CHALMERS

Kandidatarbete



Design och konstruktion av sfärisk robot

Inspirerad av Star Wars-droiden *BB-8*

Axel Andersson, Carl Andersson, Gustav Andersson
Jacob Andrén, Jakob Laurell, Fredrik Åvall

Institutionen för Signaler och System
Chalmers tekniska högskola
Göteborg, Sverige, 2017

SSYX02-17-05

Förord

Denna rapport är ett resultat av ett kandidatarbete utfört vid Chalmers Tekniska Högskola vid *Institutionen för Signaler och System*, våren 2017. Projektet utfördes av sex studenter med bakgrund inom Maskinteknik, Automation & Mekatronik, Teknisk Fysik samt Elektroteknik. Projektet baserades kring att återskapa roboten *BB-8* som introducerad i *Star Wars*-filmen *The Force Awakens*.

Projektgruppen vill här passa på att tacka följande för stöd i projektet: Gruppens handledare *Nikolce Murgovski*, Internetforumet *BB-8 Builders Club*, *James Bruton* och *Edward Zarick* som tillåtit gruppen att delge deras arbeten, *Masaki Nagai* som givit inspiration till reglering av roboten, de anställda vid *Prototyplaboratoriet* vid Chalmers Tekniska Högskola, samt föreningen *eXPerimentverkstaden* och det studentdrivna företaget *Chalmers Teknologkonsulter AB* för tillgång till 3D-skrivare.

Vi vill även passa på att tacka vår sponsorer *Colorama i Stenungsund* och *Jotun Sverige* som försett projektet med färg, material och andra kemiska produkter.

På grund av upphovsrättsliga skäl innehåller denna rapport inte några bilder av *Walt Disney Company* eller *Lucasfilm* egna robotar och konstruktioner.

Sammandrag

År 2015 introducerade filmserien *Star Wars* roboten *BB-8*, en robot med kupolformat huvud som tycks sväva ovanpå dess sfäriska kropp. Till skillnad från traditionella drivsystem utmärker sig *BB-8* med sin förmåga att rotera i alla riktningar samt kring sin egen vertikala axel. Utöver detta kan huvudet även rotera och förflyttas över kroppen även vid rörelse.

Projektet som utfördes vid Chalmers Tekniska Högskola syftade till att konstruera en robot som både utseende- och funktionsmässigt i största möjliga mån efterliknade roboten *BB-8*.

Genom framtagning av en fysikalisk modell över robotens dynamik dimensionerades lämpliga motorer för roboten. Utifrån den fysikaliska modellen simulerades även systemet för att utforma ett stabiliserande styrsystem med hjälp av programmet *Simulink*. Dess konstruktion modellerades sedan med hjälp av CAD-programvaran *Autodesk Inventor* tillverkades sedan.

Projektet resulterade i en fysisk robot samt mätdata på hur roboten beter sig med och utan reglersystem. Roboten kunde med hjälp av mobilapplikation styras framåt och bakåt, samt svänga höger och vänster. Vid styrningen kunde dock inte huvudet inkluderas på grund av underdimensionerade motorer och otillräcklig reglering.

I projektet behandlades inte konstruktionens hållfasthet och regleringen av systemet avgränsades till att endast omfatta systemets drivsystem vid framåtdrift. Projektet begränsades även av en budget om 5 000 SEK.

Abstact

In 2015, the film franchise *Star Wars* introduced the droid *BB-8*, a robot consisting of a dome shaped head seemingly floating atop its spherical body. What seperates *BB-8* from traditional mobile robotic systems is the ability to rotate in all directions, as well as around the robot's vertical axis. In excess to this, the head has the ability to rotate and move freely along the surface of the spherical body, even during movement.

The project, which was performed at Chalmers University of Technology aimed to construct a robot which to both appearance and function, resembled the original *BB-8* robot.

Through development of theoretical models covering the dynamics of the robot, the proper motor dimensions was established. In addition to dynamics, the theoretical models could also be used to simulate the control system from which appropriate data could be gathered for designing a suitable controller by using the software *Simulink*. The physical robot was modelled using the CAD software *Autodesk Inventor*, and was later assembled.

The results of the project was a physical robot, as well as data describing the behavior of the robot, including and excluding the controller. The robot could be manouvered both forwards and backwards, and left and right through a developed Android application. During such motions, the head could not be incorperated due to underdimensioned design and insufficient automatic control.

Throughout the project, no regards were taken towards the strength of materials, the controller was limited to forward motion, and the budget was limited to 5 000 SEK.

Innehåll

1 Inledning **1**
1.1 Syfte . . . 2
1.2 Problemformulering . . . 2
1.3 Avgränsningar och begränsningar . . . 2

2 Omvärldsanalys **3**
2.1 Sfäriska fordon och robotar . . . 3
2.2 Officiella versioner av *BB-8* . . . 4
2.3 Inofficiella versioner av *BB-8* . . . 4

3 Konceptval **7**

4 Teoretisk beskrivning av systemet **9**
4.1 Fysikalisk modellering . . . 9
4.1.1 Dynamik för framåtdrift . . . 9
4.1.2 Dynamik för svängning . . . 12
4.2 Dimensionering av motorer . . . 14
4.2.1 Framåtdrivning av konstruktionen . . . 15
4.2.2 Sväng vid frammåtdrift . . . 16
4.2.3 Förflyttning av huvudet längs sfärens yta . . . 16
4.2.4 Rotation av huvud kring vertikalaxeln . . . 17
4.3 Dimensionering av magneter . . . 18

5 Konstruktion av robot **19**
5.1 Val av komponenter till inre struktur . . . 19
5.1.1 Motor för framåtdrift . . . 19
5.1.2 Motor för lutning av pendeln . . . 20
5.1.3 Motorer för lutning av huvud . . . 21
5.1.4 Motor för huvudrotation . . . 21
5.1.5 Mikrokontrollerkort . . . 22
5.1.6 Fjärrstyrning . . . 23
5.1.7 Motorkontroller . . . 23
5.1.8 Sensorer . . . 24
5.1.9 Batteri . . . 24
5.1.10 Magneter för fasthållning av huvud . . . 25
5.2 Mekanisk konstruktion . . . 26
5.2.1 Lösning för framåtdrift . . . 26
5.2.2 Lösning för svängning . . . 27
5.2.3 Lösning för styrning av huvud . . . 28
5.2.4 Huvudinfästning . . . 29

6 Reglering av systemet vid framåtdrift **30**
6.1 Framtagning av reglersystem . . . 30
6.1.1 Val av regulator . . . 32
6.2 Simulering- och verifieringsmetod . . . 32
6.2.1 Simulering . . . 32
6.2.2 Testning . . . 33

7 Resultat **34**
7.1 Slutgiltig konstruktion . . . 34
7.2 Fjärrstyrning . . . 36
7.3 Simulering . . . 37
7.4 Test av robot . . . 37
7.4.1 Test av huvudfunktionalitet . . . 38
7.4.2 Test av framåtdrift . . . 38
7.4.3 Test av svängning . . . 39
7.4.4 Test av stegsvar . . . 40

8 Diskussion **42**
8.1 Stabilitet . . . 42
8.2 Fasthållning av huvud . . . 42
8.3 Framåtdrift . . . 43
8.4 Svängning . . . 43
8.5 Reglering . . . 44
8.6 Simulering . . . 44
8.7 Testmetod . . . 44
8.8 Budgetutfall . . . 45

9 Slutsats **46**

Bilagor **i**

A Kravspecifikation **i**

B Motordimensionering **ii**

C Kretsschema **v**

D Överföringsfunktioner **vi**

E Översikt på simulering **vii**

F Budget **viii**

Nomenklatur

Nedan följer en överblick över de termer som förekommer i rapporten.

a_{max}: Maximal acceleration för sfären

B: Magnetisk flödestäthet

C_{u_R}: Friktionskonstant för rullmotstånd för underlaget

C_{h_R}: Friktionskonstant för rullmotstånd för huvudet

F_s: Centrifugalkraft för sfären

F_p: Centrifugalkraft för pendeln

F_h: Centrifugalkraft för huvudet

F_N: Normalkraft mellan sfären och underlaget

F_f: Friktionskraft mellan sfären och underlaget

F_{acc}: Kraft som krävs för att accelerera sfären

F_{max}: Maximal kraft som kan appliceras på huvudet vid drift

F_{mag}: Kraft som krävs om magnetparet dras isär i riktning med magnetfältet

φ: Lutningsvinkel för huvudpendeln normallinje och sfärens vertikalaxeln

g: Gravitationskonstanten

γ: Lutningsvinkel för pendeln.

h: Magnetens höjd

$I_{sfär}$: Tröghetsmoment för sfären förutsatt homogen massfördelning

I_{huvud}: Huvudets tröghetsmoment kring sfärens centrum

I_{huvud_z}: Tröghetsmoment från huvudet kring vertikalaxeln

i: Ström genom motorn

J_s: Tröghetsmoment för sfären relativt sfärens centrum

J_p: Tröghetsmoment för pendeln relativt sfärens centrum

J_h: Tröghetsmoment för huvudet relativt sfärens centrum

K_s: Kinetisk energi för sfären relativt sfärens centrum

K_p: Kinetisk energi för pendeln relativt sfärens centrum

K_h: Kinetisk energi för huvudet relativt sfärens centrum

K_u: Motorns proportionalitetskonstant för mot-EMK

K_m: Motorns momentkonstant

L: Motorns induktans

m_s: Sfärens totala massa

m_p: Pendelns totala massa

m_h: Huvudets totala massa

m_{tot}: Total massa

μ: Permabilitet

ω_s: Vinkelhastighet för sfären

ω_p: Vinkelhastighet för pendeln

ω_h: Vinkelhastighet för huvudet

Ω: Rotationshastighet kring svängcirkelns mittpunkt

ω_{motor}: Rotationshastighet för motorns för framåtdrift i RPM

ω_{rot}: Vinkelhastighet för huvudrotationen

ω_m: Motorns vinkelhastighet

$\Omega_s(s)$: Laplacetransform av sfärens vinkelhastighet

P_{fram}: Total effekt som krävs vid framåtdrift

P_{rot}: Effekt som krävs för att rotera huvudet

r_s: Sfärens radie

r_p: Avstånd från sfärens centrum till pendelns masscentrum

r_h: Avstånd från sfärens centrum till huvudets masscentrum

r_{huvud}: Huvudets radie

r_{mag}: Magnetens radie

ρ: Svängradie

R: Motorns inre resistans

θ_s: Vinkel för sfären

θ_p: Vinkel för pendeln

θ_h: Vinkel för huvudet

θ: Lutningsvinkel mellan axelns

T_{fram}: Vridmoment som appliceras mellan sfären och pendeln

T_{huvud}: Vridmoment som appliceras mellan sfären och huvudpendeln

τ_g: Vridmoment från friktion mellan sfären och underlaget

τ_h: Vridmoment från friktion mellan sfären och huvudet

$T_{tröghet}$: Vridmoment som krävs för att sätta sfären i rullning

T_{kraft}: Totalt vridmoment som krävs för framåtdrift

$T_{pendellutning}$: Vridmoment för pendellutningen

$T_{lutning}$: Vridmoment för lutning av huvudet

$T_{gravitation}$: Vridmoment från gravitationen vid lutning av huvudet

$T_{huvudlutning}$: Totalt vridmomentet vid lutning av huvudet

T_{rot}: Vridmoment som krävs för att rotera huvudet

T: Vridmoment hos motorn

U_s: Potentiell energi för sfären relativt sfärens centrum

U_p: Potentiell energi för pendeln relativt sfärens centrum

U_h: Potentiell energi för huvudet relativt sfärens centrum

u: Spänning över motorn

v_s: Sfärens fart

v_p: Pendelns fart

v_h: Huvudets fart

v_{max}: Maxhastighet i framåtriktning

x: Avstånd mellan två magneter

1 Inledning

Användning av robotar blir allt mer vanligt förekommande i dagens samhälle. Användningsområdena sträcker sig från militära applikationer till leksaker för barn. Mobila robotar är i samband med detta något som blir än mer aktuellt. Traditionella drivsystem som bygger på hjul eller transportband har många gånger begränsningar i exempelvis förändring av rörelseriktning på ett effektivt sätt. Till följd av detta har ämnet att utforma sfäriska robotar, som är mer fria i sitt rörelsemönster, blivit mer aktuellt samtidigt som forskningen inom området växt sig starkare. Under det senaste årtiondet har ett flertal tekniska rapporter som berör ämnet publicerats, med exempel som *Control System for a Spherical Robot* [1], *Design and control of a spherical mobile robot* [2] och *Position and Attitude Control of a Spherical Rolling Robot Equipped with a Gyro* [3]. Utöver möjligheten att förflytta sig i alla färdriktningar medför den sfäriska konstruktionen låg friktion vilken gör att den kan förflyttas effektivt och energisnålt [1]. En sfärisk robot är dock ofta komplex och betydligt mer bemödande att styra och reglera än ett fordon med mer traditionella drivsystem. Dess roterande kropp innebär även svårigheter i att bibehålla en stationär punkt på fordonet för att fästa kameror eller annan utrustning.

I slutet av 2015 när filmen *Star Wars: Episode VII - The Force Awakens* hade premiär väcktes intresset för sfäriska robotar. I filmen introducerades den nya *astromech-droiden*[1] *BB-8*, en sfärisk robot med ett kupolformat huvud som tycks sväva ovanpå dess sfäriska kropp, se Figur 1. Med sin sfäriska kropp kan *BB-8* rotera i alla riktningar samt kring sin egen vertikala axel. Huvudet kan även rotera och förflyttas över kroppen, samt hållas kvar ovanpå den, även vid rörelse. Bakom dessa till synes enkla rörelser döljer sig imponerande ingenjörskonst. Hur huvudet hålls på plats när kroppen rullar, och vad som driver roboten framåt är två frågor som väckts efter introduktionen av roboten, inte minst för robotfantaster världen över. Denna fascination har gett upphov till ett flertal forum av fantaster som alla strävar efter att återskapa *BB-8* utanför filmduken. En närmare beskrivning av dessa samt andra sfäriska fordon ges i kapitel 2. Bland de mest etablerade är *BB-8 Builders Club* som idag har över 6 500 registrerade användare [5] och över 15 000 medlemmar på andra sociala medier [6].

Genom att bemöta de ingenjörsmässiga utmaningar som konstruerandet av en *BB-8* innefattar kan lärdomar dras inom design och konstruktion av sfäriska robotar som kan tillämpas i andra områden.

[1]En astromech droid är en Star Wars-term som beskriver en servicerobot som allmänt används för underhåll och reparation av rymdskepp och relaterad teknik [4].



Figur 1: Star Wars-roboten *BB-8*, en sfärisk robot med ett huvud som kan förflyttas längs den sfäriska kroppen, oberoende av kroppens rotation. Från [7]. Omarbetad med tillstånd enl. CC BY-SA

1.1 Syfte

Projektet syftade till att konstruera och med hjälp av reglertekniska lösningar kontrollera en robot, som både utseende- och funktionsmässigt i största möjliga mån efterliknade droiden *BB-8* från filmen *The Force Awakens*.

1.2 Problemformulering

Konkret innebar syftet att projektet ämnade att konstruera en robot bestående av två delar, en sfärisk kropp samt ett kupolfomat huvud. Roboten skulle kunna röra sig både framåt och bakåt, samt svänga åt höger och vänster. Huvudet skulle även kunna stanna kvar på sfären när denna rullar utan att falla av.

1.3 Avgränsningar och begränsningar

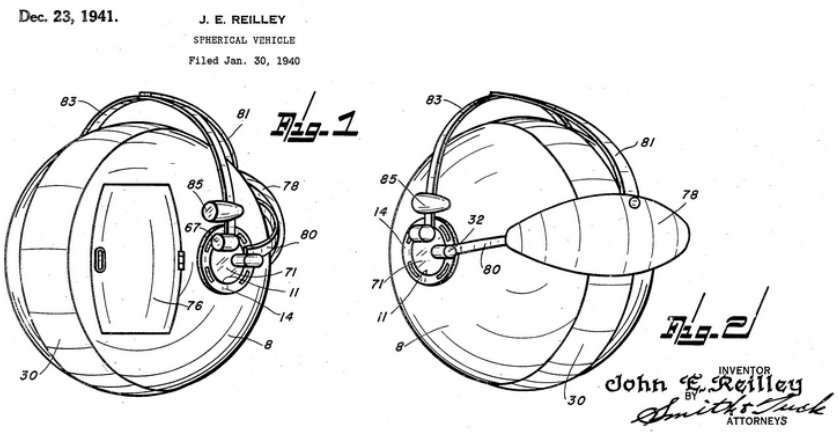
I projektet fanns vissa avgränsande faktorer, som i många fall grundades i begränsningar i tid samt en budget på 5 000 SEK. Inledningsvis bestämdes att konstruktionen inte skulle kunna rotera kring sin vertikala axeln, vilket orginalet av *BB-8* kan. Vidare skulle den reglering som implementerades på konstruktionen endast reglera hastigheten vid framåtdrift. Det förutsattes även att konstruktionen enbart skulle komma att köra på plant underlag. Roboten skulle ej vara autonom. Avslutningsvis skulle inga aspekter gällande hållfasthet vid design av ingående strukturella komponenter undersökas.

2 Omvärldsanalys

Före, under och efter premiären av filmen *The Force Awakens* har det tagits fram otaliga versioner av sfäriska robotar, vissa mer avancerade än andra. För att få en överblick över vilka sfäriska robotar som finns idag, samt lösningar för konstruktion av roboten *BB-8*, undersöks befintliga system nedan.

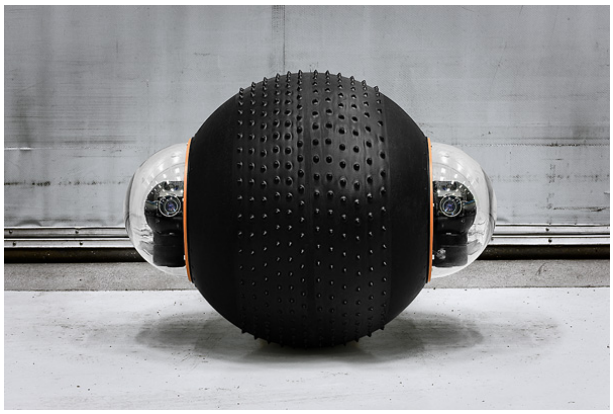
2.1 Sfäriska fordon och robotar

Genom historien har ett flertal olika sfäriska fordon och robotar tagits fram med varierande användningsområden. Redan år 1940 registrerades ett patent av uppfinnaren *John E. Reilley* till amerikanska patentverket [8]. Uppfinningen var tänkt att användas som ett transportfordon som, enligt uppfinnaren, ansågs säkrare än en konventionell bil på grund av dess sfäriska form. I sin patentansökan nämnde också *Reilley* sina tankar kring eventuell vidareutveckling av hans uppfinning där han såg en vinning i dess design för att färdas på både vatten och land samt i svår terräng. Med hjälp av ett drivande hjul som låg an mot sfärens insida väntades fordonet drivas framåt. En svängrörelse föreslogs åstadkommas med hjälp av en vikt i fordonets botten som förflyttades i sidled med hjälp av vajrar sammankopplade med fordonets styranordning. Fordonet presenteras i Figur 2.



Figur 2: *John E. Reilleys* sfäriska fordon. Från [8]. Montage.

2005 patenterade det svenska företaget *Rotundus* en design av en sfärsik robot [9]. I sitt patent beskriver de hur deras lösning tillåter roboten att färdas i varierande terränger som inomhus, utomhus och på andra planeter. Patentet har senare realiserats i en produkt kallad *GroundBot*^{TM} [10] som idag används främst för övervakning av bland annat flygplatser, lagerlokaler samt landsgränser, se Figur 3. Den radiostyrda roboten har i vissa utföranden även inbyggda sensorer för att detektera brand, radioaktivitet och/eller sprängämnen. Dess drivsystem består av en pendel som tillåter en förflyttning av robotens masscentrum, vilket i sin tur leder till att sfären börjar rotera.



Figur 3: *Rotundus GroundBot*^{TM}. Från [11]. Återgiven med tillstånd.

2.2 Officiella versioner av *BB-8*

Under en presentation vid *Star Wars Celebration Europe 2016* deltog *Matt Denton* och *Josh Lee*, skaparna av *Star Wars*-roboten *BB-8*. Där berättade de om hur de hade gjort för att skapa de *BB-8*-robotar som kunde ses i filmen *The Force Awakens*. Under inspelningen så användes ett flertal olika versioner av *BB-8*. I vissa scener användes en fjärrstyrd, frigående robot, men i de flesta fall användes så kallad *puppeteering*[2] för att efterlikna robotens rörelser [12]. Där det inte fanns några rimliga alternativ användes animering för att skapa droiden [13].

Under presentationen nämnde de även hur de konstruerat den robot som kom till att användas under premiären av filmen, den så kallade *Red Carpet BB-8*. Lösningen byggde på en pendel som monterats längs en axel genom sfärens mittpunkt, där diverse motorer användes för att reglera pendelns position, lutning samt huvudets rörelser.

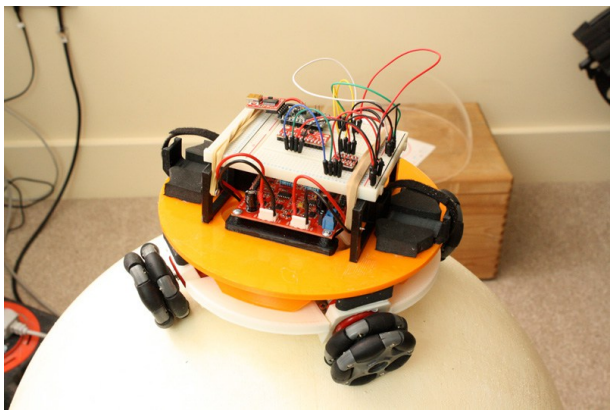
2.3 Inofficiella versioner av *BB-8*

Det finns idag ett större antal fantaster som konstruerat egna versioner av roboten *BB-8* där olika lösningar används för att förflytta roboten. Ett exempel är *James Bruton*, skaparen bakom hemsidan *XRobots.com* [14]. Bruton har tagit fram tre versioner av roboten som bygger på två olika framdrivningssystem, båda skilda från det system som användes vid filmpremiären av *The Force Awakens*.

I sin första version [15] valde *Bruton* att kontrollera sfärens rörelse med hjälp av fyra roterande hjul monterade i robotens huvud, se Figur 4. Hjulen, som är så kallade omnihjul, roterar mot den sfär som utgör kroppen och är konstruerade på ett sådant sätt att de även tillåter rotation vinkelrätt mot hjulets rotationsriktning. Detta möjliggör för huvudet och således även den sfäriska kroppen att drivas i alla rotationsriktningar. Då lösningen endast kräver en relativt liten mekanisk konstruktion kan det vara ett bra alternativ för att återskapa en *BB-8*. Det visade sig dock för *Bruton* att huvudets förmåga att balansera på sfären utan att falla av var låg, samtidigt som roboten fick problem att vara stabil vid rörelse. Det var bland annat på grund av detta som

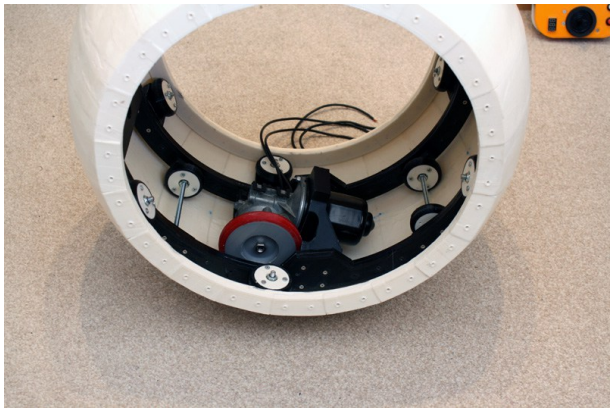
[2]Puppeteering innebär att roboten styrs analogt av exempelvis trådar eller stänger, likt dockteater.

Bruton valde att göra nya versioner av roboten.

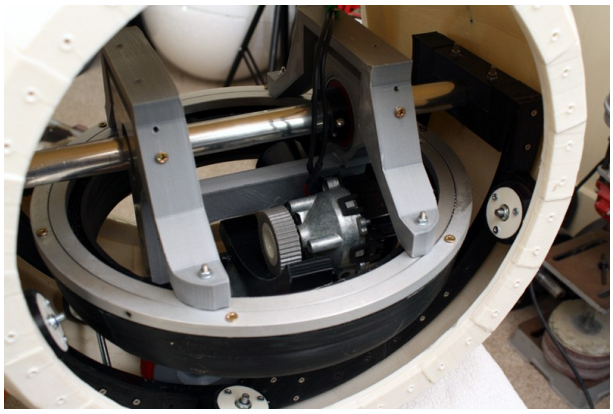


Figur 4: *James Brutons BB-8* version 1 - drivsystem. All elektronik i roboten finns i huvudet, som kan köra i alla riktningar längs den sfäriska kroppen, vilket får denna att rulla. Från [16]. Återgiven med tillstånd.

I version 2 och 3 [17, 18] av sin robot valde *James Bruton* istället att få roboten att röra sig med så kallad *"hamsterhjulsdrivning"*. Drivsystemet har fått sitt namn då det liknar hur en hamster motionerar i ett hamsterhjul, och bygger på en horisontell cylinder som roteras med hjälp av en motor som roterar mot cylinderns insida, se Figur 5. Genom att addera en pendlande massa, se Figur 6, lyckades *Bruton* stabilisera roboten samt få den att svänga likt den *BB-8* som ses i filmerna. Tillägget att rotera den pendlande massan kring vertikalaxeln möjliggjorde även för roboten att kunna vrida sig, och därmed svänga även då roboten stod stilla.

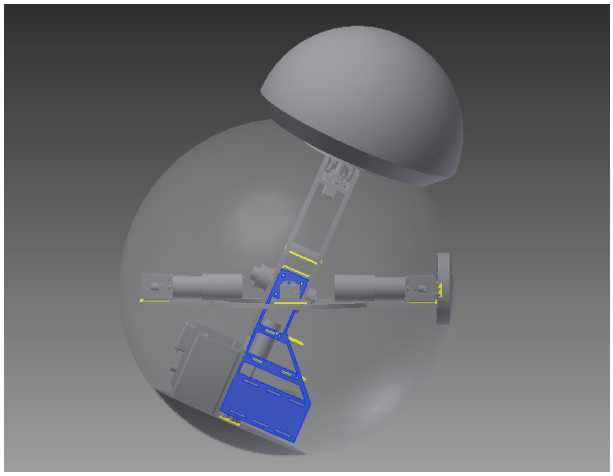


Figur 5: *James Brutons BB-8* version 3 - hamsterhjulsdrivning. Med hjälp av en motor som roterar mot sfärens insida kan kroppen rulla både framåt och bakåt. Från [19]. Återgiven med tillstånd.



Figur 6: *James Brutons BB-8* version 3 - hamsterhjulsdrivning. Genom att lägga till en pendlande massa, som kan lutas i sidled, lutas även kroppen vilket får den att svänga. När den pendlande massan roteras så vrider sig roboten kring vertikalaxeln. Från [20]. Återgiven med tillstånd.

Bland hobbybyggare tycks den mest använda lösningen för att konstruera en *BB-8* vara med hjälp av den så kallade *Ed Z's drive*. Lösningen togs fram av *Edward Zarick* som ligger bakom hemsidan *edsjunk.net* [21]. Konstruktionen, som är en något förenklad version av den tidigare nämnda *Red Carpet BB-8* bygger på en pendellösning med robotens inre konstruktion upphängd i sfärens mitt, se Figur 7. Med hjälp av två elmotorer som finns monterade mot var sida om sfärens insidor, och pendeln som motvikt, kan rotation framåt och bakåt åstadkommas. Systemet tillåter även vinkling av pendeln i sidled vilket resulterar i att roboten kan svänga.



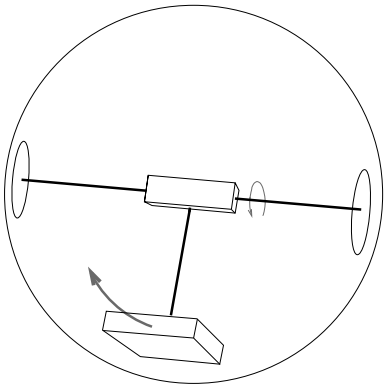
Figur 7: *Ed Z's drive* - pendeldrivning. En motor fästs i vardera sida av sfären och roteras för att få kroppen att rulla framåt och bakåt. Pendelkonstruktionen kan även lutas, vilket får roboten att svänga vid framåtdrift. Från [22]. Återgiven med tillstånd.

3 Konceptval

I projektet definierades inledningvis de krav som skulle komma att ställas på den slutgiltiga konstruktionen. Här innefattades dels funktionsmässiga krav för att uppnå likhet med *BB-8*, men även mer allmänna krav på projektet. Dessa sammanställdes i en kravspecifiktion, se Bilaga A.

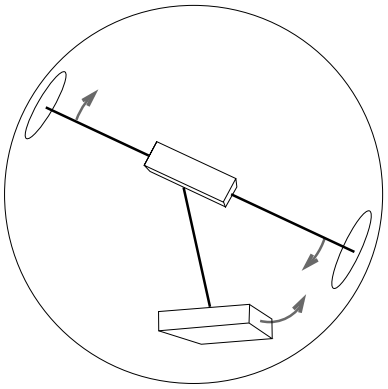
Utifrån kravspecifiktionen genomfördes sedan en konceptgenereing som innefattade ett flertal lösningar på främst följande fem delproblem: rörelse framåt och bakåt (hädanefter benämnt framåtdrift), rörelse i sidled, rotation av huvud, lutning av huvud och fasthållning av huvud. De olika dellösningarna som togs fram reducerades sedan ner med hjälp av bland annat Pugh- och Kesselringmatriser. I slutändan valdes en pendellösning som drivsystem vilket påverkade resterande dellösnignar i systemet.

En pendeldriven sfärisk robot består av en pendel som är fixerad vid en axel som löper horisontellt genom sfärens mittpunkt. Axeln, hädanefter benämnd drivaxeln, sitter i sin tur fast i sfären och kan roteras med hjälp av en eller flera motorer. Då pendeln som består av en vikt roterar, skiftas sfärens tyngdpunkt vilket i sin tur får sfären att rotera. Dessutom kommer motkraften från motorn applicera ett vridmoment på sfären, utöver det vridmoment som kommer från pendelns förskjutna tyngdpunkt. Värt att notera är att pendeln roterar i motsatt riktning jämfört med sfären. Principen presenteras nedan i Figur 8 samt i avsnitt 4.1.1.



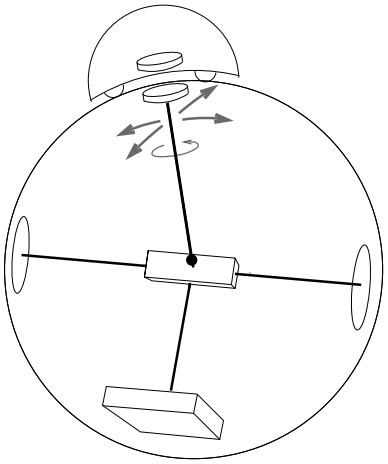
Figur 8: Illustration över rörelse framåt och bakåt med hjälp av pendel. Pendeln förflyttar sfärens tyngdpunkt vilket får sfären att rotera.

För att möjliggöra för roboten att svänga kan pendeln förflyttas i sidled. Detta förflyttar sfärens horisontella tyngdpunkt vilket i sin tur leder till att sfären svänger i en krökt bana. En fysikalisk beskrivning av detta finns under avsnitt 4.1.2 samt illustreras i Figur 9.



Figur 9: Illustration över rörelse i sidled med hjälp av en pendel. Förflyttning av sfärens horisontella tyngdpunkt är en förutsättninga för svängning.

För att hålla fast det huvud som *BB-8* delvis utgörs av valdes en magnetinfästning där magneter monteras inuti sfären samt i huvudets botten. Rotation samt lutning av huvudet beslutades åstadkommas med en centrumkonstruktion som möjliggör fri rotation i alla led, se Figur 10. Denna konstruktion kan sedan ställas till önskat läge med hjälp av elmotorer. Huvudet kan enkelt förflyttas längs sfärens yta genom att fästa kulrullar på dess undersida för att minimera friktionen.



Figur 10: Illustration över huvudets infästning. Magneter inuti sfären och i huvudet gör att huvudet inte faller av vid rörelse.

4 Teoretisk beskrivning av systemet

I följande kapitel presenteras dynamiken för den sfäriska konstruktionen gällande framåtdrift och svängning. Teorin ligger till grund för validering av det koncept som valts och ekvationerna kommer senare användas för dimensioneringen av motorer samt utformning av reglersystem. Här beskrivs även de approximationer och antaganden som ligger till grund för beräkningarna på systemets motorer.

4.1 Fysikalisk modellering

I detta avsnitt presenteras den matematiska modell av konstruktionen som sedan står till grund för regleringen av systemet. Målet är framtagning av ekvationer som beskriver de olika vridmomenten som krävs för att förändra systemets rörelse, samt hur roboten beter sig vid svängning.

4.1.1 Dynamik för framåtdrift

För att beräkna de vridmoment som uppstår i systemet vid framåtdrift, vilket är avgörande för reglering av systemet, används *Lagranges* rörelseekvationer. Detta eftersom det kan anses fördelaktigt vid beräkningar i generaliserade koordinater.

Vid framtagning av *Lagranges* rörelseekvationer måste systemet potentiella och kinetiska energi ställas upp. Dessa betecknas U_i respektive K_i, där indexet $i = \{s, p, h\}$ betecknar de tre delsystemen - sfären, pendeln och huvudpendeln. På samma sätt betecknas systemets massor, tröghetsmoment kring sfärens mittpunkt, samt vinklar med m_i, J_i respektive θ_i. Parametrarna r_i betecknar avståndet mellan respektive systems tyngpunkt och sfärens mittpunkt, där det bör observeras att r_s är sfärens radie.

Utifrån Figur 11 kan vardera delsystems potentiella energi, med referensnivå vid sfärens centrum, tecknas som

$$U_s = 0 \tag{4.1}$$

$$U_p = -m_p g r_p \cos(\theta_s + \theta_p) \tag{4.2}$$

$$U_h = m_h g r_h \cos(\theta_s + \theta_p + \theta_h) \tag{4.3}$$

där g är tyngdaccelerationen.

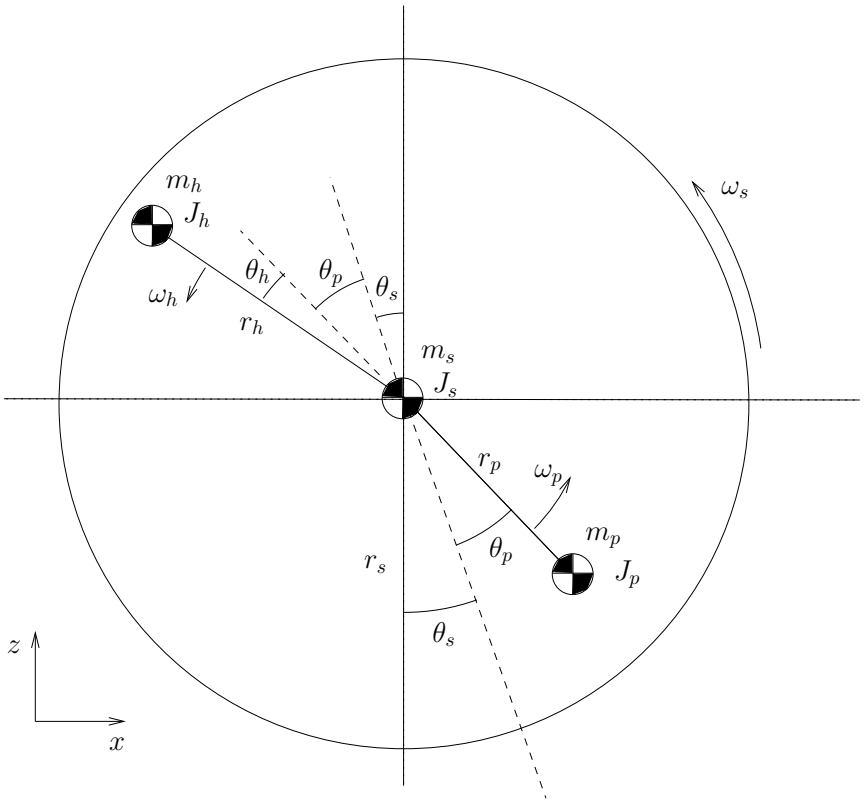
Uttrycket för den kinetiska energin består dels av en term för rörelseenergin och dels en term för rotationsenergin enligt

$$K = \frac{1}{2} m v^2 + \frac{1}{2} I \omega^2$$

där v är hastigheten, I är tröghetsmomentet kring rotationsaxeln och ω är vinkelhastigheten.

Sfärens hastighet som funktion av dess vinkelhastighet kan tecknas som

$$v_s = r_s \omega_s$$



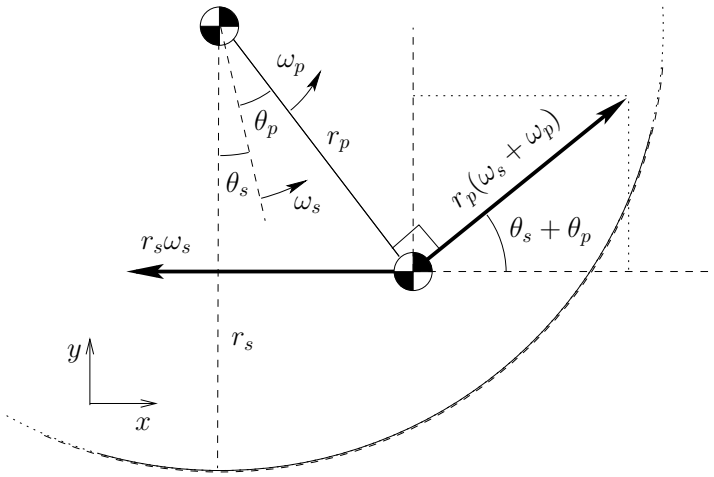
Figur 11: Den modell som används för att beskriva systemet vid framåtdrift.

Motsvarande uttryck för pendeln blir något mer komplicerat eftersom den dels rör sig med sfären med hastigheten v_s, dels har en egen tangentiell hastighet till följd av vinkelhastigheterna ω_s och ω_p, se Figur 12. Detta gör att motsvarande uttryck för pendelns hastighet i kvadrat kan skrivas som

$$v_p^2 = \big(r_s\omega_s - r_p\cos(\theta_s+\theta_p)(\omega_s+\omega_p)\big)^2 + \big(r_p\sin(\theta_s+\theta_p)(\omega_s+\omega_p)\big)^2.$$

På motsvarande sätt som för pendeln kan kvadraten av hastigheten för huvudpendeln beräknas som

$$v_h^2 = \big(r_s\omega_s + r_h\cos(\theta_s+\theta_p+\theta_h)(\omega_s+\omega_p+\omega_h)\big)^2 + \big(r_h\sin(\theta_s+\theta_p+\theta_h)(\omega_s+\omega_p+\omega_h)\big)^2.$$



Figur 12: Vektorn i negativ x-led beskriver hastigheten som uppstår till följd av sfärens rullning. Vektorn i pendelns tangentriktning beskriver hastigheten som uppstår till följd av pendelns rotationshastighet.

Det bör observeras att tecknet på termen med cosinus är omvänt eftersom huvudet är förskjutet 180° jämfört med pendeln, vilket i sin tur gör att cosinustermen byter tecken. Tillsammans med termerna för rotationsenergi, där respektive delsystems vinkelhastighet blir ω_s, $\omega_s+\omega_p$ samt $\omega_s+\omega_p+\omega_h$, fås vardera delsystems kinetiska energi nu som

$$K_s = \frac{1}{2}m_s(r_s\omega_s)^2 + \frac{1}{2}J_s\omega_s^2 \tag{4.4}$$

$$\begin{aligned} K_p = \frac{1}{2}m_p\Big[&\big(r_s\omega_s - r_p\cos(\theta_s+\theta_p)(\omega_s+\omega_p)\big)^2 + \\ &+ \big(r_p\sin(\theta_s+\theta_p)(\omega_s+\omega_p)\big)^2\Big] + \frac{1}{2}J_p(\omega_s+\omega_p)^2 \end{aligned} \tag{4.5}$$

$$\begin{aligned} K_h = \frac{1}{2}m_h\Big[&\big(r_S\omega_s + r_h\cos(\theta_s+\theta_p+\theta_h)(\omega_s+\omega_p+\omega_h)\big)^2 + \\ &+ \big(r_h\sin(\theta_s+\theta_p+\theta_h)(\omega_s+\omega_p+\omega_h)\big)^2\Big] + \frac{1}{2}J_h(\omega_s+\omega_p+\omega_h)^2 \end{aligned} \tag{4.6}$$

Utifrån de uppställda uttrycken för potentiell energi, enligt ekvationerna (4.1) - (4.3), samt ekvationerna (4.4) - (4.6) för kinetisk energi, kan Lagrangianen för hela systemet nu tecknas som

$$L = \sum_{i=s,p,h} K_i - U_i \tag{4.7}$$

Med hjälp av ovanstående ekvation kan *Lagranges* rörelseekvationer som beskriver systemet tecknas enligt

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \omega_s}\right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_s} = -T_{fram} + \tau_u + \tau_h \tag{4.8}$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \omega_p}\right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_p} = T_{fram} \tag{4.9}$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \omega_h}\right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_h} = T_{huvud} - \tau_h \tag{4.10}$$

där t är tiden, T_{fram} är vridmomentet som appliceras mellan sfären och pendeln, T_{huvud} är

vridmomentet som appliceras mellan sfären och huvudpendeln. Parametern τ_u är vridmomentet från friktion mellan sfären och underlaget, där index u betecknar underlag och τ_h är friktionen mellan sfären och huvudet, där index h betecknar huvud. Då huvudet väntas vara fixerat vid drift av systemet förenklas ekvationerna genom antagandet att θ_h är konstant. Insättning av uttrycket för L enligt ekvation (4.7) i ekvation (4.8), (4.9) och (4.10) ger nu att systemet beskrivs av rörelseekvationerna

$$\begin{aligned} -T_{fram} + \tau = & -gm_h r_h \sin(\theta_h + \theta_p + \theta_s) + \\ & + r_s\big[m_p r_p \sin(\theta_p + \theta_s) - m_h r_h \sin(\theta_h + \theta_p + \theta_s)\big](\omega_p + \omega_s)^2 + \\ & + \big[J_h + J_p + m_h r_h^2 + m_p r_p^2 - m_p r_p r_s \cos(\theta_p + \theta_s) \\ & + m_h r_h r_s \cos(\theta_h + \theta_p + \theta_s)\big]\dot{\omega}_p + \\ & + \big[J_h + J_p + J_s + m_h r_h^2 + m_p r_p^2 + m_h r_s^2 + m_p r_s^2 + m_s r_s^2 + \\ & - 2m_p r_p r_s \cos(\theta_p + \theta_s) + 2m_h r_h r_s \cos(\theta_h + \theta_p + \theta_s)\big]\dot{\omega}_s \end{aligned} \tag{4.11}$$

$$\begin{aligned} T_{fram} = & -gm_h r_h \sin(\theta_h + \theta_p + \theta_s) + \big[J_h + J_p + m_h r_h^2 + m_p r_p^2\big]\dot{\omega}_p + \\ & + \big[J_h + J_p + m_h r_h^2 + m_p r_p^2 - m_p r_p r_s \cos(\theta_p + \theta_s) \\ & + m_h r_h r_s \cos(\theta_s + \theta_p + \theta_h)\big]\dot{\omega}_s \end{aligned} \tag{4.12}$$

$$T_{huvud} - \tau_h = m_h r_h sin(\theta_h + \theta_p + \theta_s)\big(-g + r_s\omega_s(\omega_p + \omega_s)\big) \tag{4.13}$$

där τ används för att beteckna summan $\tau_u + \tau_h$. Dessa beskrivs enligt

$$\tau_u = C_{u_R} r_s^2 \omega_s \tag{4.14}$$

$$\tau_h = C_{h_R} r_s^2 \omega_s \tag{4.15}$$

där C_{u_R} och C_{u_h} betecknar friktionskonstant för rullmotstånd för underlaget respektive huvudet.

Robotens förväntade hastighet gör att luftmotsåndet väljs att försummas. De konstanta statiska och kinematiska krafter som påverkar roboten försummas då dessa kan anses små jämfört med rullmotståndet. Detta som följd av robotens sfäriska form.

4.1.2 Dynamik för svängning

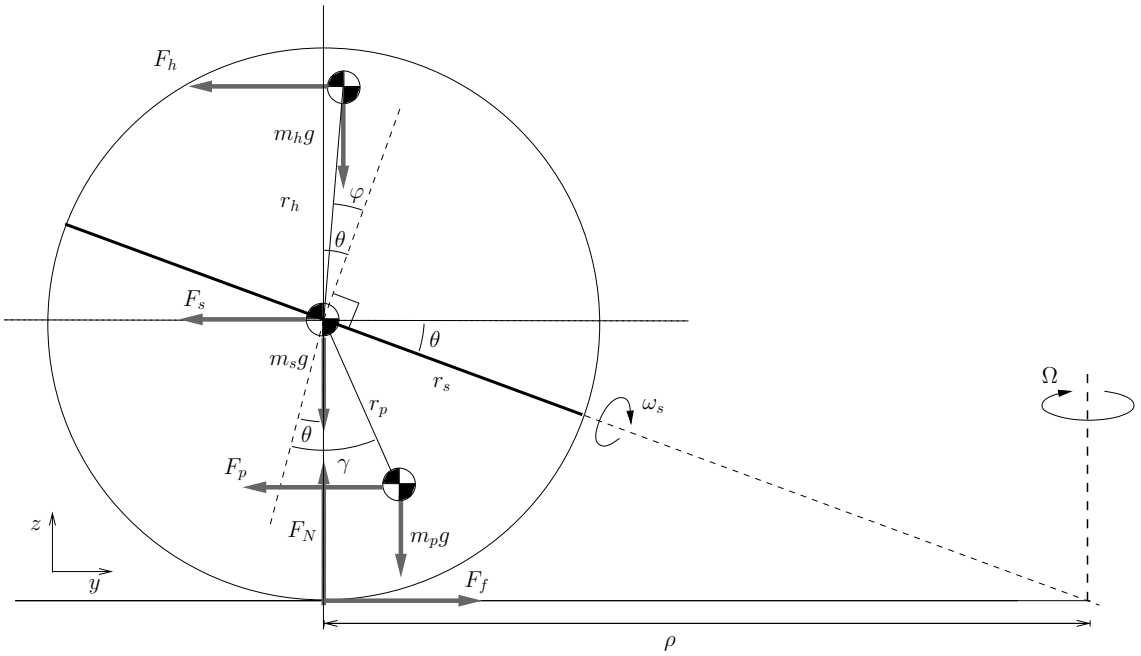
Enligt kravspecifikationen, se Bilaga A, ska den färdiga roboten förutom att rulla framåt och bakåt även kunna svänga. Följande avsnitt beskriver dynamiken för svängning, där ekvationer sätts upp för att beskriva hur robotens svängning beror av de dynamiskt varierande parametrarna i systemet.

Genom att vinkla drivaxeln färdas konstruktionen i en cirkulär bana. Mittpunkten för den cirkulära banan ges av skärningen mellan drivaxeln och underlaget, se Figur 13. Observera att koordinatsystemet är roterat 90 grader jämfört med tidigare figurer. Genom att införa beteckningen θ för drivaxelns lutning fås således att svängradien ρ ges av det geometriska sambandet

$$\tan\theta = \frac{r_s}{\rho} \tag{4.16}$$

där beteckning r_s används för sfärens radie i analogi med avsnitt 4.1.1.

För att luta drivaxeln kan både pendeln och huvudpendeln vinklas i sidled vilket förflyttar tyngdpunkten för systemet. Lutningsvinklarna för pendeln respektive huvudpendeln betecknas med γ respektive φ. Notera att dessa vinklar är angivna relativt drivaxelns lutning θ. Lutningsvinklarna för pendeln relativt vertikalaxeln samt huvudpendeln relativt vertikalaxeln blir istället $\gamma - \theta$ respektive $\theta - \phi$ enligt Figur 13.



Figur 13: Den fysikaliska modell som används för att beskriva systemet vid svängning.

Idealt skulle lutningen för drivaxeln kunna beräknas enbart utifrån tyngdpunktens placering, men till följd av centrifugalkraften och den gyroskopiska effekten blir så inte fallet. I kommande beräkningar har dock den gyroskopiska effekten försummats i syfte att förenkla beräkningarna eftersom den är relativt liten för små hastigheter. Det har även tidigare visats att den har relativt liten påverkan på liknande system [1].

På samma sätt som tidigare betecknas massan, avståndet till sfärens centrum och vinkelhastigheten för de olika delsystemen med m_i, r_i och ω_i för $i = \{s, p, h\}$. I Figur 13 är dessutom de relevanta krafterna som verkar på systemet markerade med pilar. För att beteckna centrifugalkraften på respektive delsystem används beteckningen F_i med indexet $i = \{s, p, h\}$; observera att F_N respektive F_f svarar mot normalkraften mellan sfären och underlaget respektive friktionskraften i samma punkt.

Beloppet på sfärens hastighet längs cirkelbanan kan dels tecknas som

$$v = \omega_s r_s \cos\theta \tag{4.17}$$

dels

$$v = \Omega\rho \tag{4.18}$$

I ekvation (4.17) är $r_s \cos\theta$ det vinkelräta avståndet mellan drivaxeln och kontaktpunkten med underlaget. Genom att sätta ekvation (4.17) och (4.18) lika kan ett uttryck för rotationshastigheten Ω kring svängradien mittpunkt formuleras. Med hjälp av ekvation (4.16) erhålles ett uttryck

som beror av drivaxelns rotationshastigheten enligt

$$\Omega = \frac{\omega_s r_s \cos\theta}{\rho} = \frac{\omega_s r_s \cos\theta \tan\theta}{r_s} = \omega_s \sin\theta \tag{4.19}$$

Det gäller att centrifugalkraften beräknas enligt formlen

$$F = m\omega^2 r_\perp$$

där m betecknar massan, ω vinkelhastigheten och $r_\perp$ är det ortogonala avståndet. För sfären, pendeln och huvudet blir motsvarande centrifugalkrafter

$$F_s = m_s \rho \Omega^2 \tag{4.20}$$
$$F_p = m_p(\rho - r_p \sin(\gamma - \theta))\Omega^2 \tag{4.21}$$
$$F_h = m_h \rho \Omega^2 \tag{4.22}$$

Utifrån dessa uttryck kan kraftjämvikten för systemet i horisontell rikting ställas upp enligt

$$F_f = F_s + F_p + F_h \tag{4.23}$$

Dessutom kan momentjämvikten kring sfärens centrum ställas upp enligt

$$F_f r_s + F_h r_h = F_p r_p \cos(\gamma - \theta) + m_p g r_p \sin(\gamma - \theta) + m_h g r_h \sin(\theta - \varphi) \tag{4.24}$$

Eftersom de ingående vinklarna, och i synnerhet differens mellan dessa, antas vara små används Taylorapproximationerna

$$\cos(\gamma - \theta) \approx 1$$
$$\sin(\gamma - \theta) \approx \gamma - \theta$$
$$\sin(\theta - \varphi) \approx \theta - \varphi$$
$$\sin\theta \approx \theta$$

för de trigonometriska funktionerna. Med hjälp av detta och användning av uttrycket för Ω enligt ekvation (4.19) kan ett uttryck för svängradien ρ erhållas genom insättning av ekvation (4.20) − (4.23) i momentjämvikten (4.24). Om högre ordningens termer stryks kan uttrycket förenklas till

$$\rho = \frac{g(m_p r_p r_s - m_h r_h r_s) + [m_s r_s + m_p(r_s - r_p) + m_h(r_h + r_s)](r_s \omega_s)^2}{3g(m_p r_p \gamma - m_h r_h \varphi)} \tag{4.25}$$

4.2 Dimensionering av motorer

Nedan presenteras de beräkningar som ligger till grund för dimensioneringen av systemets motorer. Under varje rubrik beskrivs de förenklingar och approximationer som använts för respektive motor. MATLAB-skriptet som användes till beräkningar återfinns i Bilaga B.

4.2.1 Framåtdrivning av konstruktionen

För att förenkla beräkningarna används approximationen att accelerationen avtar linjärt. Detta är inte en korrekt beskrivning av verkligheten men bedöms vara tillräckligt bra för dimensioner av motorer. Approximationen ger att vinkelaccelerationen ($\dot{\omega}_s$) beskrivs av ekvationen

$$\dot{\omega}_s = a_0 + a_1 t$$

där t betecknar tiden ifrån att accelerationen börjar. Integrering av detta uttryck ger att vinkelhastigheten som funktion av tiden allmänt kan beskrivas enligt ekvationen

$$\omega_s = a_0 t + \frac{a_1 t^2}{2}$$

Genom att specificera konstruktionens topphastighet och accelerationstid kan således konstanterna a_0 och a_1 bestämmas genom kännedom av sfärens radie r_s.

Motorn dimensioneras efter att den ska klara av att övervinna sfärens tröghetsmoment samtidigt som den ska ge en tillräckligt stor kraft för att ge kroppen den önskade accelerationen. Under antagandet att sfären kan betraktas som ett homogent sfäriskt skal kan dess tröghetsmoment beräknas enligt formeln

$$I_{sfär} = \frac{2}{3} m_s r_s^2$$

där r_s och m_s är sfärens radie respektive massa. Utifrån tröghetsmomentet kan det vridmoment som krävs beräknas med ekvationen

$$T_{tröghet}(t) = I_{sfär}\dot{\omega}_s(t). \tag{4.26}$$

För den accelererande kraften utgår beräkningarna ifrån *Newtons* andra lag som säger att

$$F_{acc}(t) = m_{tot}\dot{\omega}_s(t) r_s$$

där m_{tot} är den totala massan för systemet och $\dot{\omega}_s$ är vinkelaccelerationen. Denna kraft kommer att verka i kontaktpunkten med underlag. Om tyngdpunkten för hela konstruktionen antas ligga i sfärens centrum ger detta att vridmomentet som kraften orsakar uttrycket

$$T_{kraft}(t) = F_{acc}(t) r_s \tag{4.27}$$

Det totala vridmomentet som krävs uttrycks alltså av summan av (4.26) och (4.27), och ger formuleringen

$$T_{fram}(t) = \frac{1}{0,7}\left[T_{tröghet}(t) + T_{kraft}(t)\right] \tag{4.28}$$

där divisionen med faktorn 0,7 används för att ta hänsyn till förlusterna i systemet.

När vridmomentet är känt kan motsvarande effekt beräknas utifrån formel

$$P_{fram}(t) = T_{fram}(t)\omega_s(t) \tag{4.29}$$

Utöver kraven på vridmoment och effekt måste även motorns rotationshastighet vara hög nog för att kunna ge sfären önskad topphastighet. Denna rotationshastighet ω_{motor}, som anges i RPM, beräknas utifrån sambandet

$$\omega_{motor} = \frac{1}{0,7}\frac{v_{max}60}{2\pi r_s} \tag{4.30}$$

där v_{max} är maxhastigheten i framåtriktning och faktorn $60/2\pi$ används för att omvandla ifrån radianer per sekund till varv per minut. Dessutom divideras uttrycket med 0,7 eftersom motorns arbetspunkt normalt ligger vid 70% av dess maxhastighet.

4.2.2 Sväng vid frammåtdrift

För att konstruktionen ska kunna svänga vid framåtdrift lutas pendeln i sidled. I en förenklad modell kan därmed motorn dimensioneras efter att den ska klara av att lyfta pendeln ett visst antal grader relativt vertikalaxeln. Denna vinkel blir mindre än pendelns totala utslagsvinkel eftersom sfären också kommer luta när pendeln gör det. I det här fallet är vridmomentet som uppstår till följd av tröghetsmomentet hos pendeln försumbart litet jämfört med vridmomentet ifrån tyngdkraften. Detta ger att vridmomentet som motorn behöver klara av ges av

$$T_{pendellutning} = \frac{1}{0,7} g m_p r_p \sin(\theta - \gamma) \tag{4.31}$$

där g är tyngdaccelerationen, m_p är pendelns massa, r_p är pendelns längd och $\theta - \gamma$ betecknar pendelns vinkel relativt vertikalaxeln i enighet med tidigare notation, se Figur 13. Divisionen med 0,7 används för att ta hänsyn till förlusterna i systemet.

4.2.3 Förflyttning av huvudet längs sfärens yta

För att luta huvudet längs sfärens yta används två motorer eftersom rörelsen är tvådimensionell. Dessa dimensioneras dock på samma sätt eftersom lasten de utsätts för är i princip likadan. Det totala momentet som krävs består av två delar, en ifrån tröghetsmomentet hos huvudkonstruktionen och en ifrån gravitationens påverkan när huvudet befinner sig i ett lutat tillstånd.

För enkelhets skull betraktas huvudet som en homogen halvsfär vilket ger att dess tröghetsmoment kring sfärens centrum ges av

$$I_{huvud} = \left(r_s^2 + \frac{3{r_{huvud}}^2}{8}\right) m_h$$

där m_h är huvudets massa och r_{huvud} dess radie. Observera att r_{huvud} inte är densamma som tidigare benämnda r_h som är avstånden mellan sfärens centrum och tyngdpunkten för huvudets delsystem. Eftersom rotationen sker kring sfärens centrum, formuleras en term med r_s för att förflytta tröghetsmomentet enligt Steiners sats. Observera att m_h är den totala massan för huvudets delsystem. Med detta tröghetsmoment kan vridmomentet till följd av trögheten beräknas som

$$T_{lutning}(t) = I_{huvud}\ddot{\varphi}(t)$$

där $\ddot{\varphi}(t)$ är huvudets vinkelacceleration som funktion av tiden. På samma sätt som tidigare antas denna avta linjärt med koefficienter som bestäms av maxhastigheten för huvudet och tiden det tar att nå denna hastighet.

Utöver vridmomentet som uppstår till följd av tröghetsmomentet bidrar även gravitationen med ett vridmoment, se Figur 14. Detta vridmoment kan beräknas som

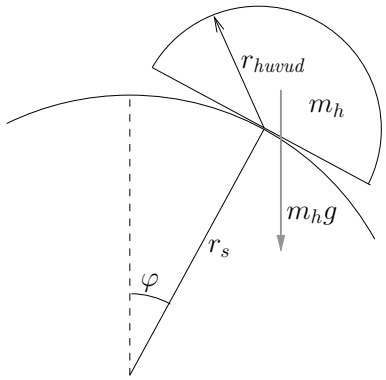
$$T_{gravitation} = m_h g \left(r_s + \frac{3 r_{huvud}}{8} \right) \sin \varphi$$

där g är gravitationen och faktorn 3/8 kommer av tyngpunktens läge för en halvsfär. Här används det maximala värdet på vinkeln φ eftersom detta ger störst vridmoment.

Det totala vridmomentet blir alltså

$$T_{huvudlutning}(t) = \frac{1}{0,7}(T_{lutning}(t) + T_{gravitation}) \tag{4.32}$$

där division med faktorn 0,7 återigen används för att ta hänsyn till förlusterna i systemet.



Figur 14: Förenklad modell som ligger till grund för dimensioneringen av motorerna som används för att luta huvudet.

4.2.4 Rotation av huvud kring vertikalaxeln

Motorn som roterar huvudet dimensioneras efter att den ska klara av tröghetsmomentet för huvudet kring vertikalaxeln. För enkelhets skull har friktionen mellan huvudet och sfären försummats. Analogt med tidigare beräkningar på huvudet antas det ha geometrin av en halvsfär med homogen massfördelning vilket ger tröghetsmomentet

$$I_{huvud_z} = \frac{2}{5} m_h r_{huvud}^2$$

kring vertikalaxeln. Observera att detta inte är samma tröghetsmoment som tidigare eftersom rörelsen sker kring en annan axel.

På samma sätt som för frammåtdriften antas accelerationen för rotationsrörelsen avta linjärt enligt

$$\dot{\omega}_{rot} = c_0 + c_1 t$$

vilket ger att vinkelhastigheten ges av

$$\omega_{rot} = c_0 t + \frac{c_1}{2} t^2$$

där konstanterna c_0 och c_1 bestäms utifrån önskat toppvärde för vinkelhastighetn och tiden det tar att nå detta värde.

Det vridmoment som krävs för att rotera huvudet kan nu beräknas som

$$T_{rot}(t) = \frac{1}{0,7} I_{huvud_z} \dot{\omega}_{rot} \tag{4.33}$$

där faktorn 0,7 återigen används för att ta hänsyn till förlusterna i systemet. Motsvarande effekt som funktion av tiden ges av

$$P_{rot}(t) = T_{rot}(t)\omega_{rot} \tag{4.34}$$

4.3 Dimensionering av magneter

För att hålla huvudet på plats ovanpå sfären används magneter som dels fästs inuti sfären och dels i huvudet. De krafter som verkar på huvudet är gravitationskraft samt horisontell accelerationskraft från sfärens rörelser. Huvudets lutningsvinkel antas vara konstant.

Mellan sfären och huvudet används kulrullar för att minimera friktionen. Därav försummas friktionskraften mellan sfären och huvudet i beräkningarna. Den maximala kraften som kan appliceras på huvudet vid drift blir då

$$F_{max} = m_h g \sin(\varphi) + m_h a_{max} \tag{4.35}$$

där a_{max} är den maximala accelerationen för sfären.

Kraften som beräknas ovan ska tas upp av magneterna. Under antagandet att cylindriska magneter används kan kraften mellan två magneter som funktion av avståndet bestämmas som

$$F_{mag} = \frac{\pi B}{4\mu} r_{mag}^4 \left[\frac{1}{x^2} + \frac{1}{(x+2h)^2} - \frac{2}{(x+h)^2} \right] \tag{4.36}$$

där μ är permabiliteten för materialet mellan magneterna, B magnetisk flödestäthet, r_{mag} samt h magnetens radie respektive höjd, och x är avståndet mellan de två magneterna [23]. Denna formel gäller dock för kraften som krävs om magneterna dras isär i riktning med magnetfältet mellan dem. Eftersom kraften F_{max} i detta fall verkar i sidled antas magneterna behöva vara 5 gånger så starka för att kompensera för detta.

5 Konstruktion av robot

Utifrån det koncept som valdes under konceptgenereringen, samt utifrån dimensioneringen av motorerna i avsnitt 4.2, påbörjas utformningen av den konstruktion som skulle utgöra robotens inre struktur. Med inre struktur avses mekaniken och de komponenter som styr roboten inifrån sfären.

I detta kapitel beskrivs först de ingående komponenterna i roboten och varför dessa är lämpliga att använda. Därefter beskrivs den mekaniska konstruktionen som används.

5.1 Val av komponenter till inre struktur

Följande avsnitt beskriver de ingående elektriska komponenterna som valts till roboten och varför de passar till ändamålet.

För att få roboten så lik den riktiga *BB-8* som möjligt används tillgängliga CAD-filer av sfäriskt skal och huvud för 3D-utskrift från *BB-8 Builders Clubs* forum [24]. Från forumet tas även ungefärliga värden på komponenternas massa. Dessa värden ligger till grund för uppskattningen av pendelns vikt, eftersom ett krav för att pendeldriften ska fungera är att vridmomentet från pendeln ska vara större än vridmomentet som huvudet ger upphov till under drift.

Utifrån detta uppskattas värden på de relevanta storheterna , se Tabell 1. I tabellen visas även de prestandakrav som är relevanta för dimensioneringen. Dessa är tagna ifrån Kravspecifikationen, se Bilaga A.

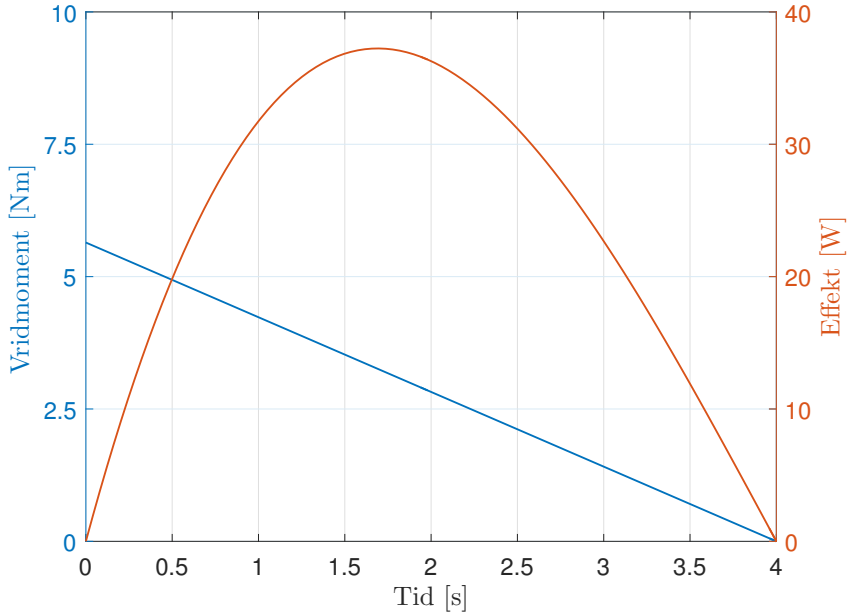
Tabell 1: Tabell över uppskattade värden på parametrarna som använts för att dimensionera motorerna.

Topphastighet	-	3 m/s
Accelerationstid	-	4 s
Massa huvud	m_h	1,5 kg
Massa pendel	m_p	5 kg
Massa sfär	m_s	4,5 kg
Radie huvud	r_{huvud}	0,14 m

Längd pendel	r_p	0,2 m
Radie sfär	r_s	0,25 m
Max vinkel huvud	φ	20°
Max vinkel pendel	$\theta - \gamma$	10°
Rotationshastighet huvud	-	60 rpm
Tid att vinkla huvud	-	1 s

5.1.1 Motor för framåtdrift

Utifrån ekvationerna (4.28) och (4.29) samt värdena från Tabell 1 beräknas kraven på vridmoment och effekt som funktion av tiden, se Figur 15. Detta resulterar i att det maximala vridmomentet som krävs är 5,64 Nm, och den maximala effekten är 37,2 W. Dessutom ger ekvation (4.30) att motorns rotationshatighet bör vara 163 rpm om utväxlingen mellan motorn och drivaxeln är 1:1.



Figur 15: Effekten och vridmomentet som funktion av tiden under en acceleration ifrån stillastående till maxhastighet.

Utifrån dessa värden väljs DC-motorn *DC Planetary Gear Brush Motor* från RobotZone tillsammans med en inbyggd växellåda med en utväxling på 51:1, se Figur 16. I figuren visas även de relevanta specifikationerna för motorn tillsammans med växellådan. Det maximala vridmomentet är lågt i förhållande till det beräknade värdet, men eftersom gravitationens påverkan när pendeln lyfts försummas i beräkningarna antas detta vridmoment räcka.

Driftspänning	12 V
Maximalt vridmoment	4.8 Nm
Maxeffekt	60 W
Maximal hastighet	165 RPM
Stoppström	20 A
Utväxling	51:1
Vikt	360 g
Pris	450 kr



Figur 16: *DC Planetary Gear Brush Motor* med en växellådan som används för framåtdrift med tillhörande tabell över relevant data.

5.1.2 Motor för lutning av pendeln

Utifrån ekvation (4.31) beräknas vridmomentet som krävdes för att luta pendeln i sidled till 2,43 Nm. Därav väljs motorn *Hitec HS-805BB*, se Figur 17, som klarar ett vridmoment på 2,42 Nm vid 6 V-drift [25]. Dessutom har motorn en rimlig hastighet på crika 70 rpm. Motorns vridmoment tillåter pendeln att lyftas 10 grader relativt vertikalaxeln. Drivaxelns vinkel väntas då blir ännu större då förändringen i positionen av sfärens tyngdpunkt bidrar till dess vinkelutslag.

Driftspänning	6 V
Maximalt vridmoment	2,42 Nm
Maximal hastighet	70 RPM
Stoppström	6 A
Vikt	152 g
Pris	360 kr



Figur 17: *Hitec HS-805BB* som används för att svänga genom att luta pendeln i sidled.

5.1.3 Motorer för lutning av huvud

Enligt kravspecifikationen ska huvudet kunna rulla över sfären i alla riktningar. Till detta krävs två servomotorer, en som styr huvudet framåt/bakåt samt en som styr huvudet i sidled. Dessa två servomotorer har samma krav på vridmoment, därför används två likadana motorer till ändamålet. Beräkningen av ekvation (4.32) ger att det största vridmoment som krävs för att kunna luta 20° blir 2,31 Nm.

Dock räcker inte budgeten till för att köpa in nya motorer till detta utan valet faller istället på 2 stycken *Hitec HS-755HB*, se Figur 18, som fanns tillgängliga på institutionen. Motorerna klarar av ett vridmoment på 1,3 Nm vid spänningsförbrukning 6 V, [26] vilket resulterar i att lutningsvinkeln begränsas till 10° istället då detta endast kräver 1,17 Nm.

Driftspänning	6 V
Maximalt vridmoment	1,32 Nm
Maximal hastighet	44 RPM
Stoppström	1,8 A
Vikt	110 g

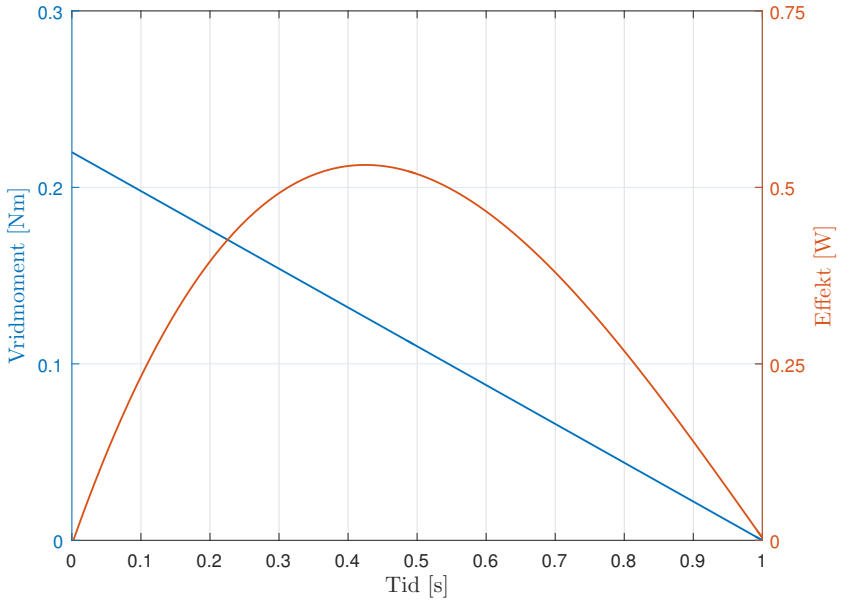


Figur 18: *Hitec HS-755HB* som används för huvudlutningen.

5.1.4 Motor för huvudrotation

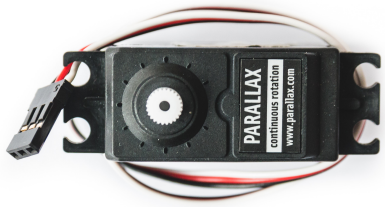
Ifrån ekvation (4.33) och (4.34) beräknas det maximala vridmomentet samt effekten som funktion av tiden, se Figur 19. Baserat på maxvärdet för vridmoment och effekten väljs motorn *Parallax Continuous Rotation Servo* till huvudrotationen, se Figur 20, eftersom även denna fanns tillgänglig på institutionen. Vid en spänning på 6 V, klarar den att leverera ett vridmoment på 0,27 Nm

vilket väntas räcka. Dock har friktionen mellan huvudet och sfären försummats i beräkningarna så en större marginal hade varit att föredra för att kompensera för detta. Dessutom är maxeffekten något för låg men det väntas endast påverka accelerationstiden. Motorn har en maximal hastighet på 50 rpm vilket anses lagom för huvudrotationen.



Figur 19: Vridmoment och effekt som krävs för att rotera huvudet som funktion av tiden.

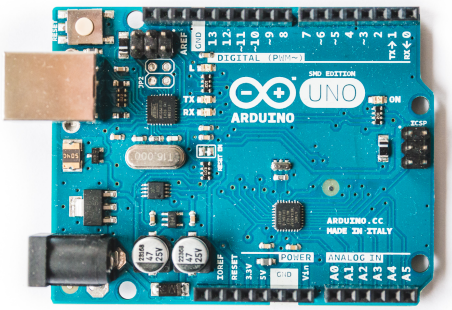
Driftspänning	6 V
Maximalt vridmoment	0,27 Nm
Maxeffekt	0,3 W
Maximal hastighet	50 RPM
Stoppström	0,2 A
Vikt	42,5 g



Figur 20: *Parallax Continuous Rotation Servo* som används för att rotera huvudet.

5.1.5 Mikrokontrollerkort

För att styra systemet används en Arduino UNO.Roboten planeras ha 5 motorer som alla styrs med hjälp av PWM-signaler, vilket gör UNO:n till ett bra val eftersom den har 6 stycken PWM-utgångar. De övriga ingångarna kan sedan användas till sensorn.



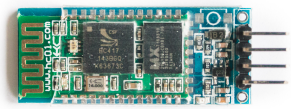
Figur 21: Mikrokontrollerkortet Arduino UNO som används för att styra roboten [27].

Tabell 2: Del av teknisk specifikation för Arduino UNO, hämtad från Arduinos hemsida [28].

Driftspänning	5V
Rekommenderad inspänning	7-12V
Digitala I/O Pins	14 (varav 6 med stöd för PWM-signaler)
Analoga Input Pins	6

5.1.6 Fjärrstyrning

Enligt kravspecifikationen ska roboten fjärrstyras. Då Bluetooth finns tillgängligt i flertalet system väljs gränssnittet för att föra över information till och från roboten. För att kunna kommunicera till Arduino UNO:n via Bluetooth införskaffas Bluetoothmodulen *HC-06* in, se Figur 22. För att kommunicera med Bluetoothmodulen väljs att implementera en app för operativsystemet Android.

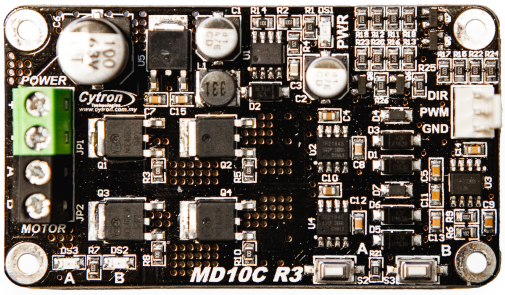


Figur 22: *HC-06*, bluetoothmodulen som används för att överföra data mellan mobiltelefonen och Arduinon.

5.1.7 Motorkontroller

Då en Arduino UNO inte klarar av att leverera varken den spänning eller ström som krävs för att styra den valda motorn för frammåtdrift, behövs en motorkontroller.

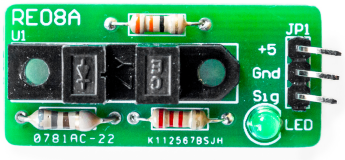
För detta valdes *Cytron 13A, 5-25V Single DC Motor Controller* som klarar en ström på 13A och strömpikar på 30A i upp till 10 sekunder, samt spänning upp till 30V [29], se Figur 23.



Figur 23: Motorkontroller för framåtdrift - *Cytron 13A, 5-25V Single DC Motor Controller*

5.1.8 Sensorer

För att mäta systemets hastighet används pulsgivaren *Cytron Simple Rotary Encoder Kit* [30], se Figur 24, med tillhörande rotationsplatta som fästes på drivaxeln.



Figur 24: Hastighetssensorn *Cytron Simple Rotary Encoder Kit* som mäter drivaxelns rotationshastighet.

5.1.9 Batteri

Den motor som kräver högst spänning, motorn för framåtdrift, behöver 12V spänning. Därav väljs ett 12V-batteri som spänningskälla för roboten. För att justera spänningen för de komponenter som behöver mindre spänning används spänningsregulatorer. Detta ansågs vara en enklare lösning jämfört med att använda flera batterier med olika spänning.

Utifrån datan från de olika motorerna görs uppskattningen att snittströmmen för systemet bör vara runt 10A vid körning. Detta innebär att en körtid på cirka 30 minuter skulle kräva 5000mAh. Därav väljs batteriet *Hardcase Lipo batteri* på 11.1V med 4200mAh [31], se Figur 25.



Figur 25: Hardcase Lipo batteri

Batteriet ger en konstant utspänning på 11,1V, men servomotorerna kräver en maximal matningsspänning på 6V. Därför användes spänningsregulatorer för att kunna mata servomotorerna med 6V. För att fördela värmeförlusterna används 19 stycken spänningsregulatorer av typen *L7806CV*, som ger 6V och maximalt 1A ut. Dessa parallellkopplades sedan i olika grupper för att mata de olika servomotorerna. Hur dessa kopplades kan ses i kretsschemat i Bilaga C.

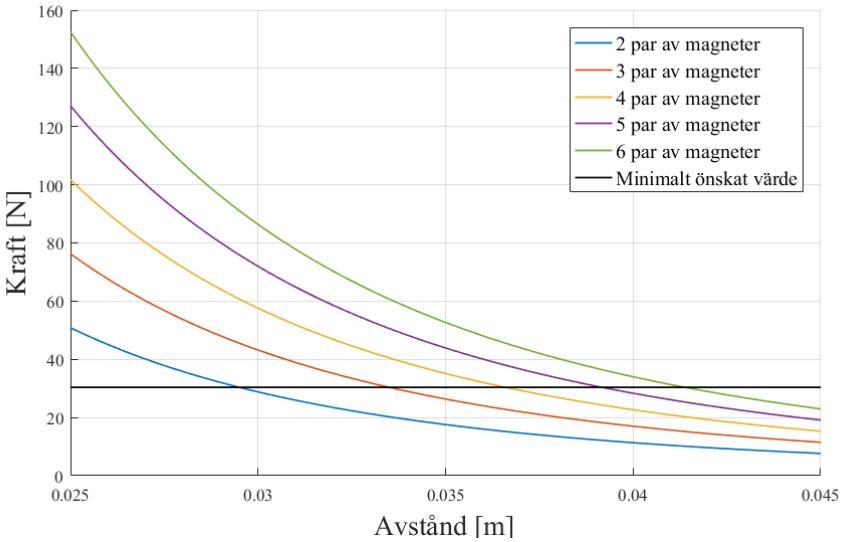
5.1.10 Magneter för fasthållning av huvud

Utifrån ekvation (4.35) beräknas den kraft som magneterna behöver klara av. På grund av storlek, styrka och pris valdes de cylindriska Neodymmagneterna *MAGZ-400-P*, se Figur 26. Denna magnet har en radien $r_{mag} = 17,5mm$, längden $h = 10mm$ och fältstyrkan $B = 1,29-1,32T$ [32].



Figur 26: Neodymmagnet *MAGZ-400-P* som används till fasthållning av huvudet.

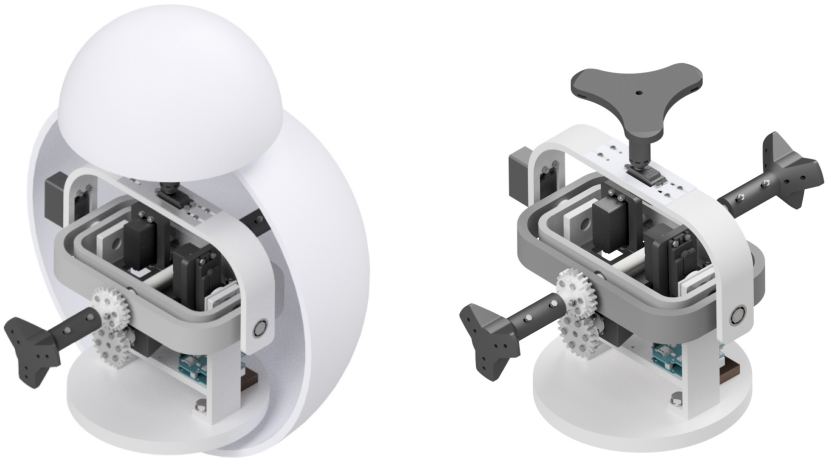
I Figur 27 visas kraften mellan magneterna som funktion av avståndet mellan dem, för olika antal par av magneter som används utifrån de ekvation (4.36). Den horisontella linjen visar den kraft som krävs för att hålla huvudet på plats. Då avståndet som magneterna behöver klara av approximeras till 35 mm, baserat på sfärens tjocklek, väntas 4 par magneter ge tillräckligt med kraft.



Figur 27: Kraft som funktion av avstånd mellan magneterna för olika antal par av magneter. Den svarta linjen visa den kraft som magneterna väntas utsättas för.

5.2 Mekanisk konstruktion

Utifrån konceptvalet modelleras systemet för att klara alla de funktioner systemet kräver. Modellen designas speciellt för att passa för alla de komponenter som valdes i avsnitt 5.1. I detta avsnitt presenteras hur de olika funktionerna för systemet fungerar och samverkar med varandra. Figur 28 presenterar hur hela inre strukturen ser ut med skal, respektive utan. De dellösningar som diskuteras i respektive delavsnitt är markerade i blått i motsvarande figur.



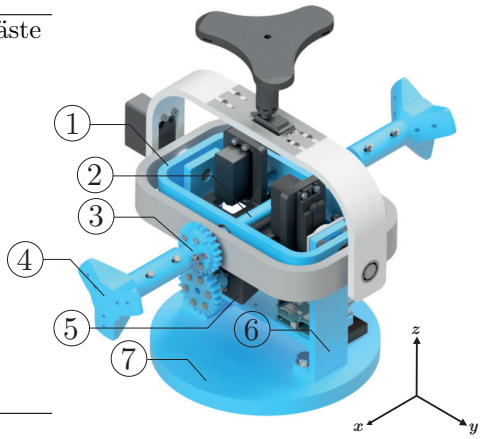
Figur 28: Översikt på roboten med och utan skal.

5.2.1 Lösning för framåtdrift

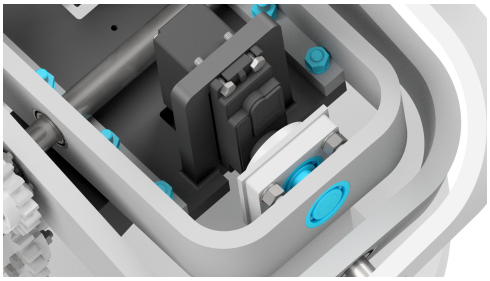
En förutsättning för att rotera sfären är att den fästs vid en roterande drivaxel. För detta krävs en drivmotor som överför ett vridmoment till drivaxeln, som i sin tur fixeras i sfären. För att undvika att motorn börjar rotera, istället för sfären, krävs att den motarbetas av ett moment som överstiger sfärens tröghetsmoment. För att åstadkomma detta designades ett system enligt Figur 29. Konstruktionen består av en pendel, bestående av ett pendelarm och en bottenplatta i metall, för att addera vikt. Utöver att addera vikt i sig används även bottenplattan som fästpunkt för diverse andra komponenter som till exempel batteri, elektronik och spänningsregulatorer för att ytterliggare sänka tyngpunkten.

Pendeln är sammankopplad med en rektangulär hållare, kallad centrumrektangel, i sfärens mitt. Denna centrumrektangel bärs i sin tur upp en drivaxel som är fäst med kullager för att tillåta rotation. Drivaxeln sträcker sig mellan sfärens insidor som den sedan fästs i med hjälp av sfärinfästningar. Drivmotorn är monterad på undersidan av motorplattan som i sin tur är fäst i centrumrektangeln med skruvar. Även pendeln är fäst i centrumrektangeln, denna med hjälp av kortare lagrade axlar för att tillåta lutning i sidled, se Figur 30. Rotation av drivaxeln möjliggörs i sin tur genom kugghjul som monteras på drivmotor och drivaxel.

1	Centrumrektangel	Upphängningsanordning för motorfäste samt pendelarm
2	Drivaxel	Överför vridmoment från drivmotor till sfär
3	Drivkugghjul	Vridmomentöverföring mellan drivmotor och drivaxel
4	Sfärinfästning	Fixerar drivaxel till sfär
5	Drivmotor	Motor för framåtdrift
6	Pendelarm	Upphängningsanordning för bottenplatta
7	Bottenplatta	Stabiliserande pendelmassan



Figur 29: Översikt över de mekaniska komponenter som är aktuella för framåtdriften.



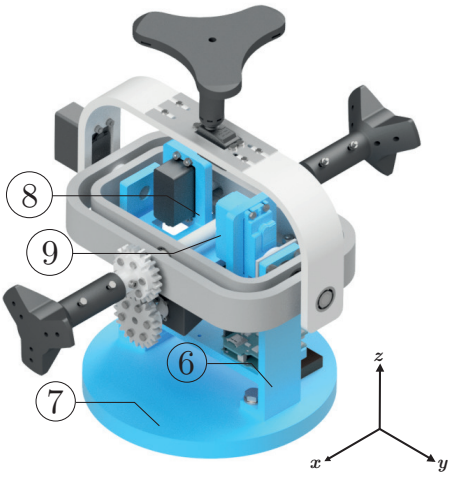
Figur 30: Närmare figur över skruvinfästningen mellan motorfästet och innerektangeln samt axelinfästningen mellan motorfästet och pendelarmen.

5.2.2 Lösning för svängning

För att möjliggöra för roboten att svänga krävs att dess tyngdpunkt kan förflyttas i sidled. Då majoriteten av konstruktionens massa består av dess bottenplatta krävs det alltså att denna kan förflyttas i sidled.

I Figur 31 kan det noteras att pendeln består av ett pendelarm samt bottenplatta hängandes från sfärens centrum. Pendeln kan sedan ställas i en vinkel med hjälp av en servomotor som är monterad på ett motorfäste på centrumrektangeln. Konstruktionen tillåter pendeln att luta upp till 30 grader i förhållande till drivaxeln. Detta för att ge god marginal att klara av lutningen vid svängning som maximalt väntas uppgå i 20 grader.

6	Pendelarm	Upphängningsanordning för bottenplatta
7	Bottenplatta	Huvudsakliga pendelmassan
8	Motorfäste	Infästning för drivmotor, pendelmotor samt huvudlutningsmotorn i
9	Pendelmotor	Motor för vinkling av pendel



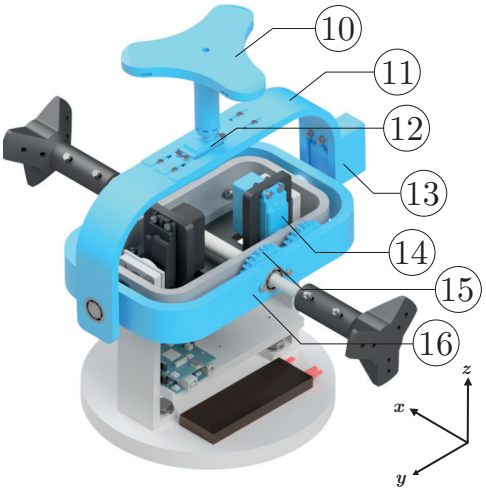
Figur 31: Översikt över de mekaniska komponenter som är aktuella för svängning.

5.2.3 Lösning för styrning av huvud

För att möjliggöra för huvudet att kunna röra sig fritt över sfärens yta krävs en lösning som är oberoende av pendelns rörelser. Huvudstyrningen är därför uppdelad i två nyckelkomponenter, en som möjliggör rotation kring x-axeln, kallad ytterrektangel, och en som möjliggör rotation kring y-axeln, kallad motorbåge, se Figur 32.

För rotation kring x-axeln används en servomotor, komponent nummer 14 i Figur 32. Denna överför vridmoment via ett kugghjulspar som fästs i motorn samt ytterrektangeln. På ena sidan motorbågen placeras sedan en servormotor som tillåter rotation i y-led, komponent nummer 13 i Figur 32. Denna motor utgör även fästet mellan ytterrektangeln och motorbågen på den sidan. På den andra sidan är delarna fästa i varandra med hjälp av en kort lagradaxel. Huvudet kan även roteras med hjälp av en kontinuerlig servomotor, fäst ovanpå motorbågen, som ankrar mot huvudet genom en hållare med magneter fästa inuti.

10	Magnethållare	Hållare för magneter till huvudinfästning
11	Motorbåge	Infästning för huvudlutningsmotor i y-led samt motor för huvudrotation
12	Huvudrotationsmotor	Motor för rotation av huvud
13	Huvudlutningsmotor (y-led)	Motor för lutning av huvud kring y-axel
14	Huvudlutningsmotor (x-led)	Motor för lutning av huvud kring x-axel
15	Lutningskugghjul	Vridmomentsöverföring mellan huvudlutningsmotor i x-led och ytterrektangel
16	Ytterrektangel	Upphängningsanordning för motorbåge

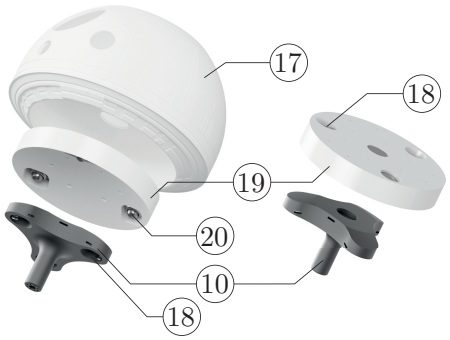


Figur 32: Översikt av de mekaniska komponenter som är aktuella för huvudlutningen.

5.2.4 Huvudinfästning

För att förankra huvudet vid den sfäriska kroppen används magneter. Magneterna fästs i magnethållare i sfären samt i huvudets botten, se Figur 33. För att minimera friktion mellan huvud och sfärens yta används kulrullar av typen *WA-01-A-C*, monterade i huvudets magnethållare.

10	Magnethållare	Hållare för magneter till huvudinfästning
17	Huvud	Huvudet bestående av yttre skal
18	Magneter	
19	Huvudets magnethållare	Infästning för magneter i huvud
20	Kulrullar	Minskar friktion mellan sfär och huvud



Figur 33: Huvudinfästningens ingående komponenter

6 Reglering av systemet vid framåtdrift

Vid framåtdrift av roboten är det pendeln som ger upphov till att sfären förflyttas framåt. Pendeln riskerar dock att sätta systemet i oönskad svängning, exempelvis vid inbromsning. Genom reglering av pendeln kan denna svängning minimeras, och därmed ge ett stabilare system. Det här kapitlet behandlar hur regleringen av *BB-8* kan utföras. Utgångspunkten är att ta fram överföringsfunktionerna från de uppställda rörelseekvationerna (4.11), (4.12) och (4.13) i kapitel 4. Genom linjärisering av dessa ekvationer kan överföringsfunktioner tas fram och stabiliseringsvillkor ställas upp. Kapitlet behandlar dels den teoretiska regleringen av systemet, dels tillämpning av densamma på den fysiska roboten.

6.1 Framtagning av reglersystem

För att ta fram en överföringsfunktion för rörelsen framåt krävs linjärisering och Laplacetransformering av de dynamiska ekvationerna (4.11), (4.12) och (4.13). För att åstadkomma detta görs vissa förenklingar. Eftersom pendeln väntas befinna sig näst intill vertikalt vid drift kan det antas att summan $\theta_s + \theta_p \ll 1$. På samma sätt kan det även antas att vinklen för huvudet, θ_h är liten. Utifrån detta kan uttrycket Taylorutvecklas

$$\Rightarrow \qquad sin(\theta_s + \theta_p) \approx \theta_s + \theta_p \qquad cos(\theta_s + \theta_p) \approx 1$$
$$sin(\theta_h) \approx \theta_h \qquad cos(\theta_h) \approx 1$$

Utöver detta gäller det även att pendelns och sfärens hastighet är ungefär lika stora och motriktade. Därav kan följande approximation användas

$$(\omega_s + \omega_p)^2 \approx 0$$

Då huvudet kommer vara låst under drift kommer det inte påverkas av sfärens vinkelhastighet vilket ger att $T_{huvud} \approx 0$.

Med hjälp av dessa approximationer kan rörelseekvationerna (4.11), (4.12) och (4.13) förenklas till

$$\begin{aligned} T_{fram} = {} & gm_h r_h(\theta_h + \theta_p + \theta_s) + C_{h_R} r_s^2 \omega_s + C_{g_R} r_s^2 \omega_s + \\ & - \left[J_h + J_p + m_h r_h^2 + m_p r_p^2 - m_p r_p r_s + m_h r_h r_s\right]\dot{\omega}_p + \\ & - \left[J_h + J_p + J_s + m_h r_h^2 + m_p r_p^2 + m_h r_s^2 + m_p r_s^2 + m_s r_s^2 - 2m_p r_p r_s + 2m_h r_h r_s\right]\dot{\omega}_s \end{aligned} \tag{6.1}$$

$$\begin{aligned} T_{fram} = {} & - gm_h r_h(\theta_h + \theta_p + \theta_s) + \left[J_h + J_p + m_h r_h^2 + m_p r_p^2\right]\dot{\omega}_p + \\ & + \left[J_h + J_p + m_h r_h^2 + m_p r_p^2 - m_p r_p r_s + m_h r_h r_s\right]\dot{\omega}_s \end{aligned} \tag{6.2}$$

$$0 = gm_h r_h(\theta_h + \theta_p + \theta_s) - C_{h_R} r_s^2 \omega_s \tag{6.3}$$

För regleringen är det önskvärt att ha ett samband mellan pålagd spänning och vridmoment. Detta fås genom att utgå ifrån en DC motorns ekvationer [33]

$$u = Ri + L\frac{di}{dt} + K_u\omega_m$$
$$T = K_m i$$

där u är spänningen över motorn, R motorns inre resistans, i strömmen, L induktansen, ω_m motorns vinkelhastighet, T vridmomentet, K_u proportionalitetskonstant för mot-EMK samt K_m momentkonstant. Genom att försumma motorns inre induktans kan vridmomentet för motorn här lösas ut som

$$T = \frac{K_m}{R}\big(u - K_u\omega_p\big) \tag{6.4}$$

Genom att låta laplacetransformen för $\theta_i(t)$ betecknas $\Theta_i(s)$ där $i = \{s, p, h\}$ och använda att $\mathcal{L}\{f'\} = sF(s) - f(0)$ fås Laplacetransformerna av ekvationerna (6.4), (6.1), (6.2) och (6.3) som

$$T_{fram} = \frac{K_m}{R}\big(U(s) - K_u s\Theta_s(s)\big) \tag{6.5}$$
$$T_{fram} = \big[A\big]\Theta_h(s) + \big[A - Bs^2\big]\Theta_p(s) + \big[A + (C_{h_R} + C_{g_R})r_s^2 s - Cs^2\big]\Theta_s(s) \tag{6.6}$$
$$T_{fram} = \big[-A\big]\Theta_h(s) + \big[(-A) + Ds^2\big]\Theta_p(s) + \big[(-A) + Es^2\big]\Theta_s(s) \tag{6.7}$$
$$0 = A(\Theta_h(s) + \Theta_p(s) + \Theta_s(s)) - C_{h_R} r_s^2 s\Theta_s(s) \tag{6.8}$$

Där följande konstanter har införts för att förkorta uttrycken.

$$A = gm_h r_h$$
$$B = J_h + J_p m_h r_h^2 + m_p r_p^2 - m_p r_p r_s + m_h r_h r_s$$
$$C = J_h + J_p + J_s + m_h r_h^2 + m_p r_p^2 + m_h r_s^2 + m_p r_s^2 + m_s r_s^2 - 2m_p r_p r_s + 2m_h r_h r_s$$
$$D = J_h + J_p + m_h r_h^2 + m_p r_p^2$$
$$E = J_h + J_p + m_h r_h^2 + m_p r_p^2 - m_p r_p r_s + m_h r_h r_s$$

För reglering av roboten vid framåtdrift är det främst intressant att utgå från relationen mellan pålagd spänning till drivmotor och sfärens vinkelhastighet, det vill säga förhållandet $s\Theta_s(s)/U(s)$. För att ta fram detta undersöks överföringsfunktionerna från pålagd spänning till pendelns vinkelhastighet, $\Theta_p(s)/U(s)$, samt pendelns vinkel till sfärens vinkelutslag, $\Theta_s(s)/\Theta_p(s)$, se Bilaga D. Dessa kombineras sedan för att ge den sökta överföringsfunktionen

$$\frac{s\Theta_s(s)}{U(s)} = \frac{\Omega_s(s)}{U(s)} = \\ = \frac{\big[-(B+D)K_m\big]s}{\big[(CD-BE)R\big]s^2 + \big[(C+E)K_mK_u + ((B-2D)C_{h_R} - C_{g_R}D)r_s^2R\big]s - \big[(3C_{h_R}+C_{g_R})K_mK_ur_s^2\big]} \tag{6.9}$$

Genom att studera stabilitetsvillkoren för överföringsfunktionen, det vill säga att systemets poler ligger i vänstra halvplanet, kan systemets stabilitet undersökas. För överförningsfunktionen ges då stabilitetsvbillkoret enligt

$$\mathbb{R}e\Bigg(-\frac{(C+E)K_mK_u + (BC_{h_R} - (2C_{h_R}+C_{g_R})D)Rr_s^2}{2(CD-BE)R} \pm \\ \frac{\sqrt{4(3C_{h_R}+C_{g_R})(CD-BE)K_mK_uRr_s^2 + \big((C+E)K_mK_u + (BC_{h_R} - (2C_{h_R}+C_{g_R})D)Rr_s^2\big)^2}}{2(CD-BE)R}\Bigg) < 0 \tag{6.10}$$

Stabilitetsvillkoren för systemets delsystemens granskas även i Bilaga (D).

6.1.1 Val av regulator

Eftersom en Arduino valdes som kontrollerkort, vilket beskrivs i kapitel (5.1.5), är det enkelt att använda en PID-regulator eftersom det finns färdiga bibliotek som har stöd för dessa. Detta passar även bra då konstruktionen har en hastighetssensor som kan användas som återkoppling. Utifrån överföringsfunktionen (6.9) beräknas kontrollen fram med hjälp av tune-funktionen i programmet *Simulink*. Regulatorn modifieras med målen att undvika undersläng och minska överslängen så mycket som möjligt utan att försämra stabiliteten samt att minska den oscillerande effekten.

6.2 Simulering- och verifieringsmetod

I detta avsnitt beskrivs hur simuleringen av systemet görs samt vilka tester som utförs på den fysiska roboten för att jämföra modell och verklighet. Speciellt intressant att undersöka är skillnaden på systemet med och utan reglering.

6.2.1 Simulering

Till grund för simuleringen av systemet används *Lagranges* rörelseekvationer för sfärens- (4.11) samt pendelns vinkel (4.12). Då uttryck söktes för sfärens respektive pendelns vinkelaccelerationer som funktion av tiden användes DC-motorns ekvation (6.4) för att eliminera T_{fram} från ekvationerna. Värt att notera är att sfärens och pendelns ekvationer beror av varandra. Dessa ekvationer förs sedan in i *Simulink*.

För att även få grafer över delsystems vinkelhastigheter och vinklar integreras vinkelaccelerationen två gånger, vilket visas i simuleringsmodellen i Bilaga E. Insignalen till modellen är ett enhetssteg. Enhetessteget simulerar spänningen in i PID-regulatorn som dimensionerats utifrån

den linjäriserade modellen i avsnitt 6.1. En begränsning på 11.1V införs i systemet för att ta hänsyn till systemets spänningsbegränsning.

6.2.2 Testning

Det första testet undersökte huruvida huvudet kunde stanna kvar på kroppen vid drift, samt lutning och rotation av huvud. Rörelserna kontrollerades med hjälp av den Androidapp som tidigare beskrivits. Vid drift testades roboten utan reglering och utan begränsning i spänningsökning och sedan med reglering och mjuka spänningsförändringar. I detta deltest användes pulskvot 30%, respektive referenshastighet på 0,6m/s samt maximal tillåten spänningsökning på 1,5V/s. Roboten kördes i 8 sekunder innan den stannades.

Vid test av framåtdrift utfördes fyra deltester, där de olika kombinationerna av reglering och begränsad spänningsförändring testades. Utan reglering matades drivmotorn med pulskvoten 50%, och då PID-regulatorn användes sattes 1,5m/s som referenshastighet. För de mjuka spänningskurvorna sattes en maximal förändring på 3,0V/s. Data samlades in med hjälp av robotens hastighetssensor, och visuella observationer noterades. Roboten kördes i 5 sekunder innan den stannades.

Tredje testet gjordes för att mäta den maximala hastigheten som roboten kunde nå. Här användes PID-regulator eller mjuka spänningskurvor. En pulskvot på 100% matades till drivmotorn under 5 sekunder innan roboten stannades. Data samlades in med robotens hastighetssensor.

För att jämnföra med simulerat resultat testades hur roboten betedde sig under en längre körning med det mest stabila resultatet från det andra testet. Både PID-regulator och begränsad spänningsförändring användes. Referenshastigheten sattes till 1m/s, och maximal spänningsförändring till 3,0V/s. Roboten kördes i 20 sekunder innan den stannades.

För att mäta svängradien användes tre olika pulskvoter, (30%, 40%, och 50%). Detta för att jämföra svängradien vid olika hastigheter. Roboten gavs 5 sekunder att accelerera varpå pendeln lutades 20° under 7 sekunder. Tiden det tog för roboten att svänga 90° samt radien på svängcirkeln uppmättes. Detta användes för att beräkna hastigheten vid del olika pulskvoterna.

7 Resultat

I detta kapitlet beskrivs roboten som projektet resulterat i. Därefter presenteras den framtagna PID-regulatorn samt simulerings- och testresultaten.

7.1 Slutgiltig konstruktion

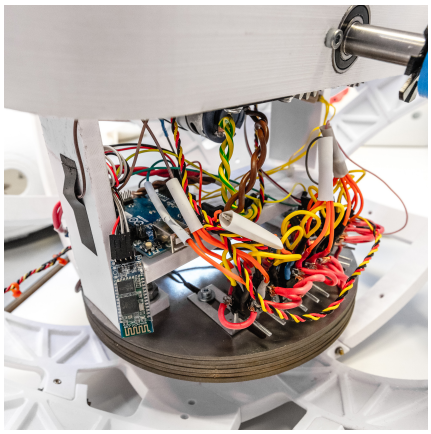
I syfte att efterlikna *BB-8* konstruerades en robot bestående av två delar, ett kupolformat huvudet samt en sfärisk kropp, se Figur 34. Dessa täcktes med yttre mönstrade paneler för att få en textur liknande den *BB-8* som syns i filmen. Sfärens innanmäte består av ett skelett som utgör den bärande konstruktionen, se Figur 35a. Innanför skelettet monteras den inre konstruktion som utgör robotens drivsystem, se Figur 36. Till skillnad ifrån de renderingar som presenterades i avsnitt 5.2 kan monteringen av spänningsregulatorerna urskönjas på systemets bottenplatta, se Figur 35b.



Figur 34: Helhetsbild av roboten där det yttre skalet är monterat.

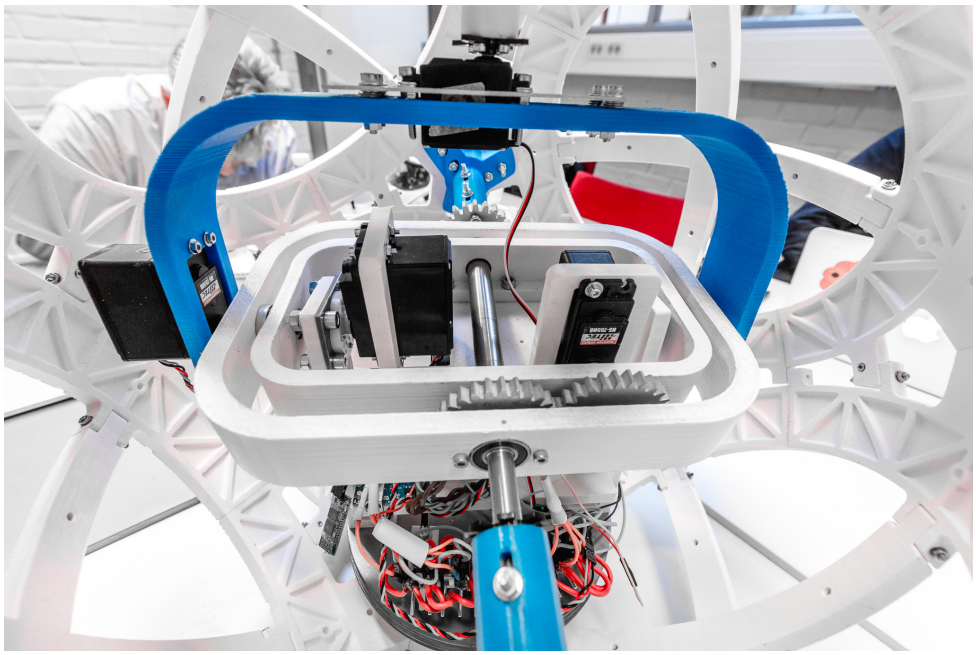


(a) Skelettet som utgör den bärande konstruktionen för sfären.



(b) Närmare bild på delar av elektroniken på bottenplattan.

Figur 35



Figur 36: Den inre strukturen som utgör robotens drivsystem.

Värden på robotens ingående relevanta parametrar anges enligt Tabell 3. Dessa värden används vid simuleringen för att ta fram överföringsfunktionen och dess poler samt PID-kontrollerns konstanter i *Simulink*. I tabellen visas även mätvärden för robotens maxhastighet och accelerationstid. Dessa mättes genom att köra roboten med maximal driftspänning, där maxhastigheten 3,0m/s uppnåddes efter 5 sekunder.

Tabell 3: Tabell över robotens värden på de parametrarna som använts för att ta fram överföringsfunktionen och simuleringen. Dessutom visas uppmätta värden på maxhastighet och accelerationstid.

Massa sfär	m_s	6,6 kg
Massa pendel	m_p	8,3 kg
Massa huvud	m_h	1,4 kg
Radie sfär	r_s	0,26 m
Längd pendel	r_p	0,20 m
Längd huvud	r_h	0,28 m

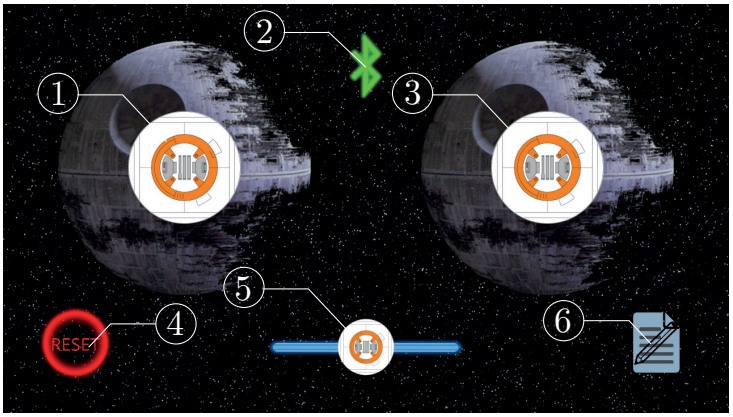
Tröghetsmoment sfär	J_s	0,295 kg m^2
Tröghetsmoment pendel	J_p	0,247 kg m^2
Tröghetsmoment huvud	J_h	0,112 kg m^2
Total Massa	-	16,3 kg
Topphastighet	-	3,0 m/s
Accelerationstid	-	5 s

7.2 Fjärrstyrning

Fjärrstyrningen för roboten realiserades genom en Androidapp, se Figur 37. De huvudsakliga styrbara funktionerna för roboten definierades som framåtdrift, svängning, och huvudlutning och -rotation. Dessa implementerades genom joysticks och ett reglage. Vänster joystick (1) används för att styra robotens rullning. När joysticken dras horisontellt lutas pendeln i sidled, som används för svängning, och vertikalt styrs hastigheten på roboten. Höger joystick (3) används för att luta huvudet runt x- respektive y-axeln. Reglaget för huvudrotation (5) används för att rotera huvudet i båda riktningar. Vidare lades en Bluetoothknapp (2) till för att kontrollera anslutningen till roboten.

Utöver dessa grundläggande funktioner lades ytterligare funktioner till för att förbättra användarupplevelsen. En resetknapp (4) skapades för att återställa roboten om denna skulle sluta fungera. Dessutom implementerades en knapp för datainsamling (6) för att kunna styra inläsning av data från roboten, inklusive hastighet via hastighetssensorn, och spara denna i en fil på telefonen.

1	Vänster joystick
2	Bluetoothknapp
3	Höger joystick
4	Resetknapp
5	Reglage för huvudrotation
6	Datainsamlingsknapp



Figur 37: Skärmdump av Androidappen som används för att fjärrstyra roboten. Appen är ett montage av bilder från [34–39].

7.3 Simulering

Givet värdena i tabell 3, fås överföringsfunktionen för systemet från ekvation (6.9) enligt

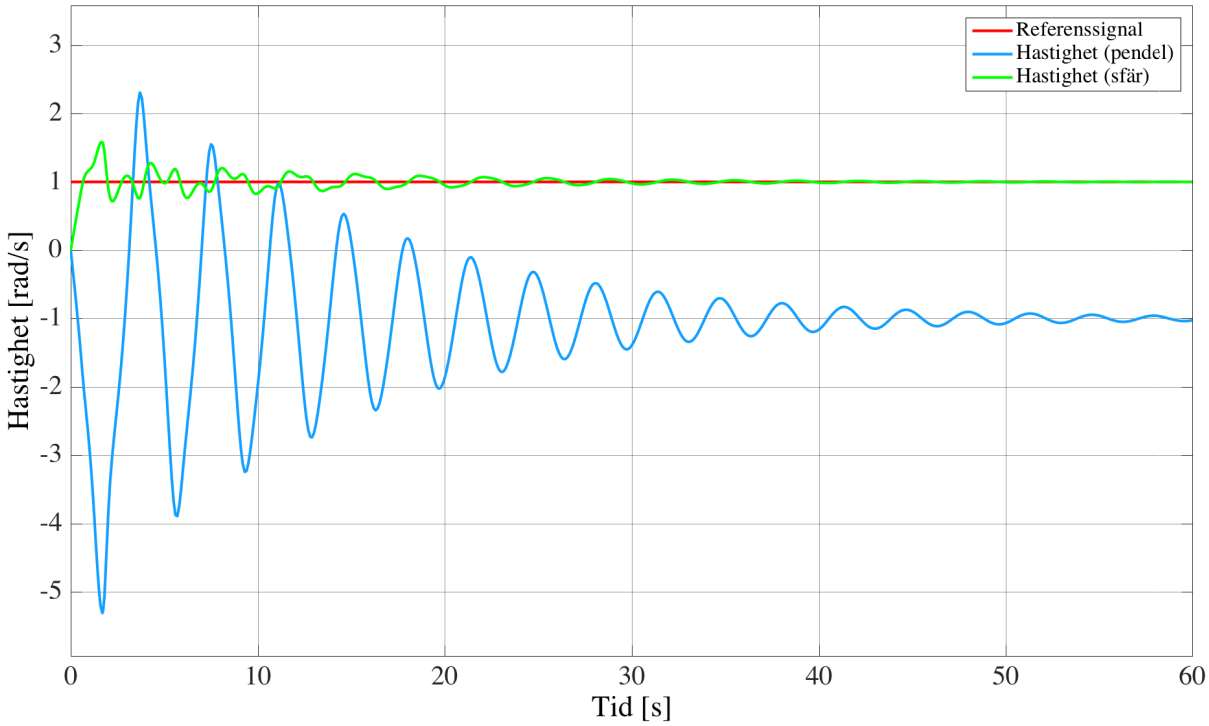
$$\frac{s\Theta_s(s)}{U(s)} = \frac{-0,1016s}{0,6025s^2 + 0,004726s + 1,225 \cdot 10^{-5}} \tag{7.1}$$

Vidare ges stabilitetsvillkoret från ekvation (6.10) polerna för systemet enligt

$$\mathbb{R}e\{-0,0039 \pm j0,0022\} < 0 \tag{7.2}$$

vilket visar att systemet är stabilt och kontrollerbart. Utifrån denna överföringsfunktion fås värdena på PID-kontrollern enligt $P = 31,67$, $I = 25,05$ och $D = 1,25$ med hjälp av *Simulink*.

Systemet simuleras enligt avsnitt 6.2.1 vilket ger ett vinkelhastigheternas beteende enligt Figur 38. Observera att vinkelhastigheterna är motsatt riktade eftersom de har samma referensriktning, se avsnitt 4.1.1. I figuren ses att pendeln kompenserar för att hålla sfärens hastighet stabil kring referenssignalen.



Figur 38: Hastigheten för sfären (grönt) respektive pendeln (blått) och sfärens referenssignal (rött) visar hur pendelns hastighet varierar för att stabilisera sfärens hastighet kring 1. Observera de motsatta riktningarna på hastigheterna och att hastigheten för pendeln konvergerar mot -1.

7.4 Test av robot

I testningen av roboten utfördes fyra tester: huvudfunktionalitet, reglering av framåtdrift, svängradie samt test av PID-regulatorns stabiliseringsförmåga. Testerna utfördes med hjälp av förprogrammerade kodsekvenser för eliminera variationer som följd av mänskliga faktorer.

7.4.1 Test av huvudfunktionalitet

Vid test huruvida huvudet kunde stanna kvar på kroppen vid drift, samt lutning och rotation av huvud kontrollerades roboten manuellt genom Androidappen som tidigare beskrivits. Lutning av huvudet testades runt både x- och y-axeln. Huvudrotationen testades sedan i båda rotationsriktningarna.

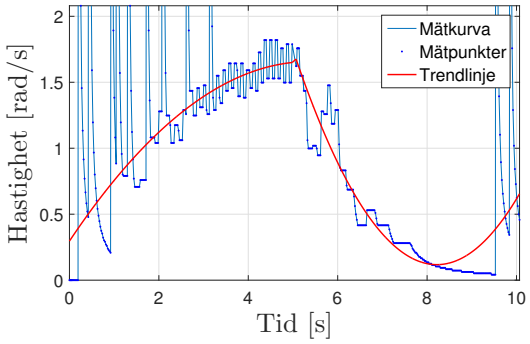
Vid drift testades roboten utan reglering och sedan med reglering och linjär spänningförändring. I detta deltest användes pulskvoten 30%, respektive referenshastighet på 0,6m/s samt maximal tillåten spänningsökning på 1,5V/s. Efter 8 sekunder nollställdes referenssignalen.

Då huvudet testades i drift utan reglering föll det av efter 3 sekunder. För samma test med PID-reglering föll huvudet av efter 1 sekund. Vid test av huvudlutning gav motorerna inget utslag och huvudet förblev stilla. Till följd av resultatet i dessa två tester utfördes resterande tester utan huvud.

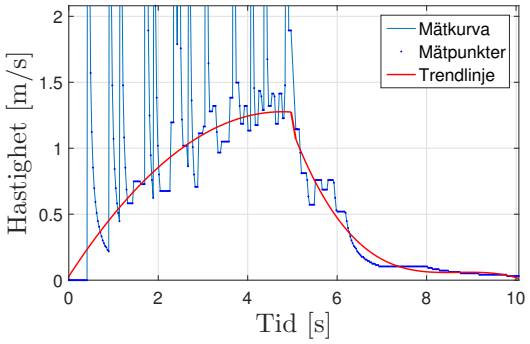
7.4.2 Test av framåtdrift

Vid test av framåtdrift utfördes fyra deltester, där de olika kombinationerna av reglering och linjär spänningsförändring testades. Utan reglering matades drivmotorn med pulskvoten 50%, och då PID-regulatorn användes sattes 1,5m/s som referenshastighet. För de linjära spänningskurvorna sattes förändring till 3,0V/s. Data samlades in med hjälp av robotens hastighetssensor. Efter 5 sekunder nollställdes referenssignalen

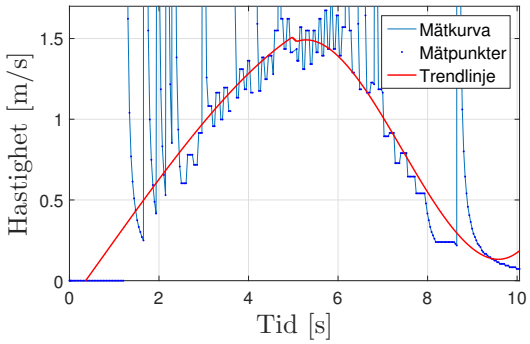
Resultaten från de olika deltesterna visas nedan i Figur 39. Testerna i (a) och (b) visar robotens hastighetsprofil vid stegförändring av spänningen, utan respektive med PID-reglering. Vid testerna i (c) och (d) visar robotens hastighetsprofil med linjär spänningsförändring, utan respektive med PID-reglering. De blå kurvorna visar rådatan från testerna, och de röda kurvor visar trendlinjer hos mätdatan där hastighetsspikarna har undantagits.



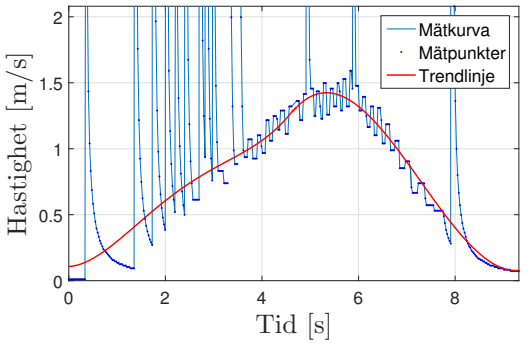
(a) Robotens hastighetsprofil utan reglering.



(b) Robotens hastighetsprofil med reglering.



(c) Robotens hastighetsprofil utan reglering och med linjär spänningsförändring.



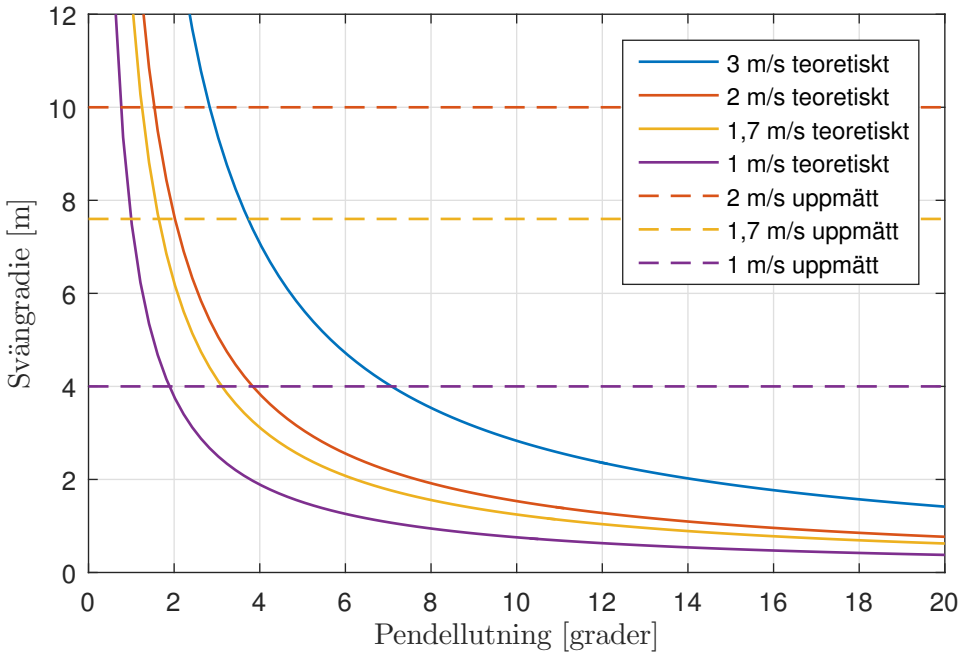
(d) Robotens hastighetsprofil med reglering och linjär spänningsförändring.

Figur 39: Robotens hastighetsprofil med och utan reglering vid framåtdrift.

7.4.3 Test av svängning

För att mäta svängradien användes tre olika pulskvoter, 30, 40 respektive 50%. Detta för att jämföra svängradien vid olika hastigheter. Roboten gavs 5 sekunder att accelerera, därefter försågs pendellutningsmotorn med 6V för att få största möjliga vinkelutslag på drivaxeln. Tiden det tog för roboten att svänga 90° samt radien på svängcirkeln uppmättes. Detta användes för att beräkna hastigheten vid del olika pulskvoterna.

I Figur 40 nedan visas resultaten från testet. De teoretiska kurvorna för de beräknade hastigheterna visas tillsammans med streckade nivåer som visar de uppmätta svängradierna vid de testade hastigheterna.

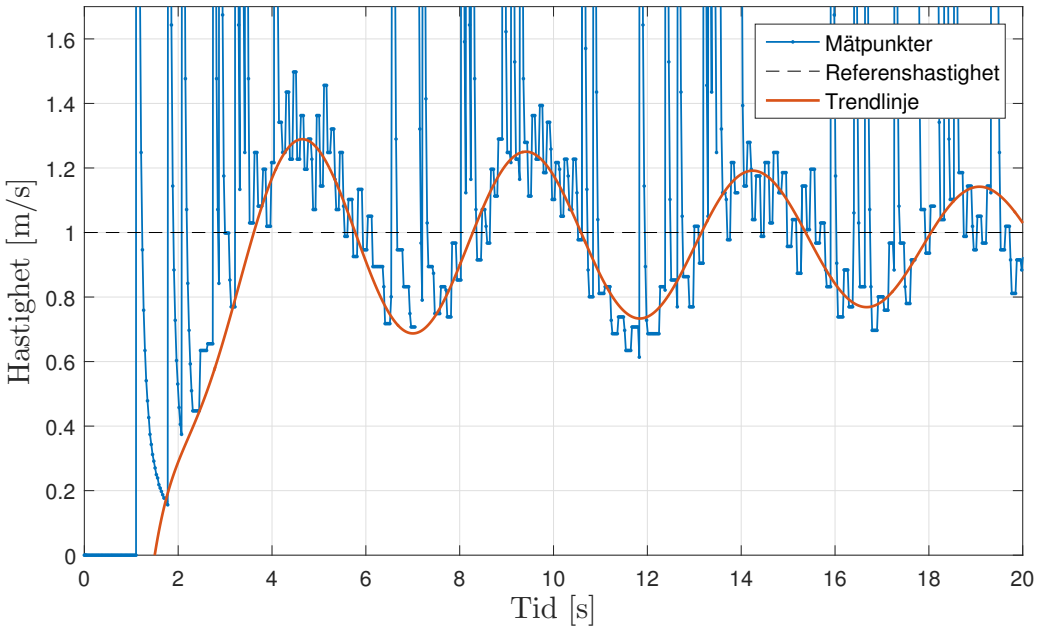


Figur 40: Diagram över hur svängradien varierar med pendelvinkeln för olika hastigheter. Observera att datan gäller för sfären utan huvudet monterat.

7.4.4 Test av stegsvar

För att jämnföra med simulerat resultat testades hur roboten betedde sig under en längre körning. Både PID-regulator och en linjär spänningsförändring användes. Referenshastigheten sattes till $1m/s$ tillsammans med en spänningsförändring på $3{,}0V/s$. Efter 20 sekunder nollställdes referenssignalen.

Mätdatan från robotens hastighetssensor visas i den blå kurvan i Figur 41 nedan. Den röda kurvan är en anpassad trendlinje från den uppmätta hastigheten. Referenshastigheten som användes vid testet visas som svart streckad linje.



Figur 41: Robotens hastighetsprofil med PID-regulator och linjär spänningsförändring.

8 Diskussion

Följande diskussion behandlar de resultat som redovisats i projektet, förbättringsmöjligheter samt faktorer som påverkat projektets resultat.

8.1 Stabilitet

När systemet hade konstruerats visade det sig att stabiliteten var ett problem eftersom systemets tyngdpunkt blev för hög relativt markplanet. För att sänka tyngdpunkten, vilket i sin tur ökar stabiliteten hos systemet, adderades vikt till bottenplattan.

Inledningsvis i projektet var planen att optimera robotens stabilitet genom att placera tyngre komponenter, så som systemets motorer, på bottenplattan. För att åstadkomma detta hade överföringen för vridmomentet behövt ske genom exempelvis rem- och/eller vajerlösningar. Detta hade även tillåtit en utväxling av motorerna, något som inte är möjligt med dagens konstruktion. Trots dess fördelar hade det även inneburit en mer komplex konstruktion och ett större arbete med utformning av bottenplatta samt lösningar för kraftöverföring. Lösningsförslaget hade även inneburit en högre kostnad vilket inte gick att passa in i budgeten.

8.2 Fasthållning av huvud

Vid drift var det specificerat att motorerna för lutning av huvud skulle förbli låsta. Under test av roboten visade det sig dock att motorerna själva inte klarade att motverka de krafter som uppstod och avvek från sitt upprätta läge. Detta resulterade i att huvudet föll av sfären. Underdimensionering av motorerna var en konsekvens av budgetbegränsningen men förväntningen var att motorerna, trots sin storlek, skulle klara att hålla huvudet upprätt relativt pendeln. Så blev ändå inte fallet, troligtvis då friktionen mellan huvud och sfär försummades i dimensioneringen av motorerna.

Utöver starkare motorer hade det varit fördelaktigt med någon form av reglering för huvudlutningen för att förhindra att huvudet faller av konstruktionen. Detta beror på att huvudet inte ska följa med i pendelns lutning vid acceleration utan stanna på toppen av sfären. Det hade dock inneburit ett mer komplicerat reglersystem då det krävt sensorer för att återkoppla huvudlutningen. Ett alternativ till ovanstående hade kunna vara att utrusta systemet med starkare eller fler magneter.

En bidragande faktor till den stora kraftpåverkan kan också vara störningar i rörelsen som uppstår när kulrullarna passerar ojämnheter på sfärens yta. Dessa störningar hade kunnat minskas genom att använda kulrullar med större diameter samt av mjukare material, för att öka stötdämpningen. Alternativt kunde även en slätare sfär användas på bekostnad av likheten med *BB-8*.

8.3 Framåtdrift

I Figur 39, se Avsnitt 7.4.2, som erhölls vid testerna av framåtdrift syns inga stora skillnader mellan de olika deltesterna, men det finns fortfarande vissa differenser som bör diskuteras. När linjär spänningsökning används syns att accelerationen ändras långsammare i början av testet, jämfört med när spänningen tilläts att ändras diskontinuerligt. Om roboten hade körts med huvud hade den långsammare ökningen varit att föredra, då det sannolikt hade lett till ett mer stabilt system.

Framför allt kan det konstateras att hastighetssensorn hade hög osäkerhet, vilket syns genom spikar i mätdatan i alla tester. För en bättre uppfattning om den reella hastigheten bör därför trendlinjerna användas. Då PID-regulatorn är beroende av den uppmätta hastigheten orsakade detta att roboten inte kunde föras framåt stabilt. Till exempel kan det urskönjas i Figur 39b att mellan 2 och 4 sekunder syns en större avvikelse gentemot trendlinjen. Detta beror sannolikt på att PID-regulatorn kompenserar kraftigt för de felaktiga hastighetsspikar som används i återkopplingen, vilket leder till att roboten bromsas. Till följd av detta är det svårt att från testet av framåtdrift dra någon slutsats om PID-regulatorns påverkan på systemet.

Det bör dock noteras i Figur 39d att när linjär spänningsökning används tillsammans med PID-regulatorn bromsas inte roboten in till följd av hastighetspikarna i lika stor utsträckning som i Figur 39b. Detta beror sannolikt på att den linjära spänningsprofilen agerar som ett lågpassfilter för PID-regulatorn, då spänningen till drivmotorn inte hinner ändras märkbart vid en hastighetsspik, vilket minskar påverkan från hastighetsspikarna.

8.4 Svängning

I dagsläget krävs en relativt stor yta för att ändra robotens färdriktning genom pendellutning. Förhoppningen var att pendelmotorn skulle klara av att luta pendel 20° relativt drivaxel. På grund av den vikt som pendeln har (8,3kg) jämfört med vad som uppskattades vid dimensioneringen (5kg) klarar inte motorn av att ställa pendeln i önskat läge. I sin helhet innebar detta att roboten får en större svängradie. För att undvika att hamna i denna situation borde motorn ha dimensionernas för en större vikt. Det fanns tidigare en osäkerhet i vad pendelns slutgiltiga vikt skulle vara eftersom uppskattningen av pendelvikten inte baserades på något säkert underlag, vilket stärker detta resonemang. I enighet med detta resonemang tyder resultaten i Figur 40, se avsnitt 7.4.3, på att pendelvinkeln vid maximal lutning är strax under 2 grader. Denna vinkel är betydligt mindre än de 8 graderna som motorn teoretiskt ska klara av med den aktuella pendelvikten.

Dessutom gjordes beräkningen utifrån antagandet att vinkelutslaget för drivaxeln skulle vara större än pendelens vinkel relativt vertikalaxeln. Det vill säga att vinkeln $\theta > \gamma - \theta$ i Figur 13, se avsnitt 4.1.2, vilket inte nödvändigtvis är sant. Därav borde montorn dimensioneras för att klara ytterligare en större vinkel än den önskade vinkeln för drivaxeln.

Till en början fanns det planer på att komplettera svängningen med en funktion att rotera i stillastående läge. Detta skulle lösas genom att utrusta roboten med ytterligare en motor för att rotera en inre massa kring systemets vertikalaxel. Denna rotation hade skapat ett rörelsemängsmoment vilket hade satt roboten i rotation till följd av rörelsemängdsmomentets bevaring. Detta

hade gett robten större frihet att röra sig i trängre utrymmen.

8.5 Reglering

Genom stabilitetsvillkoret, se avsnitt 7.3, ges att det konstruerade systemet är stabilt och kontrollerbart med ett imaginärt polpar. I resultatet för stegsvar, se Figur 41, noteras att systemet har en betydande oscillerande effekt. Detta beror troligtvis på att polerna ligger mycket nära imaginäraxeln i det komplexa talplanet. Den oscillerande effekten kan vara bidragande faktor till att huvudet faller av sfären vid acceleration, då huvudet följer pendelns lutning. Enligt vad som nämnts ovan hade en separat reglering av huvdet möjligtvis kunnat motverka detta. En följd blir att systemet får en lång insvängningstid vilket gör det svårt för roboten att hinna stabilisera sig under kortare driftsintervall.

Från testresultaten kan det noteras en osäkerhet i den mätadata som hastighetessensor anger, exempelvis i Figur 41. Osäkerheten består dels av mätbrus men också av oförklarliga mätaspikar. Eftersom denna signal används som återkoppling till PID-regulatorn kan dessa avvikelser ge upphov till felaktig reglering. För att minska felet i regleringen av systemet hade en noggrannare metod för att mäta hastigheten krävts.

8.6 Simulering

Generellt motsvarar det simulerade beteendet de förväntningar som fanns på systemet. Dock tar det lång tid innan systemet stabiliseras mot det önskade referensvärdet. Troligvis är den största orsaken till systemets beteende de approximationer som gjorts vid beräkningarna som leder fram till överföringsfunktionerna. Exempelvis finns en större osäkerhet i friktionsmoddelleringen då det är svårt att uppskatta de friktionskonstanter som existerar i systemet. Detta leder till ekvationer inte beskriver systemet till fullo. Dessutom kan den fysikaliska modellen som ställts upp för att beskriva systemet anses ge en förenklad beskrivning av verkligheten. Det noteras även från ekvation (7.1), att polerna för systemet är placerade nära 0 vilket även kan vara en anledning till det oscillerande beteende som pendeln antar.

8.7 Testmetod

När roboten testades användes olika insignaler, beroende på om en PID-kontroller användes eller inte. Detta beror på att drivmotorn matas med spänning, medan PID-kontroller tar en hastighet som insignal. Till följd av detta finns det en viss skillnad mellan testerna utan och med reglering, vilket gör att dessa inte är helt jämförbara. Genom att studera graferna syns dock att den maximala hastigheten för varje deltest är relativt nära $1{,}5 m/s$, och då testerna genomfördes med förprogrammerad kod är jämförelser relevanta.

Utrymmet vid majoriteten av testen vad dock begränsat vilket orsakade kortare körsträcka. Detta noteras även i Figur 39. Roboten kunde endast köras i 5 sekunder innan den behövde stannas. I Figur 39 syns att robotens hastighet inte hann stabiliseras innan testet måste avbrytas. Därför ger inte testet en bra bild av hur robotens hastighet ser ut för konstanta hastigheter. Under mycket begränsad tid fanns dock tillgång till större testyta, så att ett test kunde köras en

längre sträcka, se Figur 41. Detta gav möjlighet att undersöka robotens stabilitet vid konstant hastighet, vilket gjordes tidigare i 8.5. För att kunna beskriva hur systemet beter sig utan och med PID-reglering, samt med diskontinuerliga spänningsförändringar och linjär spänningsökning.

8.8 Budgetutfall

Projektets budget för konstruktionen av roboten låg på 5 000 SEK. Budgeten visade sig inte vara tillräcklig, där en högre budget hade givit möjligheter till inköp av mer lämpliga motorer. Detta hade givit möjlighet till användning av huvudet vid körning av roboten, och inköp av mer noggranna och anpassade sensorer för regleringen av systemet och datainsamling. Dessutom skulle sannolikt robotens svängprestanda kunna ökas om en starkare motor för pendellutningen införskaffades.

Även om kostnader för konstruktionsmaterial - vilket fanns tillgängligt kostnadsfritt via institutionen vid vilken projektet utfördes - ej behövde tas hänsyn till, kunde inte budgeten hållas, se Bilaga F. Detta indikerar på att konstruktionen av en sfärisk robot i denna storleken skulle behöva en större budget än den given av intuitionen, även om konstruktionsmaterial ej är inkluderat i budgeten.

9 Slutsats

Syftet med projektet var att konstruera och med hjälp av reglertekniska lösningar, kontrollera en robot som både funktions- och utseendemässigt liknande *BB-8*. Trots att testresultaten inte nådde upp till alla de förväntningar och krav som fanns på roboten anses den grundläggande konstruktionen för roboten utgöra en stabil plattform för fortsatt utveckling. Den framtagna mekaniska konstruktionen tillåter roboten att utföra de rörelser som väntas av roboten. I detta inkluderas till exempel att huvudet och sfären kan röra sig fritt i förhållande till varandra. För att nyttja den mekaniska konstruktionens fulla potential hade ytterligare reglertekniska system behövts implementeras. Detta var dock ej möjligt på grund av projektets begränsning i tid och resurser.

En betydande faktor för systemet stabilitet var tyngdpunktens placering. Med denna typ av pendeldriftsystem är ett krav att systemet innehar en tung pendelmassa med lång pendelarm, vilket visade sig avgörande för robotens funktionalitet.

Simuleringar visade även att en avtagande oscillerande effekt förekommer i systemet. Detta bekräftades vid testning av roboten. Den långa insvängningstiden är problematisk då kortare driftsintervall är vanligt för denna typ av robot.

Med detta sagt så ligger projektet till god grund för ett fortsatt arbete för vidare utveckling av en robot liknande *BB-8*.

Referenser

[1] M. Nagai, "Control system for a spherical robot," tech. rep., Automation and Systems Technology, 2008.

[2] J. D. J. Alves, "Design and control of a spherical mobile robot," tech. rep., Institute for Systems and Robotics, 2003.

[3] S. M. H. T. Y. T. Toshiaki Otani, Takateru Urakubo, "Position and attitude control of a spherical rolling robot equipped with a gyro," tech. rep., Department of Faculty of Engineering, 2006.

[4] S. Wars, "Astromech droid." `http://www.starwars.com/databank/astromech-droid`, 2017. [Hämtad 18-April-2017].

[5] "Bb-8 builders club member list." `https://bb8builders.club/forum/memberlist.php`, 2017. [Hämtad 06-February-2017].

[6] "Bb-8 builders club facebook-sida." `https://www.facebook.com/groups/BB8BuildersClub/`, 2017. [Hämtad 18-April-2017].

[7] J. Jakubiv, "Bb-8 droid," 2015. [Elektronisk bild].
Tillgänglig: `http://b2b.partcommunity.com/community/partcloud/index#!part?name=BB-8+droid+-+All+details&model_id=25299`. Hämtad 11-Maj-2017.

[8] R. E, "Spherical vehicle," Dec. 23 1941. US Patent 2,267,254.

[9] F. Bruhn, V. Kaznov, P. Samuelsson, and L. Stenmark, "Ball robot," Aug. 19 2009. EP Patent 1,812,210.

[10] Rotundus, "Rotundus groundbot^{TM}." `http://www.rotundus.se/`, 2017. [Hämtad 1-May-2017].

[11] Rotundus, "Rotundus groundbot," 2008. [Elektronisk bild].
Tillgänglig: `http://www.rotundus.se/press.html`. Hämtad 09-Maj-2017.

[12] S. Wars, "Droids of the force awakens panel| star wars celebration europe 2016." `https://youtu.be/RzzWmTIVv3c`, July 16, 2016. [Hämtad 29-Mars-2017].

[13] S. Dufresne, "How BB-8 works revealed at star wars celebration europe." `http://hackaday.com/2016/07/20/how-bb-8-works-revealed-at-star-wars-celebration-europe/#more-214674`, 2016. [Hämtad 02-February-2017].

[14] J. Bruton, "Xrobots website." `http://www.xrobots.co.uk/`. [Hämtad 30-April-2017].

[15] J. Bruton, "Xrobots bb-8 version 1." `http://www.xrobots.co.uk/category/bb8/`, May 2015. [Hämtad 17-April-2017].

[16] J. Bruton, "Star wars ep7 bb-8 droid," 2015. [Elektronisk bild].
Tillgänglig: http://i2.wp.com/www.xrobots.co.uk/wp-content/uploads/2016/05/BB8_12.jpg. Hämtad 11-Maj-2017.

[17] J. Bruton, "Xrobots bb-8 version 2." http://www.xrobots.co.uk/category/bb-8-version-2/, May 2015. [Hämtad 19-April-2017].

[18] J. Bruton, "Xrobots bb-8 version 3 ball mechanics." http://www.xrobots.co.uk/category/bb-8-version-3/, May 2016. [Hämtad 20-April-2017].

[19] J. Bruton, "Star wars ep7 bb-8 droid ver 3, hamster drive," 2016. [Elektronisk bild].
Tillgänglig: http://i0.wp.com/xrobots.co.uk/BB8-3/008.jpg. Hämtad 11-Maj-2017.

[20] J. Bruton, "Star wars ep7 bb-8 droid ver 3., reaction wheel," 2016. [Elektronisk bild].
Tillgänglig: http://i0.wp.com/xrobots.co.uk/BB8-3/013.jpg. Hämtad 11-Maj-2017.

[21] E. Zarick, "Edward zarick website." http://www.edsjunk.net/, 2016. [Hämtad 30-April-2017].

[22] E. Zarick, "Bb-8 drive system," 2016. [Elektronisk bild].
Tillgänglig: http://www.edsjunk.net/wordpress/wp-content/uploads/2016/02/29-1024x588.jpg. Hämtad 11-Maj-2017.

[23] L. H. P. S. David Vokoun, Marco Beleggiab, "Magnetostatic interactions and forces between cylindrical permanent magnets," tech. rep., Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2009.

[24] S. Smith, "Body outer panels." http://bb8builders.club/wiki/index.php?title=Community_Files, 2017. [Hämtad 06-Februari-2017 enligt CC BY-NC-SA].

[25] Hitec, "Hs-805bb giant scale servo motor." http://hitecrcd.com/products/servos/giant-servos/analog-giant-servos/hs-805bb-mega-giant-scale-servo/product, 2017. [Hämtad 4-Maj-2017].

[26] Hitec, "Hs-755hb giant scale servo motor." http://hitecrcd.com/products/servos/giant-servos/analog-giant-servos/hs-755hb-karbonite-giant-scale-servo/product, 2017. [Hämtad 4-Maj-2017].

[27] redcctshirt, "Arduino." https://pixabay.com/sv/arduino-datorn-cpu-databehandling-373994/, 22 juni 2014. [Hämtad 05-Mars-2017, licens: Creative Commons].

[28] Arduino, "Arduino uno." https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno, Okänd. [Hämtad 05-Mars-2017].

[29] Robotshop, "Cytron 13a, 5-25v single dc motor controller." http://www.robotshop.com/eu/en/cytron-13a-5-30v-single-dc-motor-controller.html, 2017. [Hämtad 14-April-2017].

[30] Robotshop, "Cytron simple rotary encoder kit." http://www.robotshop.com/eu/en/cytron-simple-rotary-encoder-kit.html, Okänd. [Hämtad 12-Maj-2017].

[31] Batterikungen, "3 celler - lipo." https://www.batterikungen.se/batteri/rc-batterier/3-celler-lipo.html, 2017.

[32] Magnordic, "Supermagnet 30x10 mm." https://www.magnordic.se/supermagnet-30x10-mm, 2017. [Hämtad 9-Maj-2017].

[33] B. Lennartsson, *Reglerteknikens grunder*. Studentlitteratur AB, Lund: Studentlitteratur, 2011.

[34] SpaceAnonymous, "Utrymme stjärnor star wars darck." https://pixabay.com/sv/utrymme-stjÃďrnor-star-wars-darck-1164579/, 2016. [Hämtad 4-april-2017 enligt CC0].

[35] A. Langager, "Death star transparent background." https://www.flickr.com/photos/andylangager/8631388149, 2013. [Hämtad 4-april-2017 enligt CC BY-NC].

[36] Michal, "Bb8 blueprint ver 1." https://www.flickr.com/photos/53554756@N02/16634169053/in/photostream/, 2015. [Hämtad 4-april-2017 enligt CC BY-NC-SA 2.0].

[37] Scigola, "Laser svärd blå krig stjärna." https://pixabay.com/p-1533275/?no_redirect, 2015. [Hämtad 4-april-2017 enligt CC0].

[38] Clker-Free-Vector-Images, "Dokument ikon dator web." https://pixabay.com/p-309065/\?no_redirect, 2014. [Hämtad 4-april-2017 enligt CC0].

[39] Clker-Free-Vector-Images, "Penna svart design ritning." https://pixabay.com/p-24173/?no_redirect, 2012. [Hämtad 4-april-2017 enligt CC0].

Bilagor

A Kravspecifikation

Chalmers	Dokumenttyp	Kravspecifikation		S2 = institutionen för Signaler och System		
	Projekt	Kandidatarbete BB-8		BB-8 = Arbetsgruppen för projektet		
Utfärdare: BB-8 grupp 2		***Skapad: 2017-01-24***		Vikt: 1=Minst väsentligt 5=Mest väsentligt		
		Modifierad: 2017-02-01				
	Kriterier	***Målvärde***	***K/Ö***	***Vikt***	***Verifieringsmetod***	***Referens (kravställare)***
	Funktion					
	Fjärrstyrd		K	-	Ingen fysisk kontakt mellan konstruktion och styrkontroll	S2
	Mobilapplikation för fjärrstyrning		Ö	3	Testkörning med roboten	S2
	Högtalare		Ö	2	Öron	BB-8
	Rullbar (ej hjul i hål i botten)		Ö	5	Testkörning med roboten	BB-8
	Roterbart huvud i vertikal axeln		Ö	4	Rotations test av huvudet	BB-8
	Lutbart huvud		Ö	3	Huvudet är inte fäst vid en enda punkt i kroppen	BB-8
	Inbyggd kamera i huvudet		Ö	1	Kameran fungerar att använda	BB-8
	Roterbar kropp runt vertikal axel		Ö	3	Testkörning med roboten	BB-8
1	**Prestanda**					
1.1	Styrbar i alla riktningar		K	-	Testkörning på konstruktionen	S2
1.2	Styrkontroll för fjärrstyrning		K	-	Testkörning på konstruktionen	S2
1.3	Huvudet ramlar inte av vid körning		K	-	Testkörning på konstruktionen, knuffa konstruktionen	S2
1.4	Stabilisering av kropp och huvud i vertikal riktning		K	-	Testkörning på konstruktionen, knuffa konstruktionen	S2
1.5	Klarar av att åka i generella inomhusmiljöer		Ö	2	Testkörning i olika inomhus miljöer	BB-8
1.6	Hastighet vid rak körning	>1m/s	Ö	5	Måta tiden	BB-8
1.7	Svängradie	< 1.5m	Ö	4	Mät svängradien på konstruktion	BB-8
2	**Miljö**					
2.1	Återanvädningsbar	>8X%	K	-		BB-8
2.2	Ingen användning av giftiga/hälsofarliga material		K	-		BB-8
3	**Livslängd**					
3.1	Livslängd	>3år	Ö	1	Analys	BB-8
4	**Underhåll**					
4.1	Möjligt att serva robot efter slutmontering		K	-		BB-8
4.2	Laddningsbara batterier		K	-		BB-8
4.3	Laddningskontakt på utsidan		Ö	2		BB-8
5	**Tillverkningskostnad**					
5.1	Kostnad	<5000kr	K	-	Kvitton	S2
6	**Kvantitet**					
6.1	Antal	1				BB-8
7	**Storlek**					
7.1	Sfärisk kropp	300mm<D<550mm	Ö	4	Mätning vid tillverkning	BB-8
8	**Vikt**					
8.1	Totalvikt huvud + kropp + komponenter	<10kg	Ö	2	Vägning av komponenter	BB-8
8.2	Totalvikt huvud + kropp + komponenter	<20kg	Ö	3	Vägning av komponenter	BB-8
9	**Estetik och ytfinish**					
9.1	Sfärisk form		K	-	Kroppen är rundad	S2
9.2	Huvud		K	-	Huvud är fästbalanserad på den sfäriska kroppen	S2
9.3	Lysdioder på kropp		Ö	2	Se om lampor lyser	BB-8
9.4	Lysdioder på huvud		Ö	4	Se om lampor lyser	BB-8
9.5	Liknelser med BB-8		K	-	Eftersträva utseende på referensbilder av BB-8 från Star Wars: The Force Awakens	S2
9.6	Utseende enligt "The force Awakens"		Ö	3	Godkännande av handledare	BB-8
10	**Ergonomi**					
10.1	Användarvänlig gränssnitt för styrkontroll		Ö	4	Testanvändning av utomstående student eller handledare	BB-8
11	**Kvalitet och tillförlitlighet**					
11.1	Klara av att köra in i en vägg utan att gå sönder		Ö	4	Köra in i en vägg och hoppas på det bästa	BB-8
12	**Tidsschema**					
12.1	Inom kandidatarbetetsarbetstid	Maj 2017	K	-	Deadline från instuitionen	S2
13	**Säkerhet**					
13.1	Ej strömförande Kropp		K	-	Voltometer	BB-8
13.2	Ej strömförande huvud		K	-	Voltometer	BB-8
13.3	Ingen brandrisk		K	-	Stresstest	BB-8
14	**Patent och litteratur**					
14.1	Star wars franchise patent		K	-	Kontrollera att projektet inte kolliderar med Star wars patenterna	emicmic

B Motordimensionering

```
%% Variables
clc; close all; clear all;
% Sphere variables
sphereRadius = 0.25;            % Radius on sphere [m]
sphereMass = 4.5;                % Mass of sphere shell [kg]
% Head variables
headMass = 1.5;                 % total mass of headstructure[kg]
headRadius = 0.14;               % Radius of the head [m]
headAngle = 20*pi/180;           % maxium lean angle for head [rad]
headRotationMotorMass = 0.05;    % mass of the motor rotation the head [kg]
headRotationMotorholderMass = 0.3;  % mass of the component holding the head
%rotation motor [kg]
headRotationMotorholderLength = 0.1;% length of the component holding the head
%rotation motor [m]
magnetholderMass = 0.2; % mass of the component holding the magnets, including
%magnet mass [kg]
magnetholderRadius=0.07;          % radius of the magnetholder [m]
headPendulumLength = 0.3;
% Body variables
shaftMass = 0.5;                  % driving axis across sphere,
%length equal to sphere diameter [kg]
plateMass = 5;% Bottom plate, including motors, electronics, batteries etc,
%Same radius as flywheel [kg]
bodyLeanAngle = 30*pi/180;      % maxium angle to lean pendulum [rad]
pendulumLength = 0.2;
plateRadius = 0.1;
% Performace varibales
maxSpeed = 5;                     % max speed at forward drive[m/s]
accTime = 1;                      % time to reach max speed,
%used in all applications [m/s]
revPerSecZaxis = 1/2;             % still rotation around z-axis [varv/sekund]
headRpm = 60;                     % number of max rotations
%per minute for head around itelf [rpm]
leanTime = 1;                     % time to rech maximum degree-lean angle [s]
% Other variables
lossPercentage = 0.7;             % procent losses
gravity = 9.82;                   % [m/s^2]
% Usefull combinations
totalMass = sphereMass + headMass + shaftMass +
plateMass + headRotationMotorMass + headRotationMotorholderMass + magnetholderMass;
compensationMassHead = magnetholderMass + headRotationMotorMass;
% compensation for when magnets and structure inside are included [kg]
maximumHeadLeanAngle =  headAngle;                  % [rad]

%% Turning head
close all;
clc;
headInertia = 2/5 * headMass * headRadius^2 + 1/2 * magnetholderMass * magnetholderRadius^2;
headmaxRotationSpeed = headRpm /60 * 2 * pi;
maxHeadRpm = headRpm /0.7
```

```
headAngularAcc = headmaxRotationSpeed / accTime;
c0=2*headAngularAcc;
c1=-c0./accTime;
t=linspace(0,accTime);
headAngularAcc = c0 + c1.*t;
headAngularVelocity = c0*t + 1/2 * c1*t.^2;
headTorque = 1/lossPercentage * headAngularAcc * headInertia;
stallTorqueHeadRotation = max(headTorque)
figure;
PowerheadRotation = 2 * headTorque .* headAngularVelocity;
figure;
yyaxis left
plot(t,headTorque,'linewidth', 1.2);
xlabel('tid [s]')
ylabel('Vridmoment [Nm]')
yyaxis right
plot(t, PowerheadRotation, 'linewidth', 1.2)
ylabel('Effekt [W]')

%% Pendulum leaning
pendulumMass = plateMass
torquePendulum = 1/lossPercentage *  pendulumMass * gravity * pendulumLength * sin(10*pi/180)

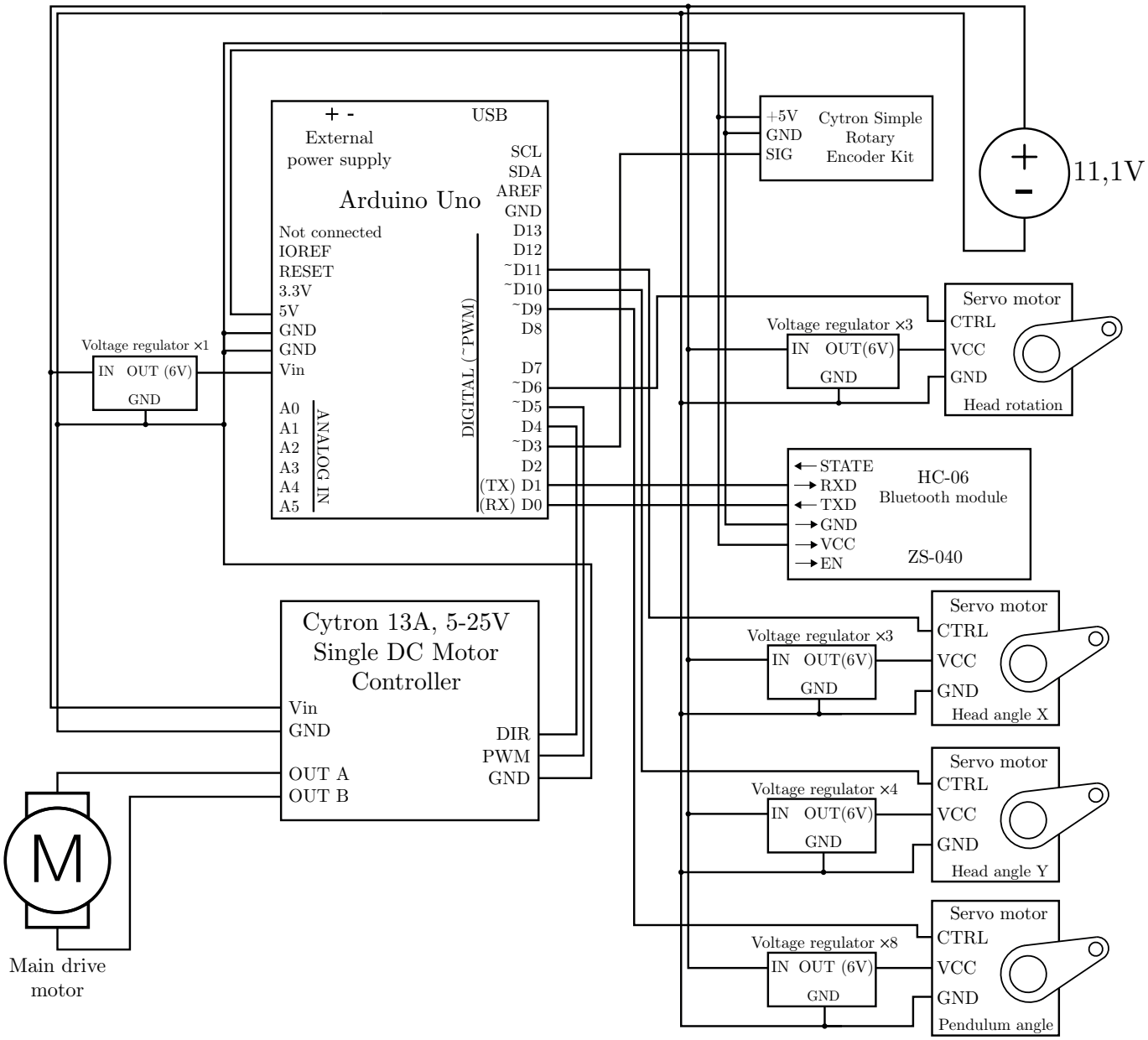
%% Headlean Motors
% both motors for leaning the head are assumed to be of the same type.
% Therefor calculations are made for the motor placed closest to the center
% because the load should be greatest for that motor.
close all; clc;
maximumHeadLeanAngle = 10*pi/180;
t=linspace(0,accTime);
headAngularAcc = maximumHeadLeanAngle/ accTime;
c0=2*headAngularAcc;
c1=-c0./accTime;
angularAccHead = c0 + c1.*t;
headAngularVelocity = c0*t + 1/2 * c1*t.^2;
headMass=1.5;
% torque from grqavity acting on head structure
headTorque = (sphereRadius + headRadius*3/8) * headMass * gravity * sin(maximumHeadLeanAngle);
% [Nm]
totalLeanGravityTorque = headTorque; % [Nm]
headTorque = (sphereRadius + headRadius*3/8)^2 *headMass*angularAccHead;     % [Nm]
totalLeanAccTorque = headTorque; % [Nm]
totalLeanTorque = totalLeanGravityTorque + totalLeanAccTorque;  % [Nm]
rpmHeadLeanMotor = 1/(2*pi)*headAngle./accTime
% rotations per second to acomplish requested lean velocity [rpm]
torqueRequiredHeadLeanMotor = 1/lossPercentage*totalLeanTorque          % [Nm]
powerRequiredHeadLeanMotor = torqueRequiredHeadLeanMotor .* headAngularVelocity;    % [W]
plot(t,torqueRequiredHeadLeanMotor);
xlabel('tid [s]')
ylabel('Vridmoment [Nm]','linewidth', 2)
figure
plot(t, powerRequiredHeadLeanMotor, 'linewidth', 2)
ylabel('Effekt [W]')

%% Forward drive
close all
```

```
maxSpeed=3;
accTime=4;
% torque from inertia of sphere
rpm = maxSpeed*60/(2*pi*sphereRadius);                % [rot/min]
momentOfInertia = (2/3)*sphereMass*sphereRadius^2;    % [kg m^2]
max_rpm = rpm/0.7
% with linear acceleration
acc = maxSpeed./accTime;                              % [m/s^2]
angularAcc = acc./sphereRadius;                       % [rad*s^-2]
a0=2*angularAcc;
a1=-a0./accTime;

for i=1:length(accTime)
t=linspace(0,accTime(i));
omegadot = a0(i) + a1(i).*t;
torqueInertia = omegadot * momentOfInertia;
accForce = totalMass .* omegadot .* sphereRadius;
accTorque = accForce .* sphereRadius;
power = 1/lossPercentage * (torqueInertia + accTorque) .*(a0(i).*t+a1(i).*t.^2/2);
bodyTorque = (torqueInertia + accTorque);
figure(1)
maxpower_sphere(i)=max(power);
maxpower_motor(i)=2*maxpower_sphere(i);
maxTorque_sphere(i)=max(bodyTorque);
maxTorque_motor(i)=maxTorque_sphere(i);
[x, y1, y2] = plotyy(t, bodyTorque,t,power)
y1.LineWidth = 1;
y2.LineWidth = 1;
ylabel(x(1),'Vridmoment [Nm]', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', 17)
ylabel(x(2),'Effekt [W]', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', 12)
grid on
xlabel('Tid [s]', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', 12)
figure(2)
grid on
hold on
plot(t, (a0(i).*t+a1(i).*t.^2/2).*sphereRadius, 'linewidth', 1.2)
xlabel('Tid [s]', 'interpreter', 'latex')
ylabel('hastighet  [m/s^2]')
end
maxpower_motor
maxTorque_motor
```

C Kretsschema



D Överföringsfunktioner

Överföringsfunktionen mellan pendels vinkel och spänningsmatningen.

$$\frac{\Theta_p(s)}{U(s)} = \frac{\big[(C+E)K_t\big]s - \big[(3C_{h_R} + C_{g_R})K_t r_s^2\big]}{\big[(CD-BE)R\big]s^2 + \big[(C+E)K_tK_e + ((B-2D)C_{h_R} - C_{g_R}D)r_s^2R\big]s - \big[(3C_{h_R} + C_{g_R})K_tK_e r_s^2\big]}$$

Överföringsfunktionen mellan sfärens vinkel och pendelns vinkel.

$$\frac{\Theta_s(s)}{\Theta_p(s)} = \frac{-\big[(B+D)\big]s}{\big[C+E\big]s - \big[(3C_{h_R} + C_{g_R})r_s^2\big]}$$

Överföringsfunktionen mellan sfärens vinkel och motorns vridmoment.

$$\frac{\Theta_s(s)}{\mathcal{T}_{drivmotor}(s)} = \frac{\big[(CD-BE)K_t\big]s^2 + \big[(BC_{h_R} - (2C_{h_R} + C_{g_R})D)K_t r_s^2\big]s}{\big[(CD-BE)R\big]s^2 + \big[(C+E)K_tK_e + ((B-2D)C_{h_R} - C_{g_R}D)r_s^2R\big]s - \big[(3C_{h_R} + C_{g_R})K_tK_e r_s^2\big]}$$

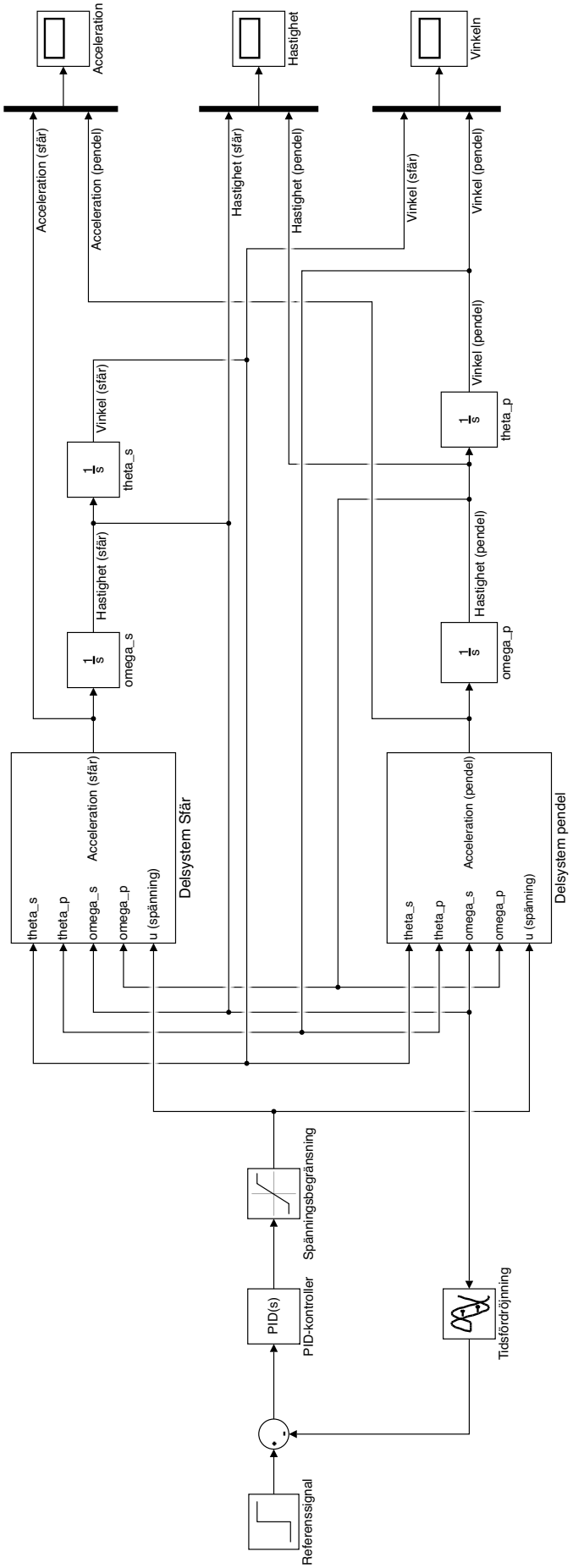
Stabilitetsvilkor.

$$\mathbb{R}e\Bigg(- \frac{(C+E)K_mK_u + (BC_{h_R} - (2C_{h_R} + C_{g_R})D)Rr_s^2}{2(CD-BE)R} \pm \frac{\sqrt{4(3C_{h_R} + C_{g_R})(CD-BF)K_mK_uRr_s^2 + \big((C+E)K_mK_u + (BC_{h_R} - (2C_{h_R} + C_{g_R})D)Rr_s^2\big)^2}}{2(CD-BE)R}\Bigg) < 0$$

Det konstateras att överföringsfunktionen för sfärens vinkel och pendelns vinkels pol alltid kommer att vara stabil så länge som $3C_{h_R} < C_{g_R}$, vilket kan antas alltid vara sant vilket ger stabilitetsvillkoret

$$\mathbb{R}e\left(\frac{(3C_{h_R} + C_{g_R})r_s^2}{(C+E)}\right) < 0.$$

E Översikt på simulering



F Budget

Kostnadspost	Beskrivning	Antal	Brutto	Totalt (brutto	Kommentar
Motorkontroller	Cytron 13A, 5-25V Single DC Motor Controller	1	kr147,25	kr147,25	
Motor för framåtdrift	12V, 165RPM 680.5oz-in Precision Planetary Gearmotor	1	kr703,86	kr703,86	
Sensor Pulsgivare	Cytron Simple Rotary Encoder Kit	1	kr117,90	kr117,90	
Kugghjulsnav	12mm Set Screw Hub	1	kr103,17	kr103,17	
Kugghjulsnav	6mm Set Screw Hub	1	kr103,17	kr103,17	
Motor för lutning av pendeln	HS-805BB Giant Scale Servo Motor	1	kr353,31	kr353,31	
Sensor Gyro/Accelerometer	6 DOF Gyro, Accelerometer IMU - MPU6050	1	kr105,45	kr105,45	
Servonav	Servonav långt Hitec Standard	2	kr174,40	kr348,80	
Spänningsregulator	L7806CV TO-220 Spänningsregulator 6V 1A	20	kr4,00	kr80,00	
Batteri	4200 mAh, 40 C , 11.1 V	1	kr379,00	kr379,00	
Fjärrstyrning Bluetooth-modul	Bluetooth-modul för Arduino	1	kr139,90	kr139,90	
PLA filament	ECO - PLA - 2,85 mm (1 kg) Vit	1	kr401,25	kr401,25	
PLA filament	PLA-filament för 3D-skrivare 3mm Vit	1	kr250,00	kr250,00	
PLA filament	PLA-filament för 3D-skrivare 3mm Vit	1	kr200,00	kr200,00	låg kvalitet
Magneter	Supermagnet 30x10 mm - Product number: MAGZ-400-P	8	kr124,50	kr996,00	
Lim	Superlim Loctite All Plastics	5	kr79,90	kr399,50	
Kullager drivaxel, inre	15x24x5 - 61802 Kullager (6802)	2	kr105,00	kr210,00	
Kullager drivaxel, yttre	12,7x28x8 - 6001-12,7mm 2RS Kullager	2	kr55,00	kr110,00	
Kullager	12x28x8 - 6001 Kullager	6	kr45,00	kr270,00	
Skruvar (skruvcenter)	Rostfria muttrar, brickor och skruv	1	kr159,00	kr159,00	
Skruvar (skruvcenter)	Rostfria skruvar	1	kr41,00	kr41,00	
Electrokitfrakt	Frakt kostnad	2	kr29,00	kr58,00	
Motorer för lutning av huvud	Hitec HS-755HB	2	kr0,00	kr0,00	Givet av instutitionen
Motor för huvudrotation	Parallax Continuous Rotation Servo	1	kr0,00	kr0,00	Givet av instutitionen
Mikrokontrollerkort	Arduino UNO	1	kr0,00	kr0,00	Givet av instutitionen
Lim	Superlim Loctite All Plastics	12	kr0,00	kr0,00	Sponsring
Färgtilbehör	Penslar och kemikalier	1	kr0,00	kr0,00	Sponsring
Färg	Grundfärg och täckfärg	1	kr0,00	kr0,00	Sponsring
Skruvar och spännband	Skruvar och spännband	1	kr0,00	kr0,00	Sponsring
			SUMMA	kr5 676,55	