

DANMARKS TEKNISKE UNIVERSITET



031300 REGULERINGSTEKNIK

Rapport 3

Balance regulator

IRENE MARIE MALMKJÆR DANVY, s163905

FREDERIK ETTRUP LARSEN, s163920

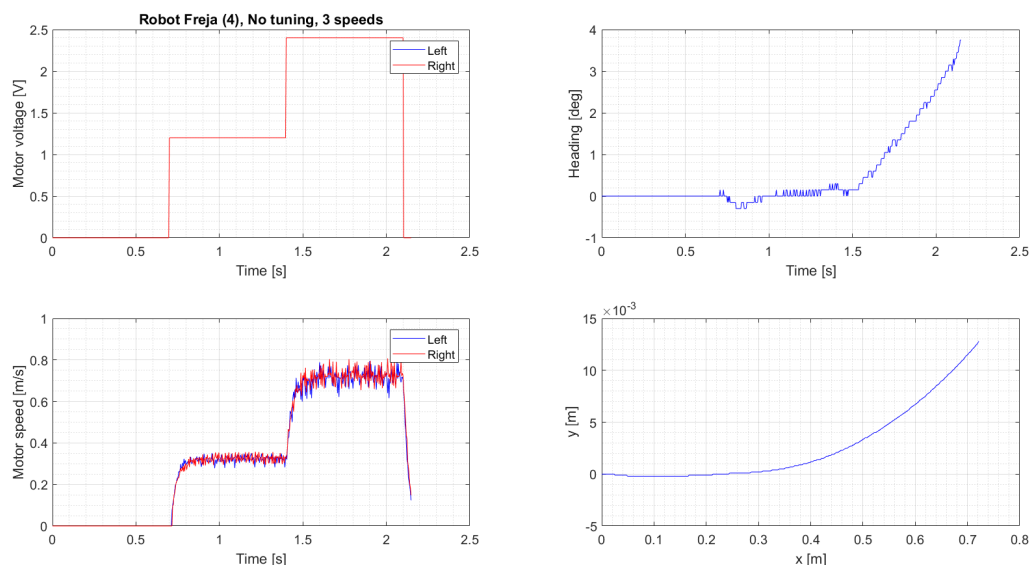
ASGER JOHAN KÜHL, s163933



2. maj 2018

Indhold

1	Kapitel 1: Introduktion, robot uden regulering	1
1.1	Indledning	1
1.2	Data fra kørsel med Freja	1
1.3	Firkantkørsel	1
1.4	Opsummering og kommentar	1
2	Kapitel 2: Håndtunet regulering	3
2.1	Fremgangsmåde	3
2.2	Kommentarer til resultater	4
2.3	Firkantkørsel	5
2.4	Opsummering og kommentarer	5
3	Kapitel 3, Revideret hastighedsregulator	6
3.1	Indledning til kapitel 3	6
3.2	Blokdiagram	6
3.3	Regulatordesign	6
3.4	Test af regulator	7
3.5	Kommentarer til resultatet	7
4	Kapitel 4, Balanceregulator	7
4.1	Blokdiagram og overføringsfunktion	9
4.2	Designovervejeleser	9
4.3	Regulatordesign	9
4.4	Resultater og vurdering	11
5	Kapitel 5, Hastighedsregulator i balance	14
5.1	Indledning	14
5.2	Blokdiagram og overføringsfunktion	14
5.3	Regulatordesign	16
5.4	Regulatortest og kommentarer	16
6	Kapitel 6, Konklusion	18



Figur 1: Freja kører lige med tre hastigheder, med hjulene opad og uden nogen regulering.

Kapitel 1: Introduktion, robot uden regulering

1.1 Indledning

Det følgende er en dokumentation af en øvelse i kurset 31300 Reguleringsteknik 1. Vi har arbejdet med regbot 04, Freja. Det er en trekantet, tohjulet robot, med en Pololu 25D (gearing 9.68:1) motor til hvert hjul. Dens motherboard er en Teensy 3.1, der kører med 96Hz. Den har ca. 30 kByte hukommelse.

1.2 Data fra kørsel med Freja

Vi har programmeret Freja til at køre ligeud med 3 hastigheder, 0 ms^{-1} , 0.3 ms^{-1} og 0.5 ms^{-1} , med hjulene opad. Den resulterende logdata er importeret til og plottet i matlab, se figur 1.

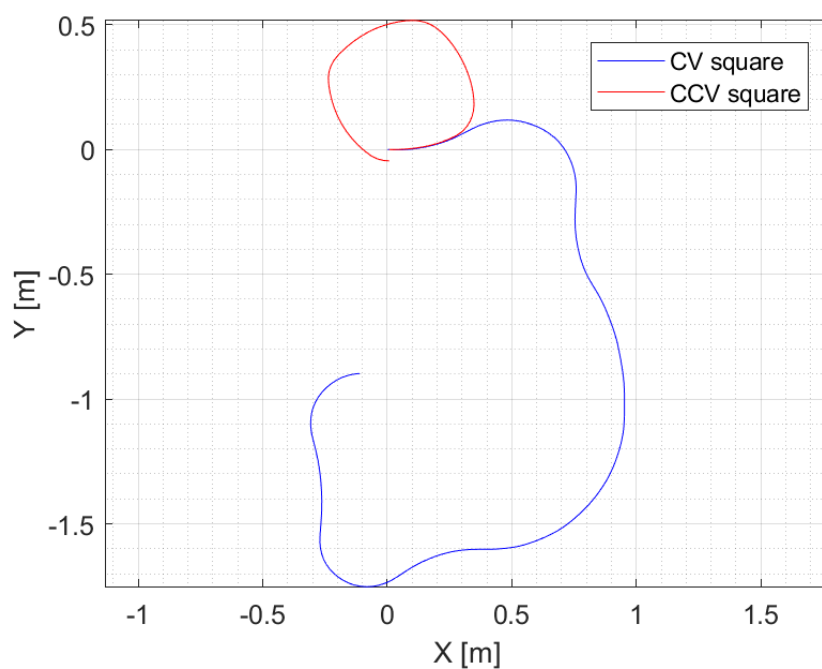
1.3 Firkantkørsel

Vi har også programmeret Freja til at køre to firkanter, en med uret og en mod uret. Freja kørte de programmerede firkanter, uden nogen form for regulering, og loggede dataen. Baseret på denne log er to plots blevet lavet. Et som viser positionen af Freja, fig. 2, og et som viser motor spændingen på hver motor, fig. 3. Afstandene fra start- til slutposition, henholdsvis i virkeligheden og ifølge robottens sensorer kan ses i tabel 1.

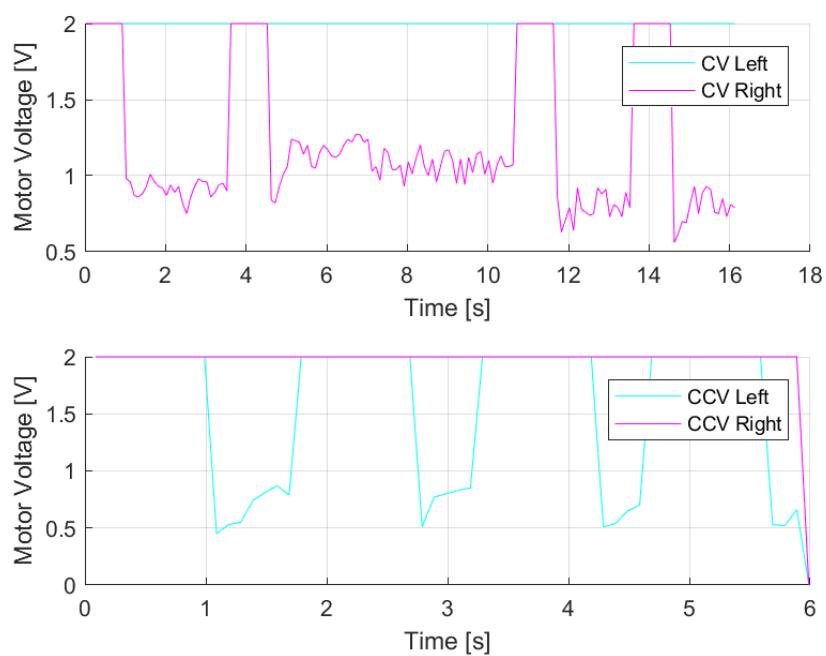
1.4 Opsummering og kommentar

Som det fremgår af figurene er Freja bedre til at køre mod uret, sandsynligvis pga forskelle mellem de to motorer og deres hjul. Siden der ingen regulering er for at rette op sådanne skævheder er det ikke overraskende at hun kører dårligt. Derudover bemærkes der at der

ikke er god overensstemmelse mellem den data der logges og virkeligheden, se tabel 1, sandsynligvis grundet at robotten laver hjulspin.



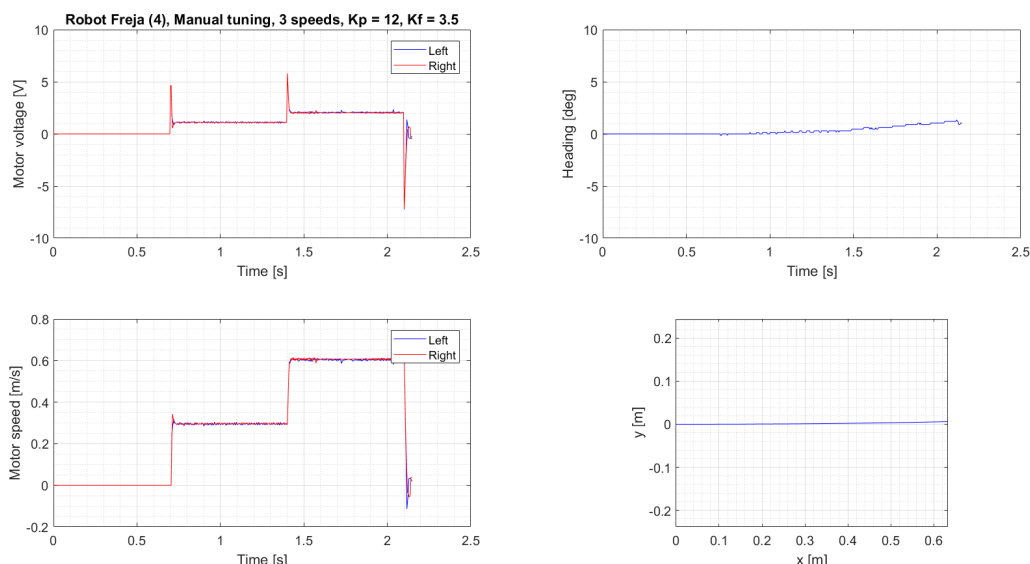
Figur 2: Freja's position i en firkantkørsel, idet hun starter i (0,0).



Figur 3: Motor spænding.

	Robot	CV	CCV
Afstand målt på gulv (start til slut)	Freja 04	175cm	12.0cm
Afstand optaget i log (start til slut)	Freja 04	89.7cm	4cm

Tabel 1



Figur 4: Plots over data opsamlet ved at køre robotten i en lige linje med hastigheden reguleret, men ikke retningen.

2 Kapitel 2: Håndtunet regulering

I dette kapitel ønskes det er regulere styringen af robotten således at den løbende regulerer den retning den kører i. Dette gøres ved at indføre en P-regulator der groft sagt sammenligner hvor meget hjulene har kørt rundt i forhold til hvor meget de burde køre rundt. Anderledes kan det siges at den arbejder ud fra odometri udregnet fra hjulene.

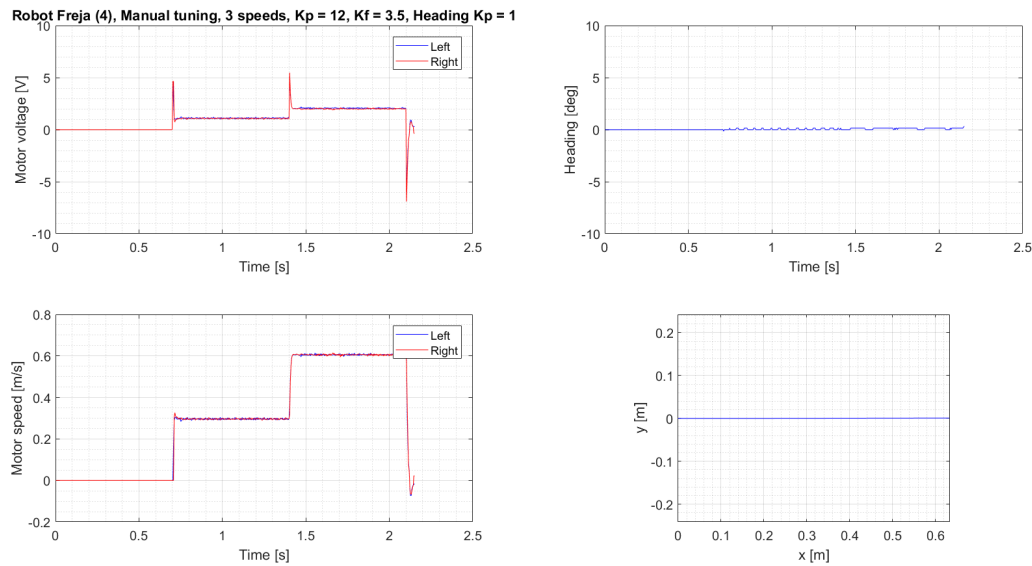
P-regulatoren ønskes indstillet således at der ikke kommer for meget støj på motorspændingen, at den kan køre roligt ligeud og at den holder den givne reference hastighed.

2.1 Fremgangsmåde

Der er først justeret på hastighedsregulatoren. Robotten er testet med hjulene opad, i en mission hvor den har accelereret til 0.3 m/s og derefter til 0.5 m/s. P-regulatorens værdi er herefter øget i skridt af 5 til der opstod meget støj på spændingen. Herefter blev den sat en smule ned. Med de fundne værdier for reguleringen har vi endnu engang kørt robotten fremad i tre hastigheder. Plottet af den resulterende data kan ses i fig. 4.

Herefter er der justeret på regulatoren der sørger for robotten holder en retning. Denne er justeret ved at robotten, med hjulene opad, er sat til at holde en hastighed, og så justere dens retning 10 grader, og derefter tilbage til 0 grader igen. Målet var at der blev drejet hurtigt nok til svinget kunne stabiliseres inden næste sving, og at der ikke var støj på motorspændingen når robotten stod stille.

Vi endte med at sætte $\tau_p = 12.5$, $\tau_i = 3.5$ og $T_p = 1$ (se tabel 2, 3 og 4 fra øvelsen). Med



Figur 5: Plot over data opsamlet ved at køre robotten i en lige linje med hastigheden og retningen reguleret.

disse værdier for reguleringen har vi endnu engang kørt robotten fremad i tre hastigheder. Plottet af den resulterende data kan ses i fig. 5.

2.2 Kommentarer til resultater

Hvis man sammenligner figur 1 og 4, ses det at der er en meget lige og meget flot motor-spænding uden regulering, men at der er meget støj på motorhastigheden. Efter reguleringen er der markant mindre støj, og derudover er motorhastigheden mere firkantet. Som en uforventet effekt, kører robotten også mere ligeud, hvilket må skyldes at de to motorer ikke er fuldstændigt ens, og når de så bliver reguleret kører de mere ens.

Robottens hastighedsregulator	
K_p	$12 \frac{\text{volt}}{\text{m s}^{-1}}$
K_{ff}	$3.5 \frac{\text{volt}}{\text{m s}^{-1}}$
Stigetid fra 0.3 til 0.45 ms^{-1}	0.008s
gennemsnitlig acceleration	18.7 ms^{-2}

Tabel 2: Data fra øvelse 2 del 1

Robottens retningsregulator	
K_p	$1 \frac{\text{volt}}{\text{m s}^{-1}}$
K_{ff}	$0 \frac{\text{volt}}{\text{m s}^{-1}}$
10° svingningstid	0.125s
Peak turnrate	2 rad/s

Tabel 3: Data fra øvelse 2 del 2

Robot		
	hastighedsregulator	retningsregulator
K_p	12 $[\text{Vm}^{-1}\text{s}]$	1 $[\text{ms}^{-1}\text{rad}^{-1}]$
Output limit	9 [V]	9 [V]
Feed forward	3.5 $[\text{Vm}^{-1}\text{s}]$	0 $[\text{ms}^{-1}\text{rad}^{-1}]$

Tabel 4: Data fra begge dele af øvelse 2

2.3 Firkantkørsel

Efter at have fundet nogle passende værdier til regulering ved Trial and Error kørte vi endelig firkant på gulvet. Det resulterende plot kan ses i fig. 6.

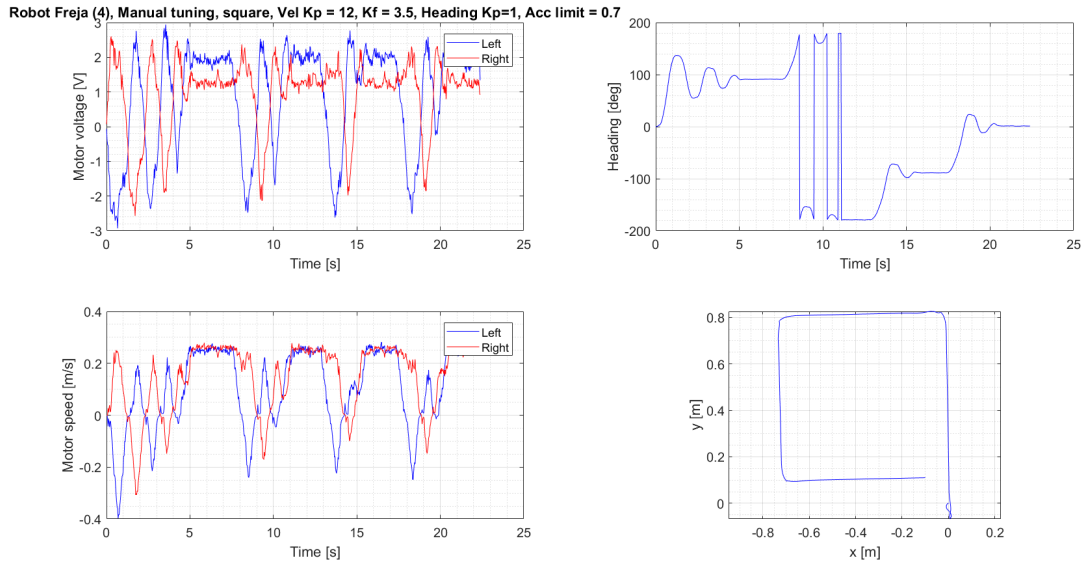
En god ting at notere, er at når robotten opsamler data om dens retning, behandler den det således at alle punkter ligger mellem 180 og -180 grader, hvilket er meget tydeligt på dette plot.

På samme retningsplot, kan det også ses at når robotten har foretaget et sving, er der en meget tydelig indsvingningstid, der varierer mellem 5 og 2 sekunder. Det ses også at firkanten er en smule skæv, hvilket sandsynligvis skyldes at robotten forskydes i enten x- eller y-retningen når der svinges. Tilgængæld kører robotten i 4 rette linjer, hvilket var målet med opgaven.

2.4 Opsummering og kommentarer

Vi har reguleret hastighed og drejning på Freja vha. af håndtuning, og kørt test for at se effektiviteten.

Vi ser at Freja kører meget mere stabilt med regulering, både ifølge egne målinger og, i mindre grad, i virkeligheden. Desuden ser vi også, at det kræver yderligere regulering end den vi har implementeret. Da denne løsning tydeligvis ikke har ført til en effektiv firkantkørsel.



Figur 6: Plot over data opsamlet når robotten har kørt en firkant på gulvet.

3 Kapitel 3, Revideret hastighedsregulator

3.1 Indledning til kapitel 3

I dette kapitel bliver hastighedsregulatoren revideret med udgangspunkt i den opdaterede simulinkmodel af regbotten. Det gennemgås hvordan regulatoren er designet ud fra en overføringsfunktion, der er genereret ud fra computermodellen. Efter regulering sammenlignes robottens virkelige kørsel så med simuleringen udført på modellen.

3.2 Blokdiagram

Vi har benyttet den udleverede motormodel, uden at ændre i den. Blokdiagrammet kan ses på figur 7, hvor at den valgte regulator også fremgår.

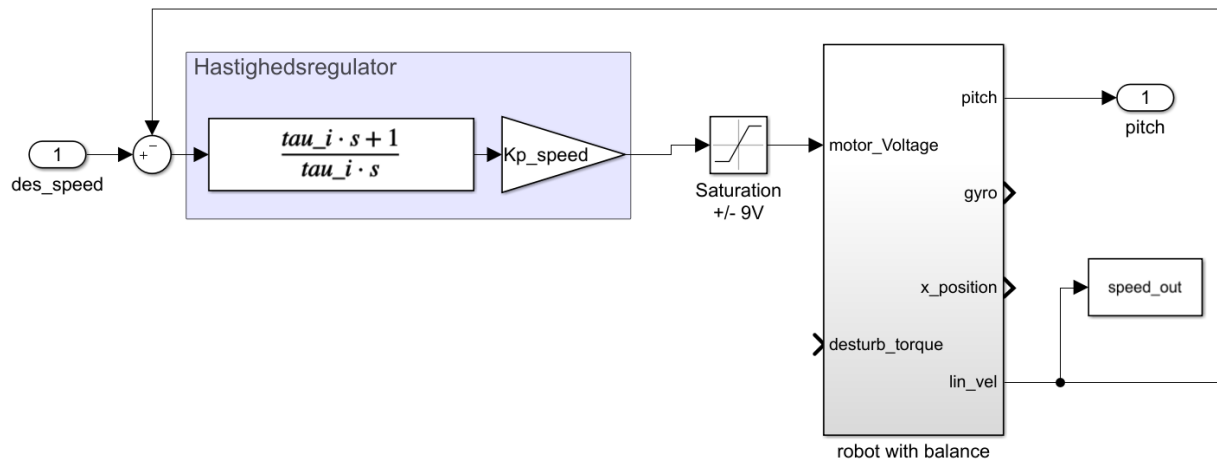
Matlab benyttes så til at lave en lineariseret overføringsfunktion fra motorspænding til linear hastighed, hvilket giver overføringsfunktionen:

$$\frac{1443s^3 + 1.443 \cdot 10^6 s^2 - 9.11 \cdot 10^4 s - 9.11 \cdot 10^7}{s^5 + 1800s^4 + 6.559 \cdot 10^5 s^3 + 5.21 \cdot 10^6 s^2 - 4.848 \cdot 10^7 s - 3.374 \cdot 10^8} \quad (1)$$

3.3 Regulatordesign

Ud fra den lineariserede overføringsfunktions bodeplot, på figur 9a samt dens poler som kan ses på figur 9b, ses det for det første at der ikke er en krydsfrekvens, og det ses at der er en pol i RHP.

Hovedmålet med denne regulator er at den skal være langsom nok til ikke at påvirke balancen alt for meget. Ud fra dette har vi valgt ikke at benytte et lead-led, og istedet kun lave en PI-regulator, hvor at I-leddet er den største påvirkning, da det er betydeligt langsommere end et P-led.



Figur 7: Blokdiagram over den udleverede motormodel samt hastighedsregulator

Vi vælger så en række værdier at lave en regulator ud fra, som er angivet i tabel 5. Dette ændrer bodeplottet, til det der ses på figur 8, hvor det ses at der er en stor fasemargin, på 77° , ved krydsfrekvensen der er ved 28.5 rad/s .

ω_c	rad/s
N_i	5
τ_I	0.071
K_p	12

Tabel 5: Regulatorværdier for hastighedsregulatoren

3.4 Test af regulator

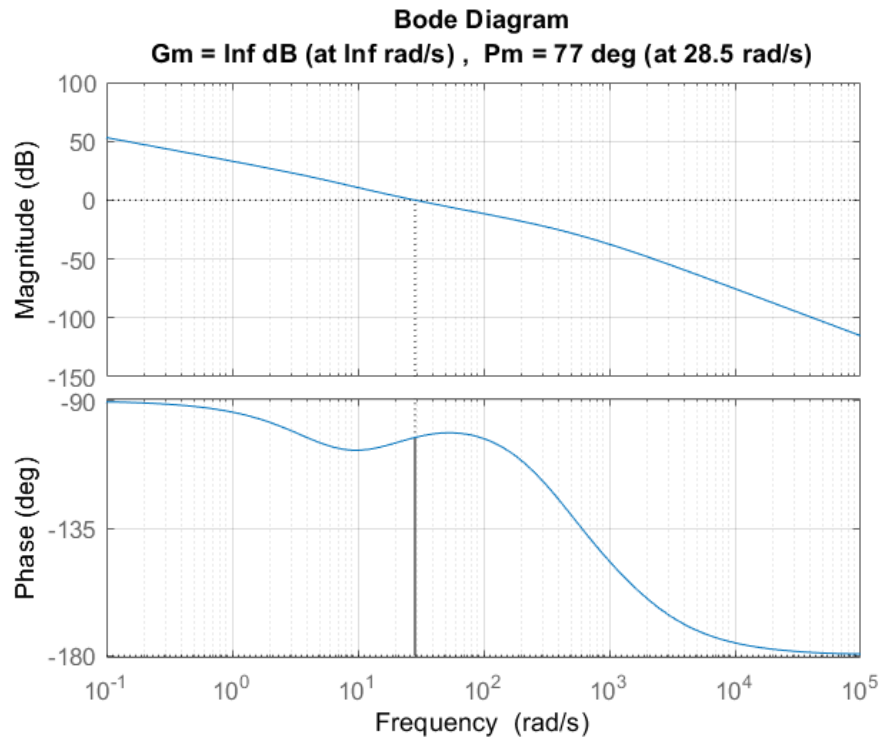
Regulatoren er testet ved at sætte regbotten til at køre $0.3 \frac{m}{s}$ i $0.15s$, og derefter øge hastigheden til $0.6 \frac{m}{s}$. Dette er sammenlignet med det samme program kørt i simulatoren. Motorhastigheden kan ses på figur 10a og motorspændingen kan ses på figur 10b.

3.5 Kommentarer til resultatet

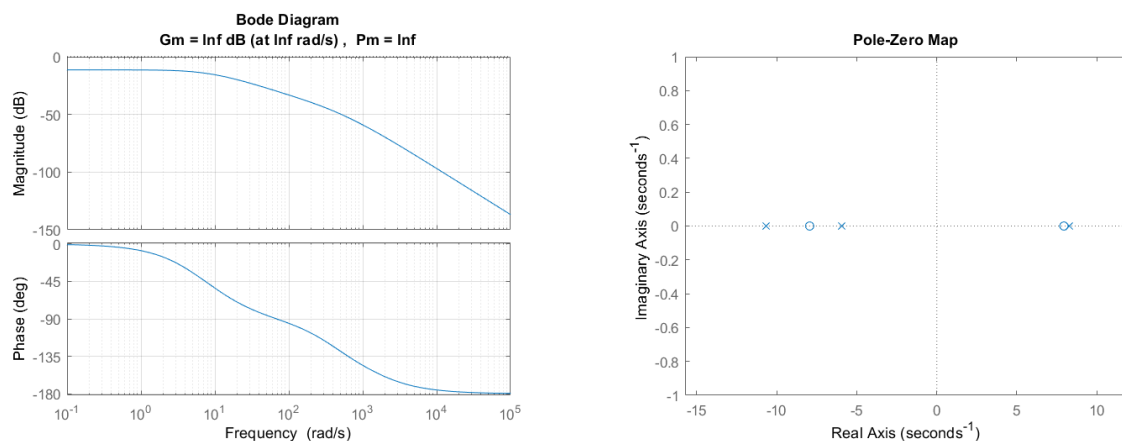
De opnåede regulatorparametre gør at regbottens hastighed bliver justeret på omkring $0.02s$, hvilket forhåbentligt betyder den er langsom nok til ikke at komme i vejen for de andre regulatorere, og så at motorspændingen ikke bliver justeret for voldsomt.

4 Kapitel 4, Balanceregulator

Dette kapitel giver et overblik over udviklingen af balanceregulatoren. Balanceregulatoren er lavet på baggrund af den udleverede simulinkmodel, med en hastighedsregulator hvis design er beskrevet i det foregående kapitel. Ud fra denne model tages der udgangspunkt i en lineariseret overføringsfunktion, som der designes en regulator til, der så derefter bliver testet først i den ulinære simulering, og derefter i virkeligheden. Der ønskes en regulator der



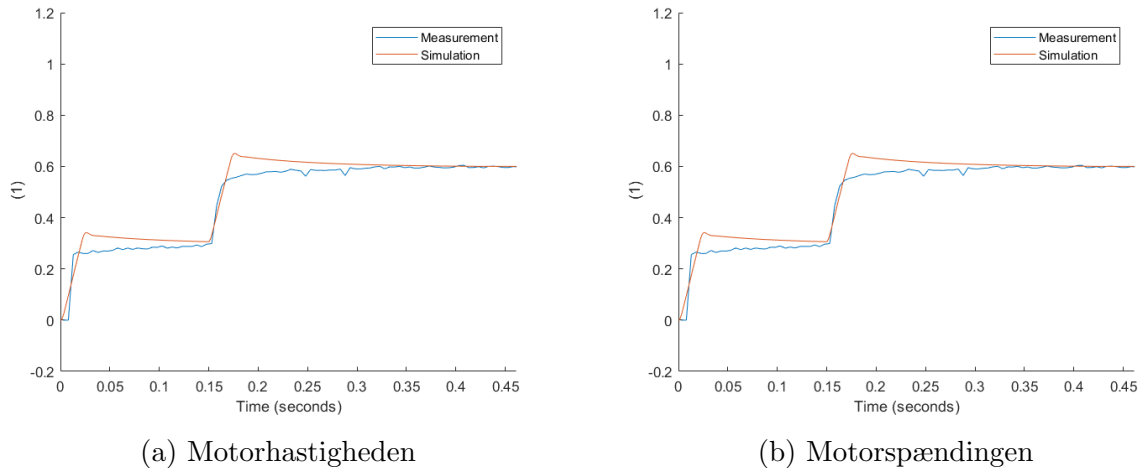
Figur 8: Bodeplot af den hastighedsregulerede model, fra motorspænding til linear hastighed



(a) Bodeplot af den lineariserede overføringsfunktion fra motorspænding til linear hastighed.

(b) Den lineariserede overføringsfunktion fra motorspænding til linear hastigheds poler og nulpunkter.

Figur 9: Plots der er relateret til den lineariserede overføringsfunktion fra motorspænding til linear hastighed



Figur 10: Test af hastighedsregulatoren i simuleringen og på regbotten

sørger for at robotten kan balancere, men der behøves ikke tages højde for hvor robotten er, eller hvor hurtigt den kører.

4.1 Blokdiagram og overføringsfunktion

Vi tog udgangspunkt i den hastighedsregulerede simulink model der ses i figur 7. Den blev lineariseret i matlab, fra reference hastigheden til tilt-vinkel ('pitch'), hvilket gav overføringsfunktionen der ses i ligning 2.

$$G_{sp} = \frac{-2.004 \cdot 10^5 s^3 - 2.162 \cdot 10^8 s^2 - 2.989 \cdot 10^9 s - 1.342 \cdot 10^7}{s^6 + 1800s^5 + 6.732 \cdot 10^5 s^4 + 2.277 \cdot 10^7 s^3 + 1.93 \cdot 10^8 s^2 - 1.446 \cdot 10^9 s} \quad (2)$$

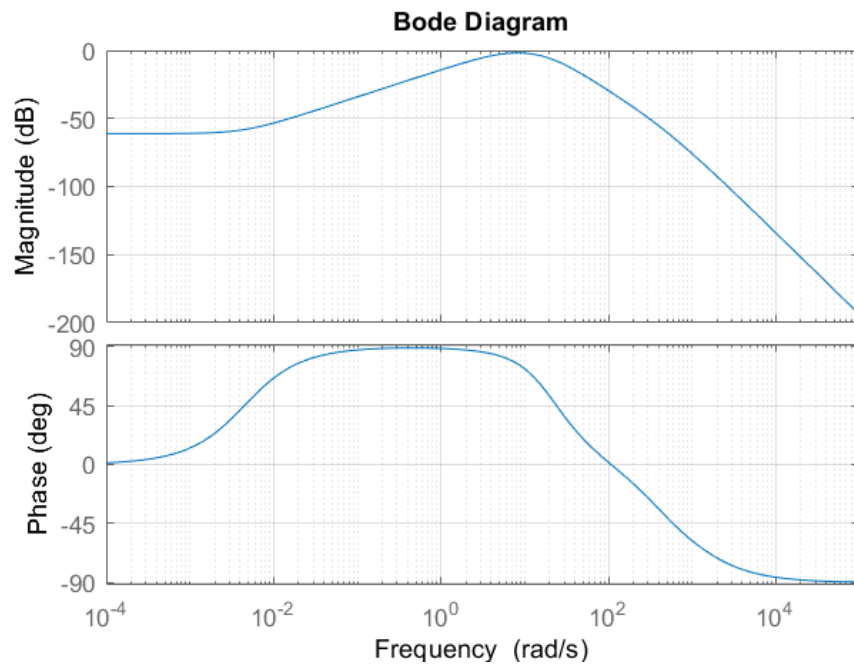
Denne linearisering har bodeplottet der ses i figur 11 og Nyquistplottet der ses i figur 12.

4.2 Designovervejelser

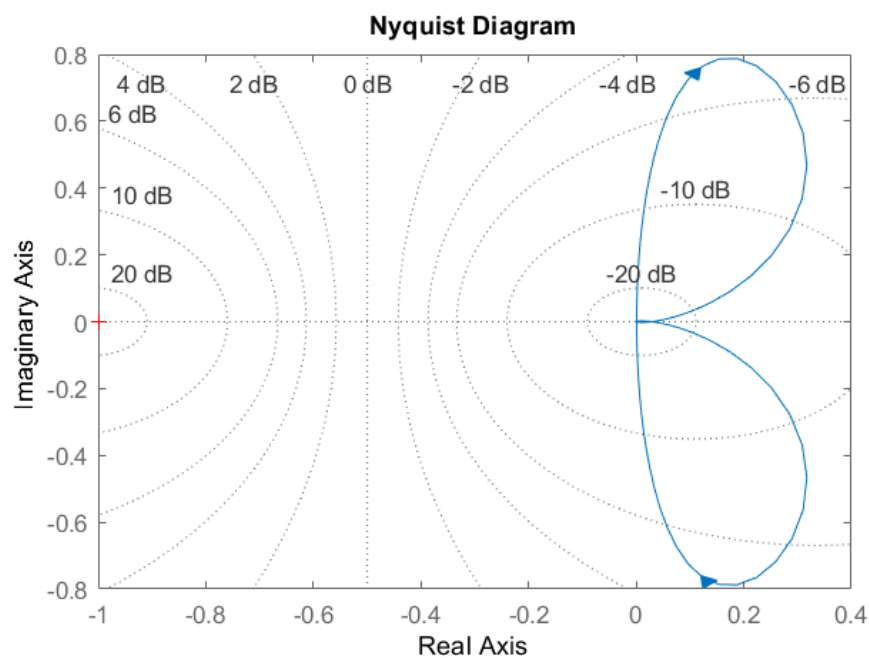
Vi ønsker at lave en regulator der reagerer hurtigere end hastighedsregulatoren, således den kan reagere på robottens balance. Ved at se på bodeplottet på figur 11, ses det at amplituden starter lavt, og stiger omkring de $10 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$, hvorefter den falder igen. Dette pukkel vil vi gerne reducere, hvilket kan gøres ved at indføre et integrator-led ved pukkelen top, således at der ikke er en opstigning til det. Vi ser også at der er en pol i RHP, hvilket gør at resten af denne regulering laves ud fra funktionens Nyquist plot, som ses på figur 12. Her ses det også at funktionen ikke bevæger sig mod uret omkring $(-1,0)$, hvilket betyder at systemet er ustabil. Til at forme dette benyttes endnu et integrator-led, og et lead led. Lead-leddet benyttes samtidig til at gøre systemet hurtigere til at reagere på fejl.

4.3 Regulatordesign

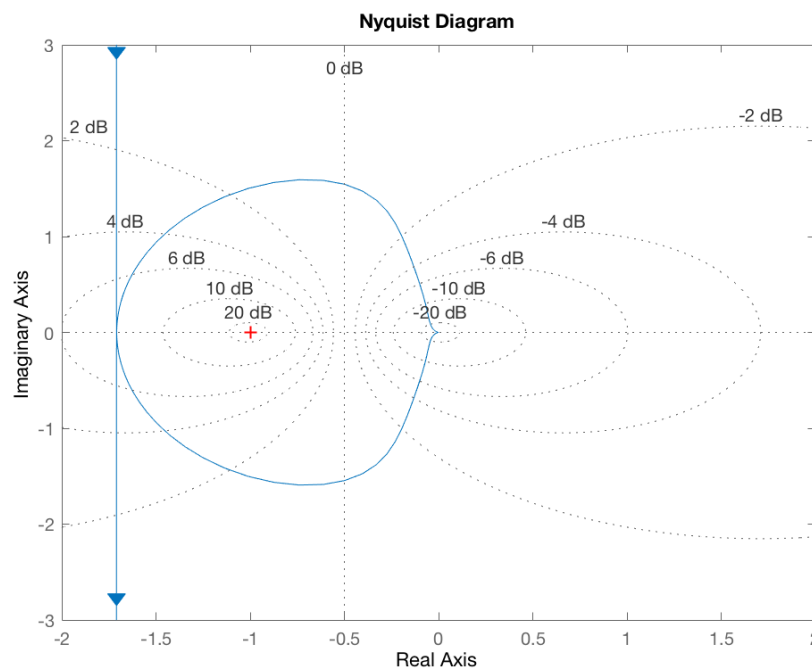
Regulatoren har, som tidligere nævnt, et P-led, et lead-led og to I-led. Deres parametre ses i tabel 6, hvilket resulterer i et Nyquist plot som det der ses på figur 13. Det bemærkes at Nyquists stabilitetskriterie overholdes, idet -1 omløbes netop en gang, svarende til den uregulerede overføringsfunktionens ene pol i højre halvplan. Det endelige design kan ses i figur



Figur 11: Bodeplot af overføringsfunktionen fra hastighedsregulatorens input til robottens vinkel ("pitch").



Figur 12: Nyquist plot af overføringsfunktionen fra hastighedsregulatorens input til robottens vinkel ("pitch").



Figur 13: Nyquist plot af open-loop overføringsfunktionen fra hastighedsregulatorens input til robottens vinkel ("pitch"), efter reguleringen.

Beskrivelse	Navn	Værdi
Krydsfrekvensen til det første I-led	ω_c	$70 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$
N_i brugt til det første I-led	N_i	3
Krydsfrekvensen til det andet I-led	ω_{c2}	$15 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$
Krydsfrekvens til lead-leddet	ω_{c3}	20
α brugt til Lead leddet	α_b	1

Tabel 6

14. Det bemærkes at lead-leddet er lavet ved brug af gyroskopets output, da det svarer til det differentierede pitch. Denne eksistens af et differentieret output tillader os at lave et direkte leadled i formen $\tau_d s + 1$ uden at gøre systemet ustabil med en differensiator, hvor vi normalt ville være nødsaget til at lave et lead-led på formen $(\tau_d s + 1)/(\alpha \tau_d + 1)$.

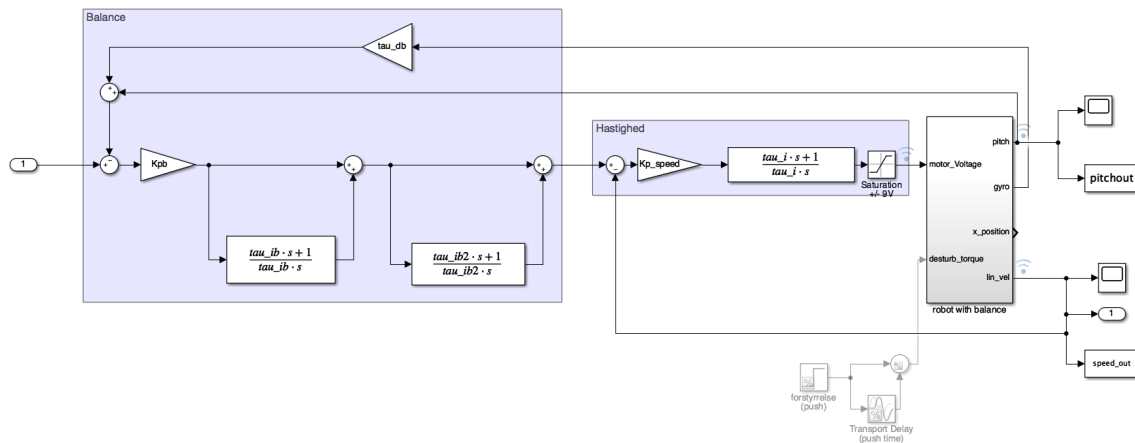
Lead-leddet er med vilje sat ved en lav frekvens, da robotten ellers ville vibrere når den var i balance.

4.4 Resultater og vurdering

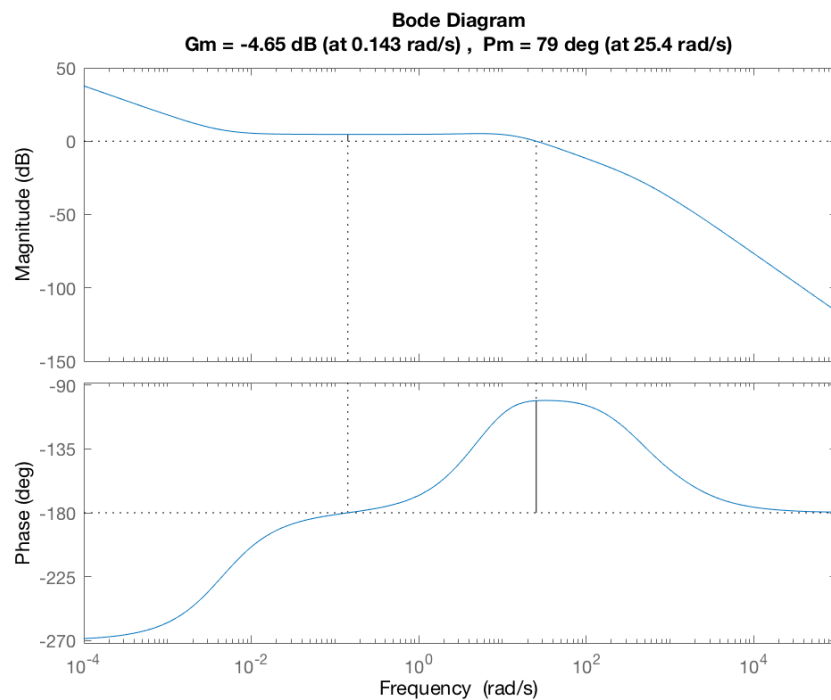
Den regulerede lineariserede model's open loop bodeplot kan ses i figur 15 og en graf over closed loop indsvingningen fra tiltet position kan ses både simuleret og på regbotten i figur 16.

Det er simuleret ved at regulere det som det ses i simulinkmodellen på figur 14.

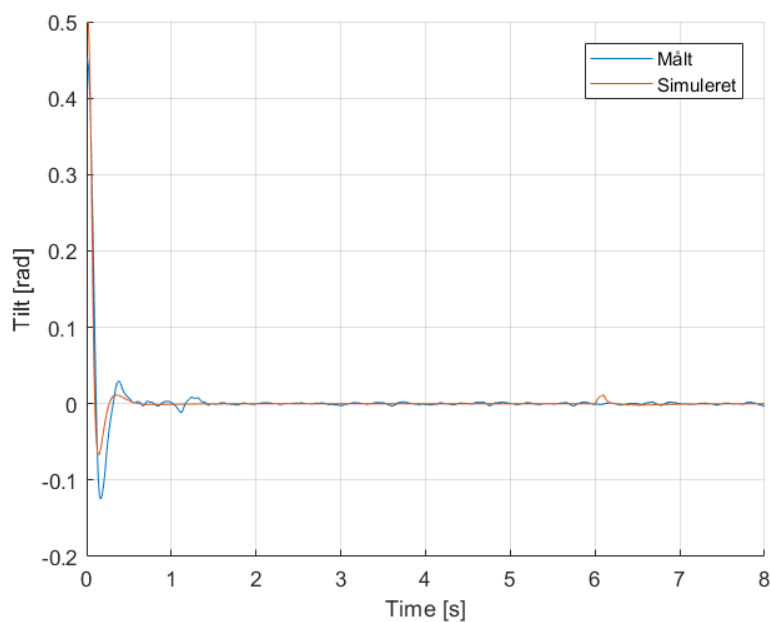
Først bemærkes det at Freja opfører sig meget lig simuleringen, som det ses på figur 16, det skal dog nævnes at Freja laver et større oversving, og dermed har en længere indsvingnings-



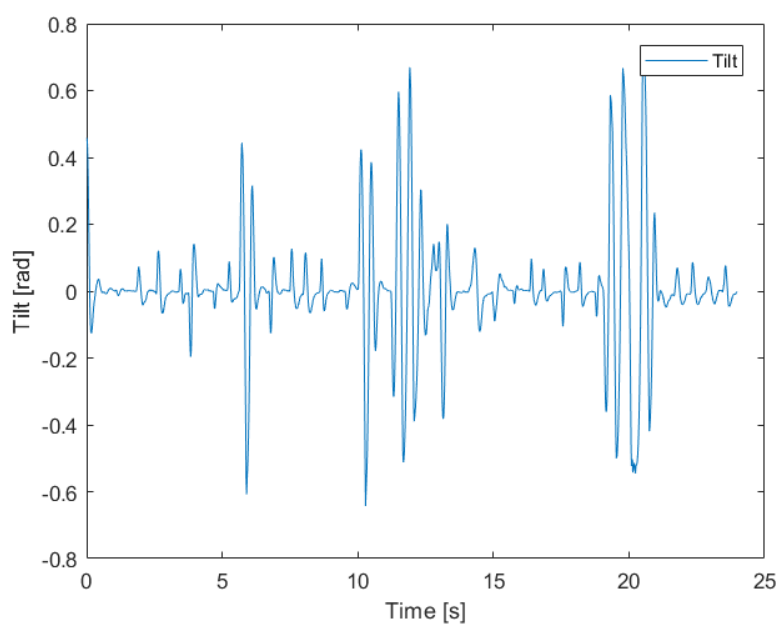
Figur 14: Simulinkmodellen af regbotten med hastighedsregulator og balanceregulator.



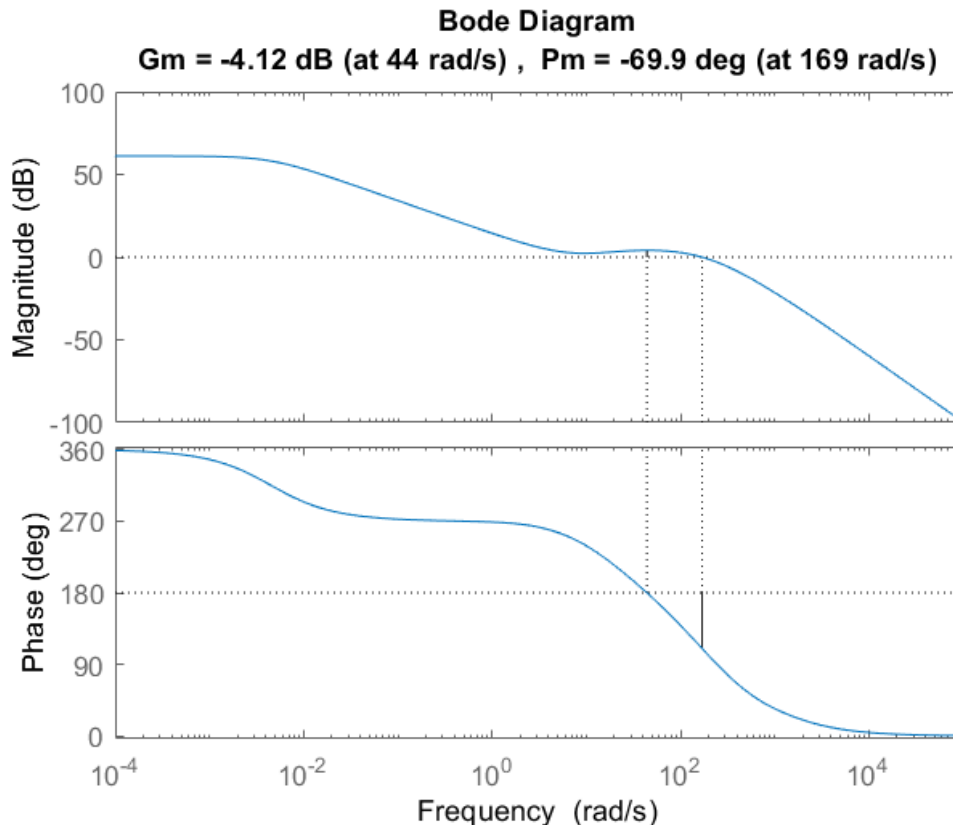
Figur 15: Open loop bodeplottet af den balanceregulerede model. Det ses at π -frekvensen er $0.149 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ og at krydsfrekvensen er $25.4 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$.



Figur 16: Balananceindsvinging, simuleret og på regbotten, med en simuleret forstyrrelse ved 6s



Figur 17: Data fra en 30 sekunders testkørsel med hastigheds- og balance regulatorer, et program der sætter 'bal = 1' og 'vel=0', og ekstern forstyrrelse i form af mennesker der slår til robotten



Figur 18: bodeplot for vores lineariserede uregulerede overføringsfunktion af den hastigheds- og balanceregulerede simulinkmodel.

tid. Med denne regulering kan Freja stabilt holde balancen, og genopnå den ved eksterne forstyrrelser, som det sås på figur 17, hvor at Freja blev påvirket med eksterne skub, uden at vælte. Det noteres dog at Freja ikke har stået stille i de fleste af disse tests, da der endnu ikke er implementeret en hastigheds-balanceregulator, hvilket er som forventet.

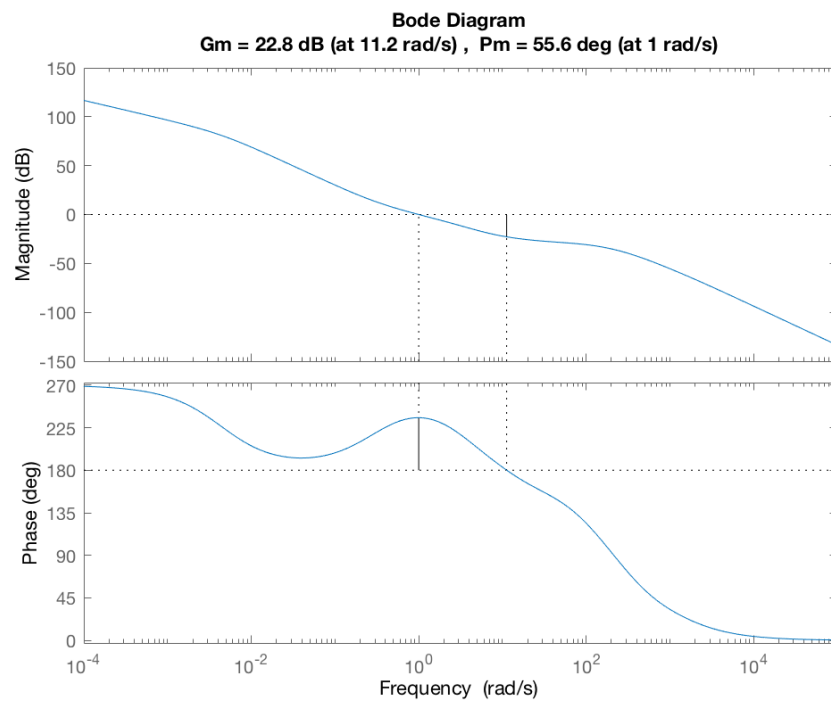
5 Kapitel 5, Hastighedsregulator i balance

5.1 Indledning

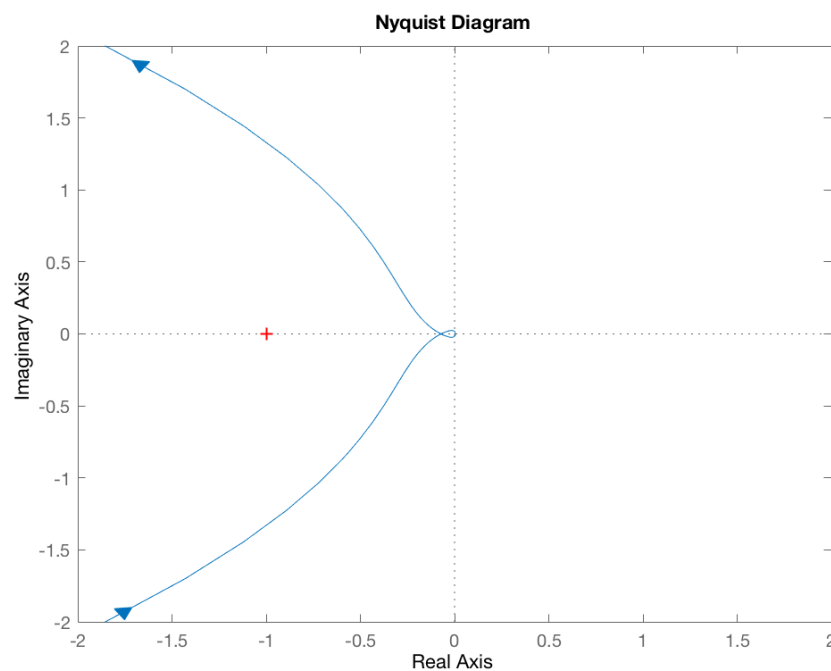
Her beskrives vores design af en hastighedsregulator, der er designet til at robotten kan balancere og samtidig køre med en bestemt hastighed. Dette gøres ved at styre tilt-referencen til balanceregulatoren, hvilket også medfører at denne regulator ikke må være for aggressiv. Der tages udgangspunkt i den regulator der er beskrevet i det forangående kapitel, og den simulink model som er beskrevet på figur 14.

5.2 Blokdiagram og overføringsfunktion

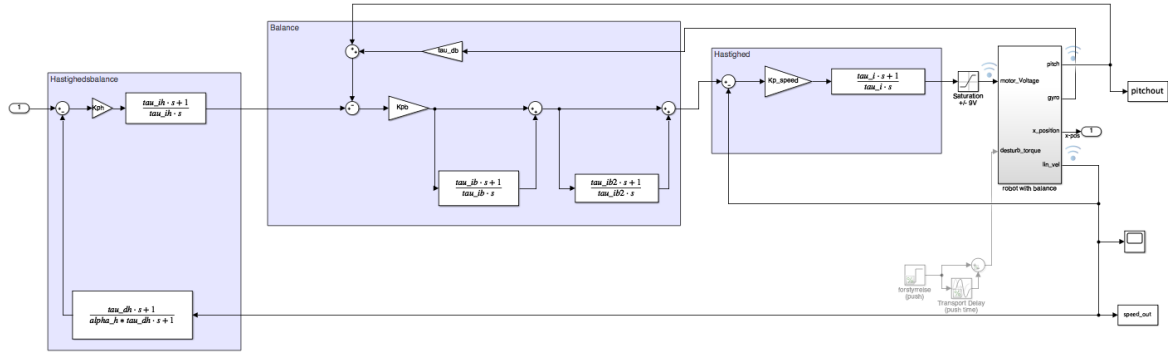
I figur 14 ses blokdiagrammet for modellen vi i det følgende regulerer på. Det har den lineariserede overføringsfunktionen der ses i ligning 3, som er fundet ved hjælp af Matlab..



Figur 19: Bodeplot for den lineæriserede regulerede overføringsfunktion af den hastigheds- og balanceregulerede simulinkmodel.



Figur 20: Nyquist plot for den lineæriserede regulerede overføringsfunktion af den hastigheds- og balanceregulerede simulinkmodel.



Figur 21: Simulinkmodellen af regbotten med hastighedsregulator, balanceregulator og hastighedsbalanceregulator.

Beskrivelse	Navn	Værdi
Krydsfrekvensen til lead-led	ω_c	$1 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$
α brugt til Lead leddet	α	0.1
N_i brugt til I-led	N_i	5
Krydsfrekvens til I-led	ω_i	$300 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$
P-led	K_p	0.002

Tabel 7: Paramter for hastighedsbalance regulator

$$G_{vw}(s) = \frac{(-1.039 \cdot 10^5 s^6 - 1.068 \cdot 10^8 s^5 - 2.943 \cdot 10^9 s^4 - 1.692 \cdot 10^{10} s^3 + 1.438 \cdot 10^{11} s^2 + 1.494 \cdot 10^{12} s + 2.677 \cdot 10^{12})}{(s^8 + 1800 s^7 + 7.333 \cdot 10^5 s^6 + 8.967 \cdot 10^7 s^5 + 3.323 \cdot 10^9 s^4 + 4.947 \cdot 10^{10} s^3 + 3.026 \cdot 10^{11} s^2 + 5.238 \cdot 10^{11} s + 2.347 \cdot 10^9)} \quad (3)$$

Bodeplottet for denne funktion kan ses i figur 18.

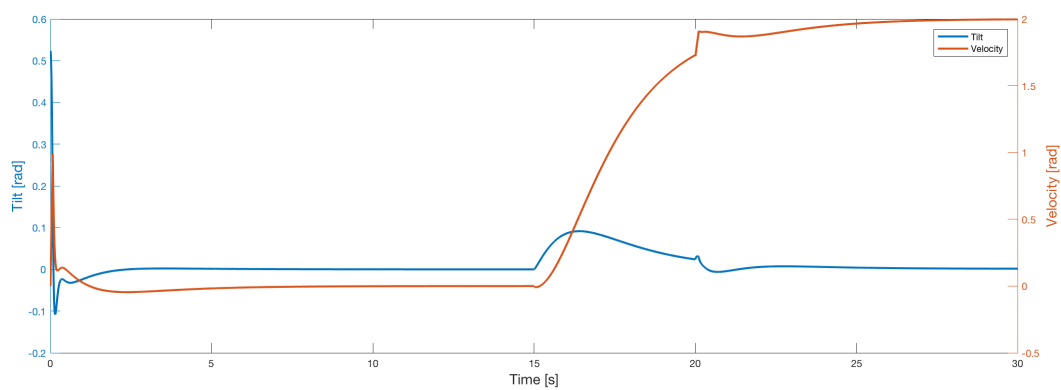
5.3 Regulatordesign

I figur 18 ses bodeplottet for den overføringsfunktion som vi prøver at regulerer på. Umiddelbart er vi ikke synderligt interesseret i amplituden har den pukkel der ses omkring $100 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$. Den undertrykkes ved at bruge et I-led med en frekvens som er større end det flade område. Vi vælger frekvensen $300 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$, og en N_i på 5.

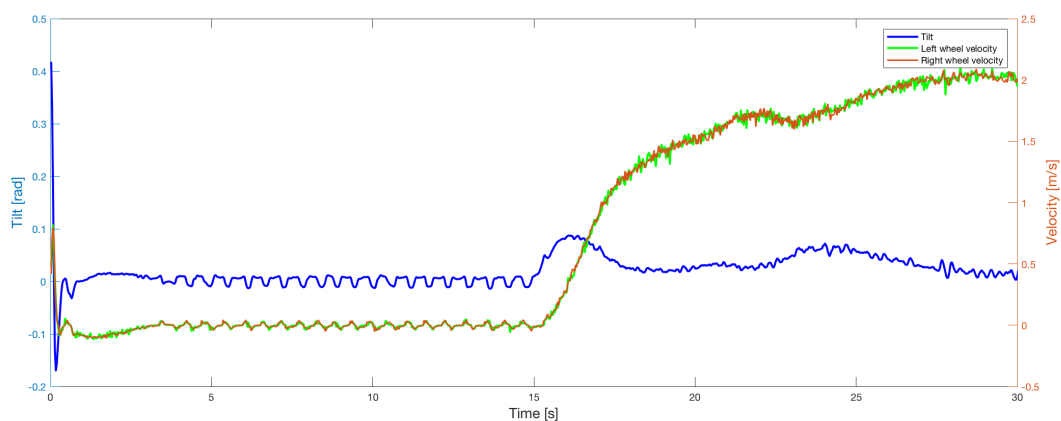
Dette system er ret ustabilt, men ved at tilføje et lead-led ved $1 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ med $\alpha = 0.1$, og et P-led der trækker krydskrekvensen ned til $1 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$, blev systemet gjort stabilt. Det regulerede system har et bodeplot som det ses i figur 19 og et Nyquistplot der ses i figur 20. Alle vores valgte tal kan ses i tabel 7, og den resulterende simulinkmodel kan ses i figur 21.

5.4 Regulatortest og kommentarer

Regbotten blev kørt og simuleret i 30 sekunder, hvor den først havde hastigheden $0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ i 15 sekunder og derefter hastigheden $2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ i 15 sekunder. Dataen fra de disse kørsler er plottet i



(a) Simuleret data



(b) Logget data

Figur 22: Data fra en 30 sekunder mission, hvor robotten bedes stå stille i 15 sekunder og så bedes have hastigheden 2.0 i 15 sekunder.

figur 22, hvor der ses at modellen har en mindre voldsom indsvingning end regbotten selv, og generelt holder en mere stabil balance hvor regbotten 'hakker' mere, som det specielt ses i 5 til 15 sekunder. Det er at forvente når man lineariserer et virkeligt system. Begge systemer er dog tydeligvis stabile.

6 Kapitel 6, Konklusion

I denne rapport har vi beskrevet hvordan der er udarbejdet en regulator til den tohjulet robot, som enten kaldes regbotten eller Freja, således at den kan holde balancen og køre med en bestemt hastighed. Dette er gjort ud fra en simulink model af regbotten, hvorefter det er testet på den virkelige robot. Reguleringen er lavet i flere skridt, som er beskrevet individuelt i hvert kapitel. De reguleringskonstanter der til sidst har givet en stabil regulering, er opsummeret i tabel 8, hvorfra det også ses at der er benyttet flere regulator typer, navnlig PI, PIID og PID. En kørsel af regbotten kan ses på video på følgende link: youtu.be/76DStdzzLOk. Det ses dermed at der er udarbejdet og testet en stabil og hurtig regulator, som opfylder kravet om at regbotten skal kunne balancere sikkert, og genoprette balancen fra at den ligger ned.

Hastighedsregulatoren	
K_p	12
τ_I	0.071
Balanceregulatoren	
K_p	-1.5
τ_{I1}	0.0429
τ_{I2}	0.2
τ_D	0.05
α	0.07
Hastighed i balance regulator	
K_p	0.001
τ_I	0.0167
τ_D	3.1623
α	0.1

Tabel 8: Oversigt over regulatorværdier