstånd avläsas i databoxen.	XXII
53	PI-regulatorn för det återkopplade systemet i Simulink.	XXII
54	För att beräkna $\mathbf{K}$ -matrisen används bland annat den differentialsa Ricotti-ekvationen.	XXIII
55	När spänningen $\mathbf{u}$ är framtagen kan utsignalen fås fram.	XXIII

Tabeller

1	Data på potentiella motorer som kommer att användas för att dimensionera motorn. Motorerna kommer ifrån två olika tillverkare, DFrobot och CQRobot. Data för motorerna kommer ifrån [22], [23] och [24].	16
2	Tabellen presenterar resultatet för beräkningen av arbetsvarvtalet enligt Ekvation (9).	18
3	Lista över innehållande komponenter för kretsschemat som går att se i Figur 17. För en mer utförlig komponent- samt prislista, se Bilaga B.1.	22
4	Tabellen presenterar vilken insignal varje knapp har och vilken funktion den utför.	42
5	Tabellen presenterar data av position, vinkelhastighet och -acceleration som mättes under en 10 s cykel. Datan är för roboten samt för den simulerade modellen från det öppna styrsystemet.	46
6	Tabellen presenterar alla resultat från verifieringen av robotens rörelse.	49
7	Lista över de komponenter som köpts in för att bygga roboten.	VII
8	Konstanter för momentberäkningen vid val av aktuator. Massan på varje block är beräknad utifrån CAD-modellen som skapades. Övriga konstanter är tagna från kravspecifikation och konceptval.	VIII
9	Konstanter för lagerlivslängdsberäkningar. Den ekvivalenta dynamiska lagerbelastningen beräknas med Ekvation (11) - (15). Massan på varje block är beräknad utifrån CAD-modellen som skapades. Övriga konstanter är tagna från SKF:s produktkatalog.	IX
10	Värden till den matematiska modellen. Motorparametrarna är värden tagna från en annan DC-motor [41]. Vinkelhastigheten är uppskattad.	XIV
11	Värden för längder som är relevanta för tröghetsmomentsberäkningen.	XVI

BILAGOR

A Konceptval och modellering

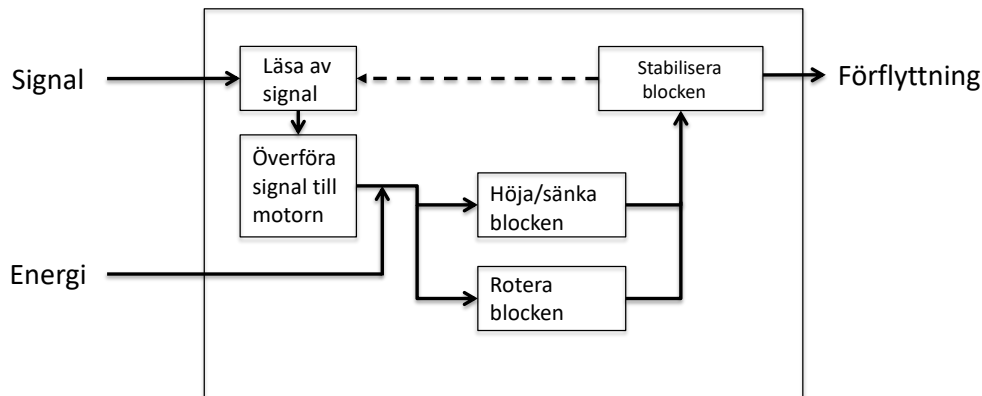
A.1 Kravspecifikation

Chalmers		Dokumenttyp	Kravspecifikation		
Kandidatarbete		TARS, roboten från Interstellar			
Utfärdare: Projektgrupp EENX15-18-19		Skapad: 2018-02-01			
		Modifierad: 2018-05-10			
Kriterier		K/O	Vikt	Verifikationsmetod	Referens (kravställare)
Funktioner					
Huvudfunktion					
	Förhytning av robot	K		Testa om roboten kan förhyta sig tre steg	Nikolce Murgovski (examinator)
	Förhytar sig med ett gångsätt	Ö	2	Testa om roboten kan förhyta sig tre steg	Projektgrupp EENX15-18-19
	Förhytning av robot	K		Tidtagning och matematiska beräkningar	Projektgrupp EENX15-18-19
	Ett steg på 1,5 s	Ö	4	Testa roboten omfattande antal gånger	Projektgrupp EENX15-18-19
	Förhyta sig 10 m utan att ramla	K		Använda fjärrkontrollen för att styra roboten	Nikolce Murgovski
	Roboten förhytar sig med hjälp av fjärrkontrollen				
	Defunktion				
	Höj/sänkta block	K		Måta avståndet till marken	Projektgrupp EENX15-18-19
	Rotera block	K		Måta vinkel mellan blocken efter första steget	Projektgrupp EENX15-18-19
	Stabilisera block	K		Testkörning av robot	Projektgrupp EENX15-18-19
1. Prestanda					
1.1	Useende	K			
	Fyra block				Projektgrupp EENX15-18-19
1.2	Vikt på roboten	K		Väga roboten	Projektgrupp EENX15-18-19
	Maximal vikt: 5 kg per block	Ö	5	Väga roboten	Projektgrupp EENX15-18-19
	Vikt på roboten	K		Måta roboten	Projektgrupp EENX15-18-19
	Maximal vikt: 4 kg per block	Ö		Måta roboten	Projektgrupp EENX15-18-19
1.3	Ytemåten på roboten	K			
	Höjd: 1000 mm, Bredd: 200 mm, Diameter: 200 mm	Ö	4	Måta roboten	Projektgrupp EENX15-18-19
2. Miljö					
	per block				
2.1 Material					
	Ätervinningsbart	Ö	3	Materialstudier	Projektgrupp EENX15-18-19
	Enkel deponeering			Ta reda på om materialen och tillverkningen sker enligt svensk lag	Svensk och internationell lag
2.2	Materialval	K			
3. Livslängd					
	Batteritid	K		Testkörning tills batteriet tar slut	Projektgrupp EENX15-18-19
3.1	Batteritid	Ö	3	Testkörning tills batteriet tar slut	Projektgrupp EENX15-18-19
4. Underhåll					
4.1	Underhållsfri			Testa roboten omfattande antal gånger	Projektgrupp EENX15-18-19
5. Material- & tillverkning					
5.1	Materialkostnad	K		Beräkning av komponenter	Nikolce Murgovski
5.2	Tillverkning	K			Nikolce Murgovski
17. Säkerhet					
	Säkerhet	K		Testa roboten omfattande antal gånger	Projektgrupp EENX15-18-19
17.1					

Figur 42: Kravspecifikation. Här sätts krav på robotens prestanda, miljöpåverkan, livslängd, underhåll, material- och tillverkningsmetoder samt säkerhet.

A.2 Funktionsstruktur

För att förenkla utvecklingen av ett fungerande helhetskoncept delades robotens huvudfunktion, att förflytta sig framåt, upp i flera delfunktioner för att därefter hitta lösningar till dessa [15]. Uppdelningen av funktionerna kan ses i Figur 43.



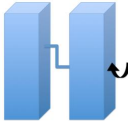
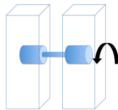
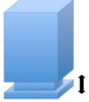
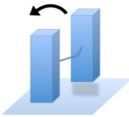
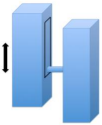
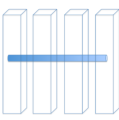
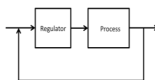
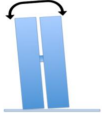
Figur 43: Funktionsstruktur som presenterar delfunktionernas samverkan för att utföra en rörelse.

Funktionsstrukturen presenterar produktens delfunktioner och hur de samverkar för att utföra en rörelse. Utformningen genomfördes med hjälp av Black box-metoden [15], där den yttre boxen motsvarar roboten och den inre boxen motsvarar delfunktionerna. Inparametrar motsvarar parametrarna som krävs för att roboten ska utföra sitt mål, vilket är signalen från den trådlösa styrningen och energi från en strömkälla. Utparameter från roboten är robotens förflyttning.

Signaler skapas och skickas vidare för att läsas av varpå signalen kan överföras till motorn. När motorerna aktiveras krävs energi för att kunna förflytta blocken. Vid rotation av blocken kommer kanterna på blocken att slå i marken. Detta innebär att en funktion för att höja blocken krävs för att möjliggöra rörelsen. Under förflyttningen kan roboten vara instabil och därför behöver systemet en funktion som stabiliserar roboten.

A.3 Morfologisk matris

En morfologisk matris skapades för att sätta in lösningar till delproblemen, se Figur 44. Dellsningarna förklaras sedan vidare under figuren.

Delfunktion Lösning	A. Höja/sänka block	B. Roterar block	C. Stabilisera robot
L1.			
L2.			
L3.			
L4.			
L5.			
L6.			
L7.			
L8.			

Figur 44: Morfologisk matris. Här presenteras olika lösningsförslag till de tre delfunktionerna höja och sänka block, rotera dem och stabilisera roboten.

A. Höja/sänka block

L1. Blocken är sammankopplade med en vevaxel där en motor är fastkopplad i ena änden. När motorn körs kommer den andra änden rotera i en cirkel kring motoraxeln.

L2. Blocken har en bottendel som kan förlängas. Delen styrs av en separat komponent, med hjälp av programmering.

L3. Blocken har en skena på sidorna som illustreras med den svarta ramen. Axlarna ska kunna förflytta sig i höjddled längs skenan. Förflyttningen styrs med hjälp av programmering.

L4. Varje block är uppdelat i två mindre block som är sammankopplade med en sfär som fungerar som ett gångjärn. Denna lösning är inspirerad av människans knä och löser både delfunktion A och B.

L5. Blockens bottendel är sammankopplad med en platta med hjälp av en axel. Axeln har liknande funktion som för sfären i lösning 4. Denna lösningen är inspirerad av människans fot och fotled.

L6. Blocken har hjul i bottendelen som möjliggör förflyttning framåt utan att lyfta blocken.

L7. Blocken är sammankopplade med en enkel, rak axel, utan motorer eller andra funktioner. För att förflytta sig framåt lutar hela roboten från sida till sida. Denna lösning är inspirerad av pingvinens rörelse.

L8. Blockens bottendel har avrundade kanter. Med hjälp av avrundningen kan blocken roteras utan att kanterna slår i marken.

B. Roterar block

L1. Alla block är sammankopplade med en rak axel där det sitter en motor i vardera ände. När den ena motorn körs igång börjar axeln att rotera, vilket leder till att det andra blocket roterar.

L2. Blocken är sammankopplade med en vevaxel. Skillnaden mellan denna lösning och tidigare lösning är att motorn i blocket som är upphöjd (illustrerad i Figur 44) inte är fix med axeln. Detta leder till att blocken ständigt är i ett vertikalt läge.

L3. Blocken är sammankopplade med en rak axel. Istället för att rotera medurs, roterar blocken ett helt varv moturs. Förflyttningen av denna lösning kommer ha liknande rörelse som gångsätt 3, se Figur 1.

L4. Alla block är sammankopplade med en lång axel som drivs av en motor. Under förflyttningen roteras axeln ständigt. Blocken har en komponent som kan koppla fast blocken med axeln. I viloläget är blocken ifrånkopplade, men under förflyttningen kommer blocken i ordning att sammankopplas och roteras med axeln. Denna lösning kräver ett program som skickar information om vilket block ska fästas med axeln.

C. Stabilisera robot

L1. Alla fyra block är sammankopplade med en stor ram. Ramens uppgift är att skapa en gemensam tyngdpunkt centrerad i hela roboten. Lösningen är inspirerad av en annan TARS-inspirerad robot med fem fötter [40].

L2. Blocken har en stödpinne som kommer ut och trycker fram det bakre blocket för att inte roboten ska ramla bakåt.

L3. Blocken har en större bottenplatta som ska stabilisera roboten.

L4. Stabiliseringen sker med hjälp av ett reglersystem. Reglersystemet beräknar vilken vinkel och hastighet som krävs för att undvika att roboten ramlar.

L5. Alla elektriska komponenter ligger på bottendelen av blocken, detta förflyttar blockens tyngdpunkt till den nedre delen.

L6. Blockens nederkant har material med hög friktion mot underlaget som motverkar glidning.

A.4 Eliminering av lösningar

Lösningar eliminerades på grund av att de var för komplexa, för dyra, inte realiserbara eller där det skulle kunna uppstå problem.

Lösningarna A-L2 till A-L4 eliminerades då dessa lösningar var för komplexa och komponenter som behövde inhandlas skulle gå utanför budgeten. Lösning A-L5 eliminerades då denna lösning är instabil och komplex. När axeln inte är digitalt styrd kommer roboten att vara instabil vid sitt viloläge. Om systemet däremot är digitalt styrt kan axeln låsas fast vid ett specifikt läge. För att realisera lösningen behövs det fler komponenter, mer tid och mer kunskap. Även lösning A-L6 eliminerades av samma anledning. Denna lösning krävde dessutom någon form av reglersystem som håller roboten stabil vid förflyttningen. Lösningen ansågs vara för komplex samt inte realiserbar och därför eliminerades den. I lösning A-L7 får lutningen inte vara för stor, då kommer tyngdpunkten att avvika från sitt viloläge. Detta leder till att roboten blir instabil och kan ramla. Samtidigt behöver roboten luta sig mer för att kunna ta större steg. Denna lösning eliminerades då den ansågs vara för komplex och kräver betydligt fler tester för att kunna realiseras och få en robot att förflytta sig felfritt. Därefter eliminerades A-L8 eftersom avrundningen behövde en relativt stor radie för att kunna lösa följande delfunktion, men om avrundningen är för stort så kommer roboten att vara instabil. Den lösning som återstod var lösning A-L1.

Under delfunktion B, rotera block, valdes en kombination av B-L1 och B-L2. Det vill säga motorerna kunde både vara fixerade till axeln och vara löst kopplad till axeln. Lösning B-L3 eliminerades då den bedömdes näst intill omöjlig att bli stabil. B-L4 eliminerades då en låsanordning bedömdes svår att realisera samt att lösningen var svår att kombinera med en vevaxel.

Ett reglersystem valdes som en lösning till delfunktion C, stabilisera robot, dessutom kommer alla komponenter monteras så lågt som möjligt för att öka stabiliteten.

B Komponentval

B.1 Komponentlista

Tabell 7: Lista över de komponenter som köpts in för att bygga roboten.

Komponent	Egenskap/Syfte	Leverantör	Antal	Kostnad
Konstruktionsmaterial				
Kullager	Minska friktion	RS Components	8 st	448 kr
Aluminiumplåt	Täcka robot	Slöjddetaljer	2 m ²	440 kr
Blyskivor	Tyngdpunkt	Robotföreningen	4 kg	30 kr
Motor-/lagerhus	Fästa motorer	Prototypverkstad	4 st	0 kr
Vevaxel	Koppla ben	Prototypverkstad	2 st	0 kr
Elektronik				
Styrkort cytron	Styra motorer	Robotshop.com	2 st	753.36 kr
Bluetooth HC06	Bluetooth-enhet	Robotföreningen	1 st	40 kr
Röda led-dioder	Test av Bluetooth	Robotföreningen	2 st	6 kr
Arduino Mega	Styra robot	Robotföreningen	1 st	70 kr
Powerbank	Strömförsörjning	Clas Ohlson	1 st	99 kr
Komponentfästen	Fästa komponenter	Robotföreningen	1 st	0 kr
Accelerometer	Vinkelinformation	Ali Express	4 st	23,8 kr
Kontaktswitchar	Info om kontakt	RepRapPro	6 st	216 kr
Strömbrytare	Sluta/bryta krets	Robotföreningen	1 st	15 kr
Flatstittsäkring	10 A, förhindra eld	Robotföreningen	1 st	20 kr
Flatstiftskontakter	Koppla kablar	Robotföreningen	8 st	8 kr
Dupontkablar	Koppla kontakter	Robotföreningen	20 m	30 kr
Kablar	Komponentkoppling	Robotföreningen	30 m	45 kr
Buntband	Hålla ihop kablar	Robotföreningen	40 st	20 kr
Kopplingslister	Koppla kablar	Robotföreningen	4 st	80 kr
Batterier Zippy	Strömförsörjning	Hobby King	4 st	859,3 kr
Motorer + encoder	Driva robot	TME Components	5 st	1606,25 kr
Total kostnad [SEK]				4809,71 kr

B.2 Värden från momentberäkning

Tabell 8: Konstanter för momentberäkningen vid val av aktuator. Massan på varje block är beräknad utifrån CAD-modellen som skapades. Övriga konstanter är tagna från kravspecifikation och konceptval.

Definition	Beteckning	Värde	Enhet
Uppskattad massa för ett block	m_{block}	4	kg
Tyngdaccelerationen	g	9,82	m/s ²
Längd hos axel	a	0,012	m
Längd hos axel från hålet	b	0,06	m
Längd hos axel	c	0,012	m
Avstånd mellan TP och axelns fäste	d	0,25	m
Ramens bredd	l_b	0,015	m

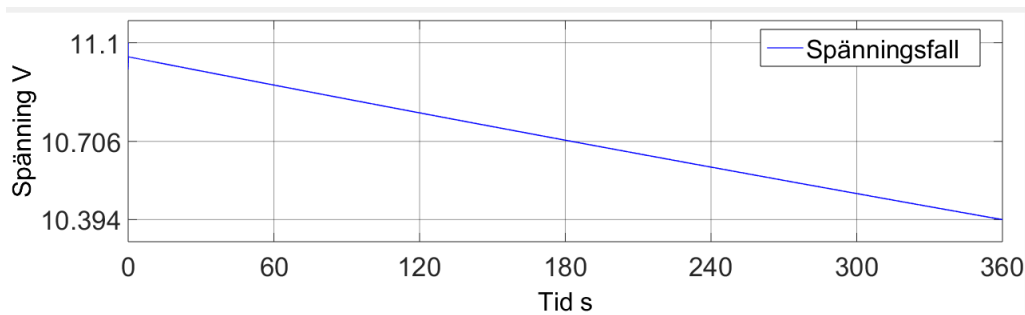
B.3 Värden från lagerberäkning

Tabell 9: Konstanter för lagerlivslängdsberäkningar. Den ekvivalenta dynamiska lagerbelastningen beräknas med Ekvation (11) - (15). Massan på varje block är beräknad utifrån CAD-modellen som skapades. Övriga konstanter är tagna från SKF:s produktkatalog.

Definition	Beteckning	Värde	Enhet
Ekvivalent dynamisk lagerbelastning	P	0,049	kN
Massan för varje block	m	4	kg
Smörjmedlets renlighetsgrad	η_c	0,5	
Lagrets utmattningsbelastning	P_u	0,132	kN
Smörjmedlets viskositetsförhållande	κ	1	
Lagrets dynamiska bärighetstal	C	7,28	kN
Konstant för kullager	p	3	
Konstant beroende på vald tillförlitlighet	a_1	1	

B.4 Kretsschema och simulering över spänningsfall

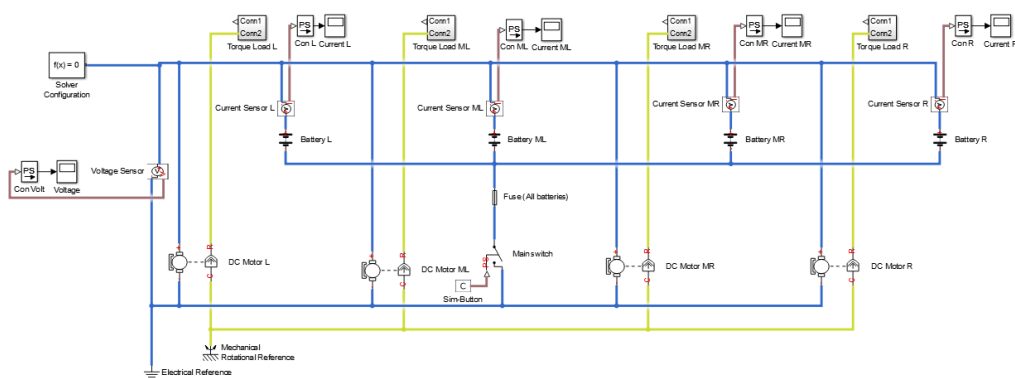
Vid simuleringen används samma egenskaper som för de valda batterierna och motorerna. Kretsschemat inkluderar alltså inte strömförbrukningen från komponenter som kretskort, Bluetooth-enhet och sensorer. Simuleringen tar inte hänsyn till den exakta momentkurvan för att underlätta simuleringen. Resultatet blev enligt Figur 45.



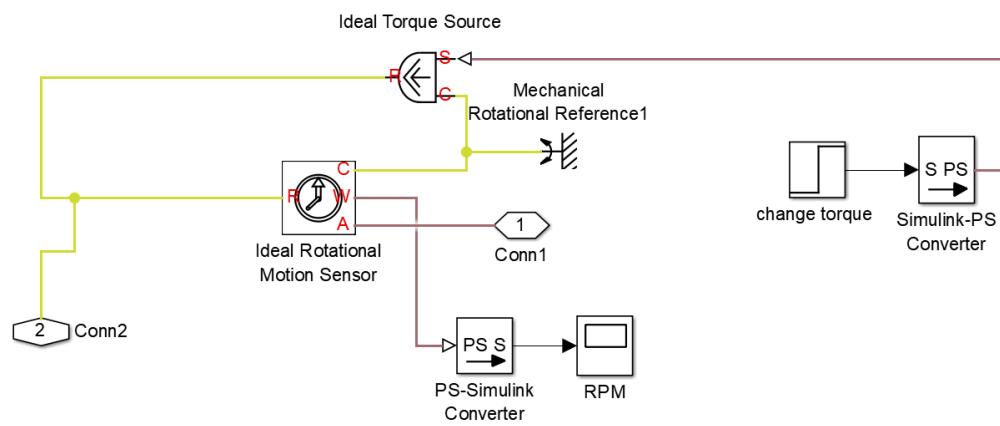
Figur 45: Spänningsfall av batteri över 6 min. Motorer utsätts för konstant moment på 0,5 Nm. Strömförbrukningen hamnar på 0,68 A.

Enligt resultatet går batterierna från 11,1 V till 10,4 V, vilket innebär att de förlorar 0,7 V på 360 s och beräknas därför ha ett konstant spänningsfall på cirka 2 mV/s. Detta innebär alltså att roboten kan gå konstant i 51 min, innan spänningen hamnar under 5 V och batterierna blir för svaga för motordrivarkorten.

I Figur 46 och 47 kan kretsschemat i Simulink för den elektriska simuleringen ses.



Figur 46: Övergripande kretsschema för elektrisk simulering i Simulink.

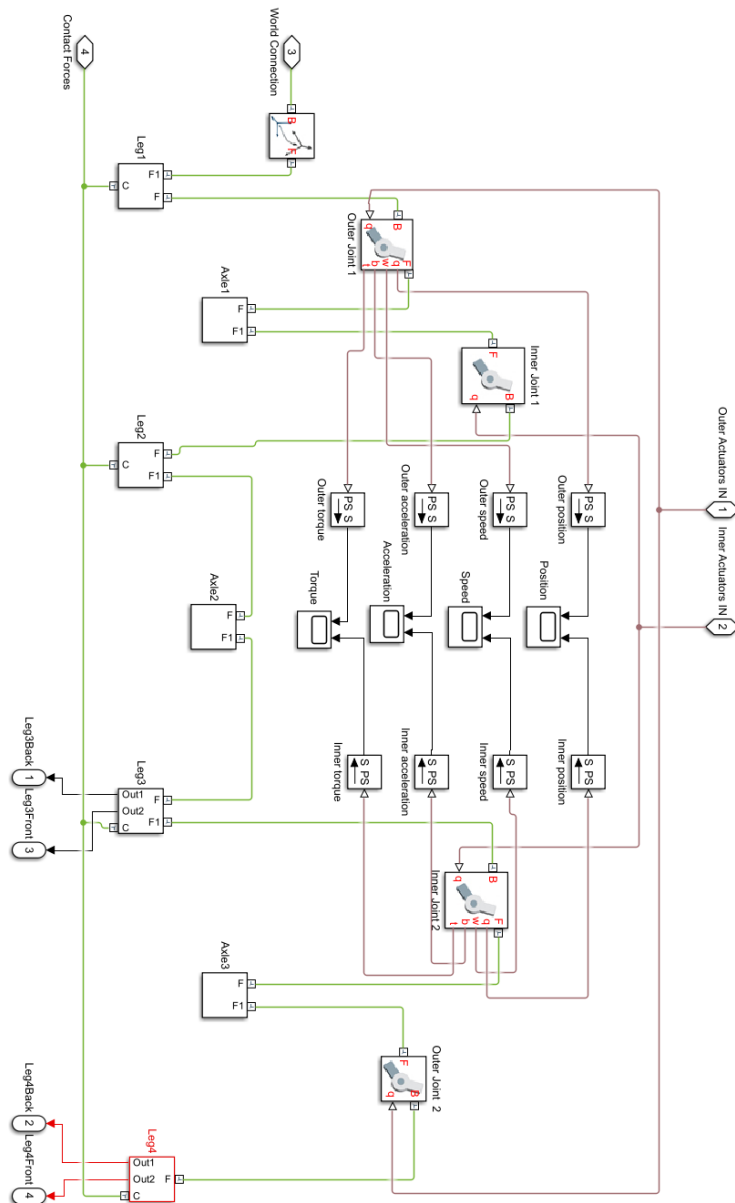


Figur 47: Momentdelen av kretsschemat för den elektriska simuleringen i Simulink.

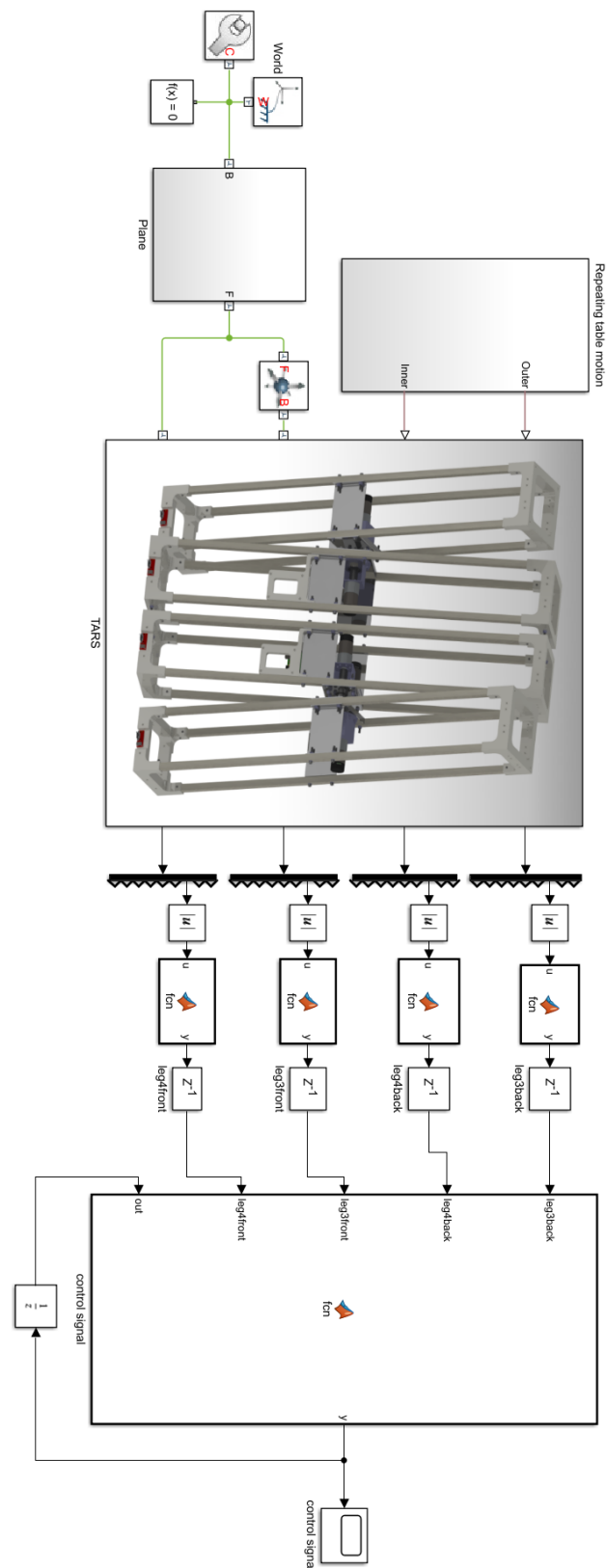
C Reglersystem

C.1 SimMechanics-modell

I denna bilaga visas den mekaniska modellen som gjordes i SimMechanics. I Figur 48 visas TARS-blocket och i Figur 49 visas toppnivån för modellen. Till höger om TARS-blocket i Figur 49 visas utdata som hämtats och använts i Matlabfunktionen control signal. Algoritmen visas senare i Bilaga C.5.



Figur 48: TARS-blocket för den mekaniska modelleringen. Här visas bland annat hur de olika blocken och axlarna är kopplade till varandra och lederna som lagts mellan dem.



Figur 49: Toppnivån för SimMechanics-modellen. På vänstra sidan är roboten ansluten till planet med en led med sex frihetsgrader. Repeating table motion är blocket som förser den öppna styrningen. På höger sida om TARS beräknas styrsignalen.

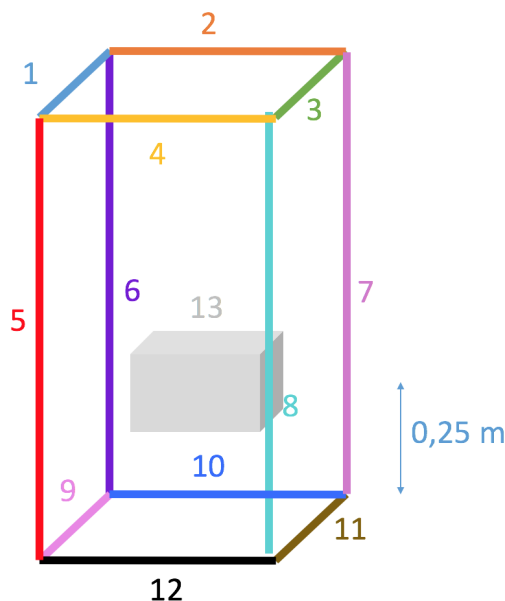
C.2 Värden från den matematiska modellen

Tabell 10: Värden till den matematiska modellen. Motorparametrarna är värden tagna från en annan DC-motor [41]. Vinkelhastigheten är uppskattad.

Definition	Beteckning	Värde	Enhet
Gravitationskraft	g	9,81	N/kg
Uppskattade motorparametrar			
Induktans	L	0,25	mH
Resistans	R	2,4	Ω
Mot-EMK	K_u	0,3078	V/(rad/s)
Strömomvandlingsfaktor	K_m	0,155	Nm/A
Indata från robot			
Massa på block	m	3,34	kg
Längd från marken till TP	f	0,25	m
Längd från TP till centrum av robot	d	0,25	m
Vevslängens längd	b	0,04	m
Tröghetsmoment	I_z	0,74	kgm ²
Vinkelhastighet på vevslängen	ω_0	$\frac{\pi}{1,5} = 2,0944$	rad/s

C.3 Beräkning av tröghetsmoment

Tröghetsmomentet för ett block beräknas för att använda till reglersystemet. För att beräkna tröghetsmomentet delades blocket in i 13 element där tolv element bestod av ramen och elementet 13 bestod av de övriga komponenterna i blocket. Detta element kan ses som en punktmassa, se Figur 50. Element 1-4 och 9-12 är identiska lika med varandra liksom element 5-8. Därför kommer det finnas två olika massor för ramen, en för trästavarna och en för fästet.



Figur 50: Indelning av komponenter för beräkning av tröghetsmoment.

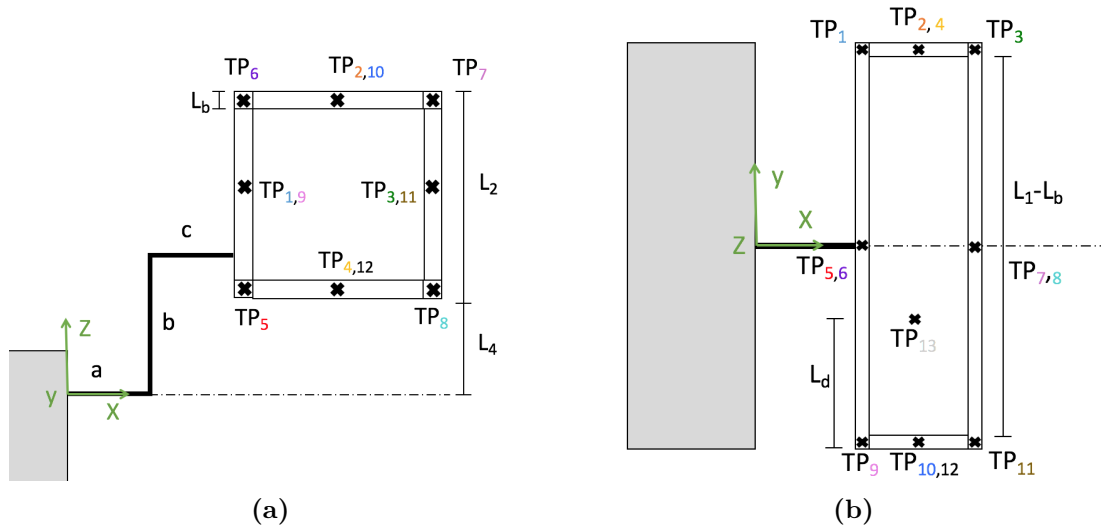
Tröghetsmomentet kan beräknas genom att ta tröghetsmomentet för ett element adderat med massan för det elementet multiplicerat med avståndet från axelns centrum till elementets tyngdpunkt, d , i kvadrat, se Ekvation (66). Tröghetsmomentet för en tunn stav kan beräknas med Ekvation (67). De olika elementens tröghetsmoment kan sedan adderas enligt Ekvation (68).

$$I_z = I + m d^2 \quad (66)$$

$$I = \frac{m L^2}{12} \quad (67)$$

$$I_Z = I_{z1} + \dots + I_{z13} \quad (68)$$

De olika avstånden togs fram med hjälp av Figur 51 som resulterade i Tabell 11.



Figur 51: (a) visar avståndet mellan tyngdpunkten och motoraxeln ovanifrån. Värden för variablerna som visas i figuren kan ses i Tabell 11. (b) visar avståndet mellan tyngdpunkten och motoraxeln från sidan.

Tabell 11: Värden för längder som är relevanta för tröghetsmomentsberäkningen.

Definition	Beteckning	Längd [m]
Längd på axel	a	0,012
Längd på axel	b	0,052
Längd på axel	c	0,012
Avstånd från origo till punktmassa i y-led	L_d	0,25
Längd på element 5-8	L_1	1,0
Längd på element 1-4, 9-12	L_2	0,1
Ramens bredd	L_b	0,015
Halva längden av innerramen ovanifrån	L_3	$\frac{L_2 - L_b}{2} = 0,024$
Avstånd från origo till ytterkant av ramen	L_4	$b - L_3 + L_b = 0,043$

Massan för trästavarna och fästet beräknades genom att volymen och densiteten togs ut, se Ekvation (70)-(72). Densiteten för björk är $\rho_1 = 670 \text{ kg/m}^3$ och för polyaktid $\rho_2 = 1430 \text{ kg/m}^3$ [31], [42]. Massan för punktmassan approximerades till att vara $m_{13} = 2 \text{ kg}$.

$$m_1 = \rho_1 V_1 = \rho_1 L_1 L_b^2 = 0,1687 \text{ kg} \quad (69)$$

$$m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = m_9 = m_{10} = m_{11} = m_{12} \quad (70)$$

$$m_6 = \rho_2 V_2 = \rho_2 L_2 L_b^2 = 0,0322 \text{ kg} \quad (71)$$

$$m_6 = m_7 = m_8 = m_9 \quad (72)$$

Därifrån kunde avstånden från koordinatsystemet till de olika elementen beräknas och sättas in i Ekvation (66) tillsammans med massorna. Detta resulterade i ett totalt tröghetsmoment på 0,74 kgm² som beräknades från Ekvationerna (73)-(81).

$$I_{z1} = \frac{m_1 L_2^2}{12} + m_1 \sqrt{\left(\frac{L_2}{2} + L_4\right)^2 + \left(\frac{L_1 - L_b}{2}\right)^2} \quad (73)$$

$$I_{z2} = \frac{m_2 L_2^2}{12} + m_2 \sqrt{\left(L_2 - \frac{L_b}{2} + L_4\right)^2 + \left(\frac{L_1 - L_b}{2}\right)^2} \quad (74)$$

$$I_{z4} = \frac{m_4 L_2^2}{12} + m_4 \sqrt{\left(L_4 + \frac{L_b}{2}\right)^2 + \left(\frac{L_1 - L_b}{2}\right)^2} \quad (75)$$

$$I_{z5} = \frac{m_5 L_2^2}{12} + m_5 \sqrt{\left(L_4 + \frac{L_b}{2}\right)^2} \quad (76)$$

$$I_{z6} = \frac{m_6 L_2^2}{12} + m_6 \sqrt{\left(L_2 - \frac{L_b}{2} + L_4\right)^2} \quad (77)$$

$$I_{z3} = I_{z1} \quad I_{z7} = I_{z6} \quad I_{z8} = I_{z5} \quad I_{z9} = I_{z1} \quad (78)$$

$$I_{z10} = I_{z2} \quad I_{z11} = I_{z3} \quad I_{z12} = I_{z4} \quad (79)$$

$$I_{z13} = m_1 3 L_d^2 \quad (80)$$

$$\Rightarrow I_Z = 0,74 \text{ kgm}^2 \quad (81)$$

C.4 Friläggning när de inre blocket är i kontakt med marken

När det inre blocket är i kontakt med marken ser friläggningen densamma ut, likaså är ekvationerna för axeln likadana som i Avsnitt 6.2.2. Ekvationerna för blocken är däremot annorlunda. För det yttre blocket beräknades momentet istället i tyngdpunkten, Ekvation (82), och ekvationer i x- och y-led ställdes upp enligt Ekvation (83) och (84).

$$\hat{TP} : I_z \ddot{\theta}_1 = -M_1 - V_1 d \sin(\theta_1) - H_1 d \cos(\theta_1) \quad (82)$$

$$\rightarrow : -H_1 = m \ddot{x}_1 \quad (83)$$

$$\uparrow : V_1 - mg = m \ddot{y}_1 \quad (84)$$

För det inre blocket beräknades momentet i punkten C , se Figur 31. Ekvationen ser då ut enligt (85).

$$\begin{aligned} \hat{C} : I_z \ddot{\theta}_2 = & M_2 - V_2 (f + d) \sin(\theta_2) + \\ & H_2 (f + d) \cos(\theta_2) + mg f \sin(\theta_2) \end{aligned} \quad (85)$$

Accelerationen i punkten $(\bar{x}_1, \bar{y}_1)$ togs fram utgående från ett koordinatsystem in punkten C , som kommer vara fix under hela rörelsen då det inre blocket är i kontakt med marken. Ekvationerna för positionen i punkten $(\bar{x}_2, \bar{y}_2)$ blev då enligt Ekvation (86) och (87).

$$\bar{x}_2 = -(f + d) \sin(\theta_2) - b \cos(\phi) - d \sin(\theta_2) \quad (86)$$

$$\bar{y}_2 = (f + d) \cos(\theta_2) + b \sin(\phi) - d \cos(\theta_1) \quad (87)$$

Därefter deriverades positionen med avseende på tiden två gånger för att få ut accelerationen. Ekvation (27), från Avsnitt 6.2.2, för ϕ utnyttjades vilket resulterade i ekvationerna (88) och (89).

$$\begin{aligned} \ddot{x}_1 = & -(f + d) \ddot{\theta}_2 \cos(\theta_2) + (f + d) \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_1) + \\ & b \omega_0^2 \cos(\omega_0 t) - d \ddot{\theta}_2 \cos(\theta_2) + d \dot{\theta}_2^2 \sin(\theta_2) \end{aligned} \quad (88)$$

$$\begin{aligned} \ddot{y}_1 = & -(f + d) \ddot{\theta}_1 \sin(\theta_1) - (f + d) \dot{\theta}_1^2 \cos(\theta_1) - \\ & b \omega_0^2 \sin(\omega_0 t) + d \ddot{\theta}_2 \sin(\theta_2) + d \dot{\theta}_2^2 \cos(\theta_2) \end{aligned} \quad (89)$$

Genom insättning av Ekvation (83) i (25) och (84) i (26) kunde kontaktkrafterna lösas ut från ekvationssystemet. Se kontaktkrafterna i Ekvation (90) och (91).

$$H_1 = -H_2 = -m\ddot{x}_1 \quad (90)$$

$$V_1 = -V_2 = -m(g + \ddot{y}_1) \quad (91)$$

I ekvationssystemet återstod nu tre ekvationer. För dessa sattes kontaktkrafterna in. De återstående ekvationerna blir då enligt nedan.

$$-M_1 - M_2 - m(g + \ddot{y}_1) b \cos(\phi) - m\ddot{x}_1 b \sin(\phi) = 0 \quad (92)$$

$$I_z \ddot{\theta}_1 = -M_1 - m(g + \ddot{y}_1) d \sin(\theta_1) + m\ddot{x}_1 d \cos(\theta_1) \quad (93)$$

$$I_z \ddot{\theta}_2 = M_2 - m(g + \ddot{y}_1) f \sin(\theta_2) + m\ddot{x}_1 (f + d) \cos(\theta_2) + mg f \sin \theta_2 \quad (94)$$

För vårt system utvecklades ekvationerna (93) och (94) där accelerationen i x- och y-led, Ekvation (88) och (89), sattes in. Ekvationerna blir då enligt (95) och (96).

$$\begin{aligned} & \underbrace{\left(m d (f + d) \left(-\sin(\theta_1) \sin(\theta_2) + \cos(\theta_1) \cos(\theta_2) \right) \right)}_{a_{22}} \ddot{\theta}_1 + \\ & \underbrace{\left(I_z + m (f + d)^2 \left(\sin^2(\theta_2) + \cos^2(\theta_2) \right) \right)}_{a_{24}} \ddot{\theta}_2 = \\ & \underbrace{M_2 + m g f \sin \theta_1 + m (f + d) \sin(\theta_2) \left(g - (f + d) \dot{\theta}_2^2 \cos(\theta_2) - b \omega_0^2 \sin(\omega_0 t) \right.}_{a_{22}} \\ & \left. + d \dot{\theta}_1^2 \cos \theta_1 \right) + m (f + d) \cos(\theta_2) \left((f + d) \dot{\theta}_2^2 \sin \theta_2 + \right. \\ & \left. \underbrace{b \omega_0^2 \cos(\omega_0 t) + d \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_1)}_{b_2} \right) \end{aligned} \quad (95)$$

$$\begin{aligned}
& \underbrace{\left(m d (f + d) \left(\sin(\theta_1) \sin(\theta_2) + \cos(\theta_1) \cos(\theta_2) \right) \right)}_{a_{42}} \ddot{\theta}_1 + \\
& \underbrace{\left(I_z + m d^2 \left(\sin^2(\theta_2) + \cos^2(\theta_2) \right) \right)}_{a_{44}} \ddot{\theta}_2 = \\
& \underbrace{-M_1 - m d \sin(\theta_1) \left(g - (f + d) \dot{\theta}_2^2 \cos(\theta_2) \right)}_{b_4} \\
& \underbrace{-b \omega_0^2 \sin(\omega_0 t) + d \dot{\theta}_1^2 \cos \theta_1}_{b_4} + m d \cos(\theta_1) \left((f + d) \dot{\theta}_2^2 \sin \theta_2 + \right. \\
& \left. b \omega_0^2 \cos(\omega_0 t) - d \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_1) \right) \tag{96}
\end{aligned}$$

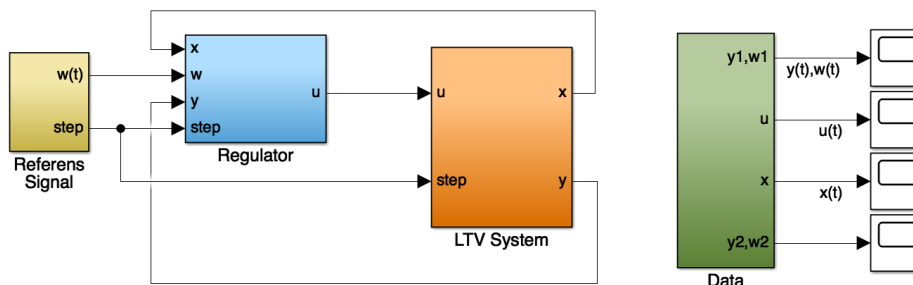
C.5 Algoritmen för styrsignalen

Nedan visas Matlab-scriptet för styrsignalen som skulle behövas för ett återkopplat reglersystem.

```
1 function y = fcn(leg3back,leg4back, leg3front, leg4front, out)
2 if leg4back==1 && leg3back==0
3     y=1;
4 elseif leg3back==1 && leg4front==1
5     y=0;
6 else
7     y=out;
8 end
```

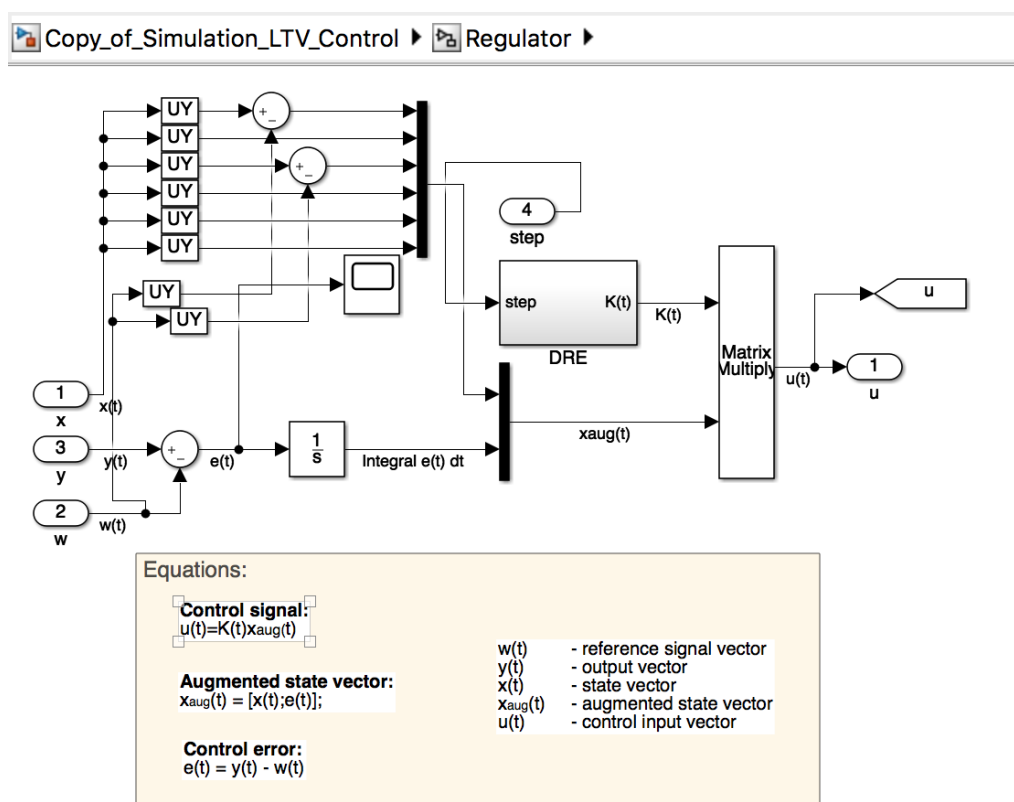
C.6 Simulering av det återkopplade systemet i Simulink

Det återkopplade systemet från Simulink kan se i Figur 52.

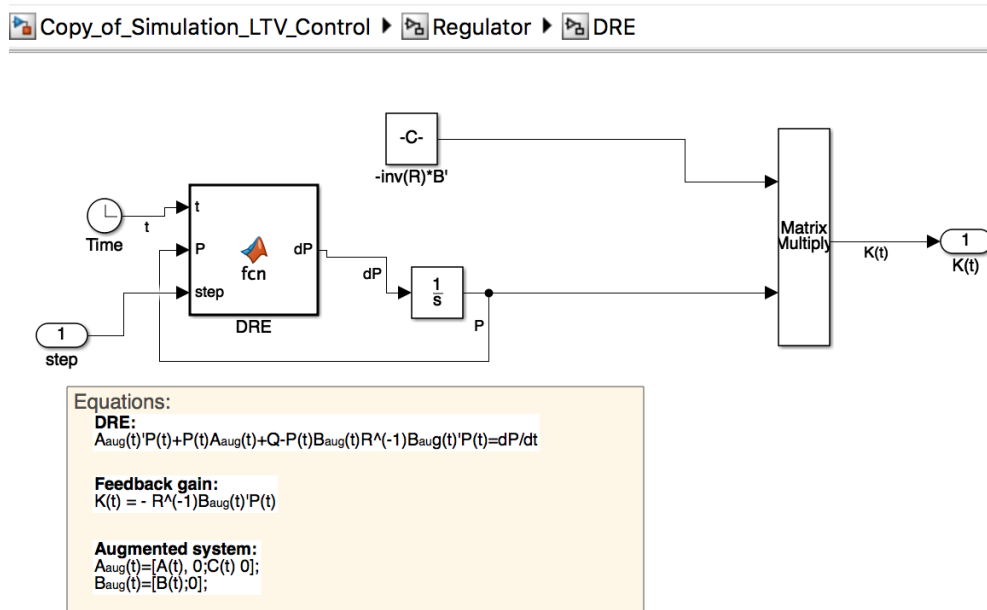


Figur 52: Kontrollsystemet i Simulink med referenssignalen, w och switchen, step. PI-regulatorn samt det tidsvarianta systemet. Från detta kan utsignal, insignal och andra tillstånd avläsas i databoxen.

Till systemet finns en regulator som kan ses i Figur 53. Framtagningen av K -matrisen från den differentia Ricottiekvationen visas i Figur 54.

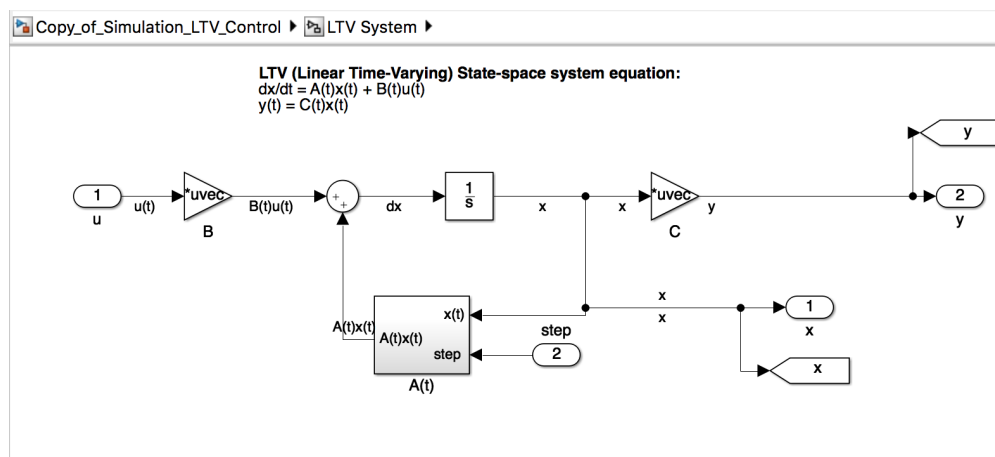


Figur 53: PI-regulatorn för det återkopplade systemet i Simulink.



Figur 54: För att beräkna **K**-matrisen används bland annat den differentiella Ricotti-ekvationen.

När spänningen har fåttts från PI-regulatorn kan utsignalen beräknas vilket kan ses i Figur 55.



Figur 55: När spänningen **u** är framtagen kan utsignalen fås fram.