

Jakob Mahler Hansen

Visionstyret malerobot

Malerobot til optegning af boldbaner

Bachelorprojekt, Juni 2010

Jakob Mahler Hansen

Visionstyret malerobot

Malerobot til optegning af boldbaner

Bachelorprojekt, Juni 2010

Dansk titel: **Visionstyret malerobot, Malerobot til optegning af boldbaner**
Engelsk Titel: **Vision-Controlled Painting Robot**

Rapporten er udarbejdet af:
Jakob Mahler Hansen

Vejledere:
Nils Axel Andersen
Ole Ravn

DTU Elektro
Automation and Control
Elektrovej, byg. 326
Danmarks Tekniske Universitet
2800 Kgs. Lyngby
Denmark

studieadministration@elektro.dtu.dk

Projektperiode: 01.02.2010 - 30.06.2010

ECTS: 15

Uddannelse: Bachelor i teknisk videnskab (BScE)

Retning: Elektroteknologi

Klasse: Offentlig

Bemærkninger: Denne rapport er indleveret som led i opfyldelse af kravene til ovenstående uddannelse på Danmarks Tekniske Universitet.

Rettigheder: © Jakob Mahler Hansen, 2010

Abstract

Kløvermarkens Forende Boldklubber (KFB) manages and takes care of many playing fields. These fields have to be repainted often, which is a tedious process. The fields are painted with a reference to an existing stripe or a white rope, which is used when painting new fields.

This project is about the design, development and construction of an autonomous painting robot. The painting robot is mounted on the side or the front of a golf car and is to fine-tune the position of the painting gear so that it is placed directly over the existing stripe. The tasks of the driver is reduced to keeping the car approximately parallel to the stripe or rope.

The project consists of three parts; the mechanical part of the robot, the image processing and the regulation of the robot. The mechanical part of the robot is constructed using plain bearings and a toothed belt. The image processing identifies and localizes the stripes or the rope from pictures taken with a mounted camera. The regulating of the robot is simulated in Simulink, where a high precision regulator is designed.

By introducing the constructed painting robot in the painting-process, it will make it easier to gain accurate painting and make the work process less demanding for the KFB employees.

Resumé

Kløvermarkens Forende Boldklubber varetager og vedligeholder en del boldbaner. Disse boldbaner skal jævnligt optegnes, hvilket er en ensformig proces. Der optegnes enten efter eksisterende streger eller efter en hvid snor der f.eks. benyttes til anlæggelse af nye baner.

Dette projekt omhandler design, udvikling og konstruktion af en automatisk malerobot. Malerobotten, der monteres på siden eller fronten af en golfbil, har til opgave at finjusterer positionen af maleudstyret, således at dette er placeret direkte over den tidligere streg. Føreren af golfbilen har fået reduceret sin opgave til at køre tilnærmelsesvist parallelt med strengen eller snoren.

Projektet indeholder tre dele: den mekaniske del af robotten, billedbehandlingen og reguleringen af robotten. Den mekaniske del af robotten er konstrueret ved hjælp af glidelejer og et tandremstræk. Billedbehandlingen identificerer og lokaliserer stregerne eller snoren ud fra billeder taget med et fastmonteret kamera. Reguleringen af malerobotten er simuleret i Simulink, hvor der er designet en regulator, der sikrer stor nøjagtighed under optegning.

Den konstruerede malerobot vil, ved indførelse i optegningsprocessen, gøre det lettere at opnå mere præcis optegning og gøre arbejdsprocessen mindre krævende for KFB's personale.

Indholdsfortegnelse

Indhold

Abstract	3
Resumé	5
Indholdsfortegnelse.....	7
Figurliste	10
1. Introduktion.....	11
1.1 Problemformulering	11
1.2 Afgrænsning.....	11
1.3 Arbejde af andre	12
2. Analyse	13
2.1 Arbejdsprocessen	13
2.2 Mk1.....	13
2.3 Mekaniske krav	14
2.4 Montering	15
2.5 Drevet	15
2.6 Forslag.....	17
2.6.1 Forslag 1 - Sidemonteret.....	17
2.6.2 Forslag 2 - Sidemonteret.....	18
2.6.3 Forslag 3 - Sidemonteret.....	18
2.6.4 Forslag 4 - Frontmonteret.....	18
2.6.5 Forslag 5 - Frontmonteret.....	19
2.6.6 Sammenligning	19
3. Løsningsforslag	21
3.1 Gearmotor	21
3.2 Styring.....	22
3.3 Tandrem og tandremshjul	22
3.4 Glidelejer.....	24
3.5 Kamera	25
3.6 Det samlede system.....	25
3.6.1 Vedligeholdelse.....	26
3.7 Delkonklusion	26
4. Billedbehandling	27
4.1 Billedbehandlings teori	27

4.1.1 Billedopbygning	27
4.1.2 Thresholding og binære billeder.....	28
4.2 Analyse.....	28
4.3 Implementering	29
5. Simulering.....	33
5.1 Koordinatsystemer	33
5.2 Bilmodel.....	34
5.3 Motormodel.....	35
5.4 Regulatorer	37
5.4.1 P-regulator	38
5.4.2 PI-regulator	38
5.4.3 PID-regulator.....	38
5.5 Samlet model.....	39
6. Tests.....	41
6.1 Mekaniske dele	41
6.1.1 Gnidning.....	41
6.1.2 Kørsel uden belastning	41
6.1.3 Kørsel med belastning	41
6.2 Billedbehandlingstest	41
6.3 Model test.....	44
6.3.1 Regulator tests.....	45
7. Konklusion	51
7.1 Videre arbejde	51
7.2 Perspektivering	51
7.3 Resultater.....	51
Referencer	53
Appendiks A: Skitse af robotten	55
Appendiks B: Fastlæggelse af LIMIT	56
B.1 Konklusion	58
Appendiks C: Fastlæggelse af medianValue	59
Appendiks D: Fastlæggelse af thresholdValue	64
Appendiks E: Fastlæggelse af rlimit.....	66
Appendiks F: Den samlede model	67
Appendiks G: Model af bil	69
Appendiks H: P-regulator bodeplots	72
Appendiks I: PI-regulator bodeplots.....	73

Appendiks J: PID-regulator bodeplots	74
Appendiks K: lookForward fejlen.....	76
Appendiks L: Test af billedbehandlingen.....	77
L.1 Test uden linje.....	77
L.2 Test på snor.....	77
L.3 Test på utydelige streger.....	78
L.4 Test på tydelige streger.....	80
L.4.1 Lige ud	80
L.4.2 Sving	82
L.4.3 Hjørne.....	83
L.4.4 Forgrening	85
L.4.5 Kryds.....	86
L.4.6 Eksterne påvirkninger	87
Appendiks M: Test af bil model.....	91
M.1 Lige linje.....	91
M.2 Rotation	91
M.3 Cirkel.....	92
M.4 Delkonklusion	92
Appendiks N: Test af regulatorerne	93
N.1 Lige ud	93
N.2 Reference trin-respons.....	94
N.3 "Sinus"-kørsel.....	96
N.4 Voldsom kørsel.....	98
Bilag 1: Tandremstype tabel.....	100
Bilag 2: Budget.....	101

Figurliste

Figur 1: Mk1 i maleposition	14
Figur 2: Aluminiums-”sken”	14
Figur 3: Yamaha’s T5P lineær aktuator.....	16
Figur 4: Tandremssystem. Figur fra (ConiTech, side 11).	16
Figur 5: Koblingen forbinder motoren med akslen.	22
Figur 6: Tandrem-strammeren.....	24
Figur 7: Billede af den mekaniske del af robotten.....	25
Figur 8: De to koordinatsystemstyper. Figur fra (Carstensen, 2002, side 18).....	27
Figur 9: Binær thresholding. Figur fra (Bradski og Kaehler, 2008, side 136).....	28
Figur 10: Vandret søgning efter linje, her i et sving.	29
Figur 11: Lokalisering af yder-pixels	30
Figur 12: Bilens og robotens lokale koordinatsystemer i verdens koordinatsystemet.....	33
Figur 13: Simulink model af Ackerman styret bil.....	35
Figur 14: Simulink motormodel.	36
Figur 15: Steprespons for motormodel.	37
Figur 16: Skitse af simuleringssystemet	39
Figur 18: Regressionslinje for utydelig streg	42
Figur 20: Regressionslinje for tydelig streg	42
Figur 17: Utydelig streg	42
Figur 19: Tydelig streg	42
Figur 22: Regressionslinje for hvid snor	43
Figur 23: Firearmet-kryds	43
Figur 24: Regressionslinjen for firearmet-kryds er uegnet.....	43
Figur 21: Hvid snor.....	43
Figur 25: Hjørne	44
Figur 26: Regressionslinjen for hjørnet er uegnet.....	44
Figur 27: Fejlafstandsgraf	45
Figur 28: Reference trin-respons uden regulator.....	46
Figur 29: Reference trin-respons med P-regulator.....	46
Figur 30: "Sinus"-kørsel uden regulator	47
Figur 31: "Sinus"-kørsel med PI-regulator	48
Figur 32: Voldsom kørsel med PI-regulator.....	49

Figurene i appendiks er ikke inkluderet i figurlisten.

1. Introduktion

Kløvermarkens Forende Boldklubber (KFB) administrerer en del boldbaner. Disse baner er optegnet på græs og skal derfor regelmæssigt genoptegnes. Genoptegningen foregår fra en golfbil, hvorpå der er monteret en mekanisk opstilling, der holder en maledysse ved jorden.

Præcisionen af optegningen af stregerne afhænger af bilens bevægelser, idet maledysen holdes i en fast position relativt til bilen; hvis bilen laver et udsving, vil dette kunne ses på stregerne. Der er derfor påkrævet stor præcision, når der males streger. KFB vedligeholder omkring 45 boldbaner, der hver skal males op 2 gange om ugen i sæsonen. Dette er en omfattende og krævende opgave.

Arbejdsgangen ønskes simplificeret ved at introducere en automatisk positionsregulator til at styre maledysen, således at maledyssens position kan reguleres i forhold til bilens bevægelser, hvorved stregerne kan optegnes mere nøjagtigt.

Den automatiske positionsregulator (i det følgende kaldet robotten) skal bestemme maledyssens ønskede position ud fra resterne af en tidligere streg. Herved bliver det muligt at genoptegne boldbaner direkte oven på de eksisterende. Desuden skal der kunne optegnes baner ved sæsonens begyndelse, ved at robotten følger en udspændt hvid snor.

1.1 Problemformulering

Gennem en analyse af genoptegning af boldbaner skal der fremstilles et konkret design og implementering af en malerobot. Malerobotten skal være en ekstern tilføjelse til en golfbil og skal være i stand til:

- at detektere en eksisterende hvid streg
- at detektere en hvid snor, brugt ved opmærkning af nye boldbaner
- at genoptegne streger med en forskydning på mindre end ± 3 mm i forhold til den tidligere streg
- at udføre korrektioner når bilen kører med hastigheder op til 7 km/t
- at korrigere automatisk op til ± 25 cm
- at regulere den mobile del af robotten med hastigheder på 40 cm/s.

Målet er at simplificere arbejdsgangen ved genoptegning af boldbaner, for KFB's personale.

1.2 Afgrænsning

Der vil ikke blive arbejdet hen mod en fuldstændig autonom løsning i den forstand, at en fører af bilen stadig vil være påkrævet. Førerens opgave bliver simplificeret til at holde bilen inden for en passende afstand til stregerne. Ligeledes vil det blive overladt til føreren at aktivere maledysen.

En begrænsning i forhold til projektet er budgettet, der er på 30.000 kr. Dette beløb skal dække alle udgifter til komponenter og materialer.

Robotens spændingsforsyning vil være golfbilens akkumulatorer, hvorfor robotten skal kunne fungere ved 24 VDC. Der kan forekomme afvigelser på denne spænding på mere end 10%, hvilket robotten skal kunne håndtere.

Robotten ønskes udstyret med et kamera, der vil blive brugt til at detektere stregerne og snoren med. Denne metode findes fordelagtig og der er derfor ikke undersøgt alternative metoder til at detektere dem.

1.3 Arbejde af andre

Der arbejdes i projektet ud fra den mekaniske løsning der hidtil har været benyttet af KFB's personale, der i det følgende vil blive kaldt Mk1. Mk1 består af metalstænger svejset sammen samt en dysseholder af aluminium.

2. Analyse

I dette afsnit vil arbejdsprocessen omkring optegningen af boldbaner kort blive beskrevet. Herudover vil opbygningen af den allerede eksisterende, mekaniske løsning, Mk1, blive gennemgået.

2.1 Arbejdsprocessen

Ved sæsonstart anlægges boldbanerne ved at tegne efter en hvid snor. Resten af sæsonen køres der efter resterne af den tidligere optegnede streg. Præcisionen afhænger af bilens bevægelser, da Mk1 er fastmonteret på siden af bilen. Der er derfor stor risiko for, at strengen ikke bliver lige og at den bliver optegnet forskudt i forhold til den tidligere. Når der ikke males, kan føreren af bilen løfte Mk1 op i en hvileposition på siden af bilen.

Aktiveringen af maledysen forgår manuelt, og der køres med hastigheder på 5-7 km/t. Denne hastighed kan ikke øges, da man derved vil miste præcision, og malingen vil blive fordelt over et større område, hvilket resulterer i, at strengen bliver utydelig.

2.2 Mk1

KFB's Mk1 er en rent mekanisk løsning bestående af to dele; en stiv jernkonstruktion, der monteres på siden af bilen, og et "maleben" af jern med en aluminiums-"sko". "Malebenet" består af tre dele: to lodrette stænger, der er forbundet med led, svarende til underbenet, låret og hoften. "Skoen" sidder for enden af "malebenet" og har form af en sko, hvor maledysen kan placeres i, hvad der svarer til hælen. De to dele er forbundet med led og en fjeder, således at "malebenets" højde kan justeres i forhold til bilen. "Benets" lodrette placering har to positioner: oppe og nede. Fjederen holder "benet" fast i disse to positioner, hvor der kun males i nede-positionen. Når "benet" placeres i malepositionen medfører leddene og fjederen, at systemet ikke påvirkes af ujævnheder i terrænet. Transport af bilen uden for banerne er muligt, når "benet" er placeret i dens oppe-position. Føreren har mulighed for at løfte "malebenet" op fra siddende stilling i bilen, hvilket reducerer spildtiden i arbejdsprocessen.

Med aluminiums-"scoen" er det muligt for føreren at indstille linjebredden ved at placerer sprøjteudstyret i forskellige holdere. Der er fire muligheder for bredder; 3.50, 4.75, 7.00 og 9.00 cm. Det er kun de to sidstnævnte, der benyttes af KFB's personale. Figur 1 og Figur 2 viser henholdsvis Mk1 og aluminiums-"scoen".



Figur 1: Mk1 i maleposition



Figur 2: Aluminiums-\"sken\"

2.3 Mekaniske krav

Som udgangspunkt skal en automatiseret løsning være mindst lige så præcis ved optegning som den manuelle. Den mekaniske del af løsningen skal derfor opfylde de samme mekaniske krav, som Mk1 gør. Disse krav er, at den skal kunne holde til påvirkninger fra ujævnt terræn, og at den skal kunne placeres i en hvileposition, der tillader transport uden for boldbanerne. Det vil specielt være tilsigtet, hvis føreren har mulighed for at sætte \"malebenet\" i hvilepositionen fra siddende stilling. Løsningen skal kunne monteres på en golfbil og må ikke være meget pladskrævende, da dette vil kræve en ændring af KFB's faciliteter som f.eks. garager og porte. Hvor pladskrævende robotten er skal ses i forhold til, hvor meget plads Mk1 kræver.

Robotten skal kunne operere i udendørsmiljøer, hvor der er mulighed for støv, regn og malingsrester. Det er derfor essentielt, at løsningen kan operere i beskidte miljøer med en minimal vedligeholdelse. I modsat fald skal der bruges mandetimer til vedligeholdelse, hvilket er utilsigtet.

Robotten skal være let at betjene, således at der ikke kræves efteruddannelse af personalet. Desuden skal den kunne flytte vægten af Mk1 på 11 kg, se Maple udskrift på CD'en for beregning af massen.

Kravene til løsningen ridses op i punktform;

1. Tolerance over for ujævnt terræn
2. Mulighed for hvileposition
3. Ikke pladskrævende
4. Tolerance over for snavs

Disse krav skal alle sammen være opfyldt for, at løsningen kan godkendes.

2.4 Montering

De to muligheder for monteringen af malerobotten er front- og sidemontering. Montering bag på bilen kommer ikke på tale, da støv eller mudder fra hjulene vil have stor indflydelse på genoptegningen.

En fordel ved frontmontering er, at den vil kræve mindre plads i garagen end en sidemontering. Dog bliver udsynet stærkt begrænset ved frontmontering, hvilket kan vanskeliggøre arbejdsprocessen. Dette problem kan løses ved hjælp af en indikator, der viser robotens position i forhold til stregen, enten med en mekanisk indikator i stil med et pejlemærke eller med kontrollamper, der lyser når robotten er i yderkanten af positionsområdet. En løsning med større omkostninger kunne være en skærm, der er tilsluttet kameraet.

Frontmonteringen har en begrænsning i muligheden for genoptegning af cirkler. Problemet opstår, hvis maledyssen er placeret langt foran forhjulenes aksel, og der skal følges små cirkler, hvorved maledyssen kan blive trukket sidelæns over græsset frem for en fremadrettet bevægelse. Dette vil resultere i uønsket belastning af opsætningen såvel som fejltegningen af stregen i form af en bredere streg. Problemet kan afværges ved at sikre, at maledyssen placeres tæt på forhjul-parrets aksel. På en fodboldbane har midtercirklen såvel som cirklerne i straffesparksfeltet en radius på 9,15 m, hvilket ikke anses for at være problematisk. Det vil dog næppe være muligt at tegne hjørnefeltet, hvilket det heller ikke er med Mk1.

Sidemonteringen har fordel af, at føreren kan korrigere for fejl uden ekstra indikationshjælpemidler. Arbejdsstillingen er dog ikke fordelagtig, idet maledyssen ikke ligger i førerens synsfelt, når denne kører. Dette medfører en øget mulighed for fejl, der skyldes førerens behov til at dreje sig for at holde sig orienteret. I værste fald kan en sidemontering uden indikator medføre, at robotten kommer uden for arbejdsområdet. Det anses derfor for fordelagtigt at inkludere en indikator ved sidemontering.

2.5 Drevet

Der er forskellige muligheder for drev i opstillingen. Fælles for dem er, at de skal opfylde følgende krav: høj præcision af positionen, 50 cm slaglængde (den samlede korrektionslængde), høj reguleringshastighed (40 cm/s) samt at de skal være i stand til at klare belastningen af robotens samlede vægt.

Forsyningsspændingen til motoren og styringen til denne vil komme fra akkumulatorer på bilen. Derfor er det påkrævet af både motoren og styringen, at de kan operere ved 24 VDC med en afvigelse på mere end 10% af dette, eftersom spændingen ikke er stabil.

Indledningsvis blev muligheden for at benytte en lineær aktuator undersøgt. En lineær aktuator er et samlet system, hvor man kan regulere positionen af aktuatorens slæde (den bevægelige del). Denne løsnings største fortrin er dens kompakthed, og at den kan bruges direkte fra pakken. Til anvendelse i løsningen var der kig på en T5P fra Yamaha's pico-serie. Denne opfylder kravene om en slaglængde på

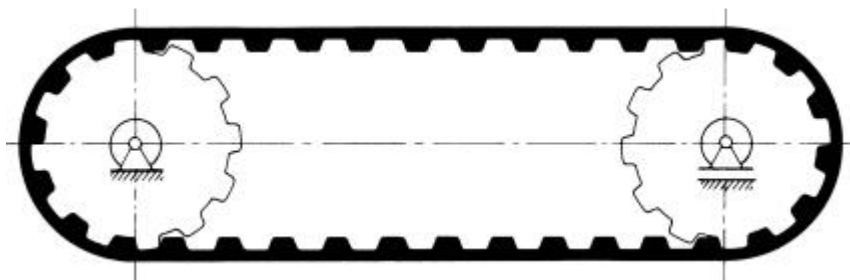
minimum 50 cm og høj hastighed. T5P'eren kan desuden arbejde i beskidte miljøer, hvilket gør den velegnet til udendørs malearbejde. Den maksimale belastning af en T5P er på 12 kg, hvilket begrænser mulighederne for, hvor stort udhænget af maleudstyret kan være, men det vurderes, at denne maksimale belastning er passende for systemet. T5P'en kan ses i Figur 3.



Figur 3: Yamaha's T5P lineær aktuator

Dens fordele bliver dog vejet ned af, at dens høje indkøbspris på 13.000 kr. og dens begrænsning i forhold til dens point-to-point kørsel, hvor aktuatoren kører efter fastsatte punkter fordelt på slaglængden. Disse punkter kan fastsættes, hvor man vil, men aktuatoren vil ikke have mulighed for at køre "flydende" igennem punkterne. Ved point-to-point kørsel kører slæden fra et punkt til et andet og stopper i alle mellemliggende punkter. Dette gør aktuator-løsningen uegnet til denne malerobot. En anden ulempe er aktuatorens intolerance over for forsyningsspændingen, der kun må afvige med 10% fra dens fastsatte 24 VDC.

En anden mulighed er at konstruere en lineær aktuator ud fra tandremshjul og en tandrem, se Figur 4 for koncepttegning. Det ene tandremshjul kan styres af en elektromotor, mens det andet har fri bevægelighed. Tandremmen forbinder de to tandhjul, og der placeres en slæde på tandremmen. Slæden kan forbindes til maleudstyret, hvorved slædens position styres af elektromotoren. En af fordelene ved denne løsning er, at det er muligt at tilpasse den til specifikke arbejdsituationer. Denne fordel er samtidig en ulempe, idet denne løsning ikke er færdiglavet, men skal samles.



Figur 4: Tandremssystem. Figur fra (ConiTech, side 11).

Af de undersøgte muligheder anses tandremssystemet for at være den bedst egnede til malerobotten. Denne vurdering ligger hovedsageligt i tandremsdesignets fleksibilitet samt lave omkostninger. Den lineære aktuator fra Yamaha egner sig bedst til industrielle formål, hvor der ikke skal foregå kontinuerlige bevægelser over slaglængden.

Efterfølgende er der fundet en lineær aktuator fra Festo (modellen ELGR). Dette blev gjort efter endt dimensionering af systemet, hvorfor denne løsning ikke er valgt. ELGR'en indeholder ud over en lineær aktuator også glidelejer, hvorved det er en stærkere og mere komplet løsning. Med en høj nøjagtighed på

0.1 mm, maksimal belastning på 15 kg, hastighed på 1-3 m/s og en effektiv slaglængde på mellem 50 og 1500 mm opfylder ELGR'en let de fastsatte krav.

En mindre attraktiv egenskab er, at motoren, der driver ELGR'en, skal påmonteres vinkelret på bevægelsesplanet og dette kan medfører komplikationer ved dimensioneringen af løsningen. Prisen på en ELGR med en bredde på 55 mm og en slaglængde på 500 mm er omkring 3.000 kr. ELGR'en anses for at være en velegnet aktuator til malerobotten.

2.6 Forslag

I det følgende vil fem løsningsforslag blive gennemgået og diskuteret. De vil blive bedømt på, hvor mange af de opstillede krav de opfylder. Forslagene er delt op i, om de er front- eller sidemonterede.

Fælles for løsningerne er, at de alle indeholder en del af Mk1 for at mindske omkostningerne, og fordi dette system er velafprøvet. Specielt er "scoen" med holder til maledysen velegnet til inkorporering i den automatiske løsning. I løsningsforslagene er der nogle generelle elementer der går igen: alle forslagene indeholder et ophæng med glidelejer til at bære den bevægelige del af robotten samt et drev til at bevæge robotten horisontalt. Ingen af forslagene afhænger af biltypen, da løsningen ønskes udført så generelt som muligt.

For at kunne identificere og lokalisere stregerne og snoren vil alle løsninger indeholde et kamera og et pc-board til at opsamle data og udføre billedbehandling på billeder af boldbanen. Kameraet placeres således, at det ser banen direkte foran maledysen. Hvor langt frem kameraet ser vil blive gennemgået i simuleringen senere. På pc-boardet forgår billedbehandlingen, der vil resultere i en positionsbestemmelse, af stregerne.

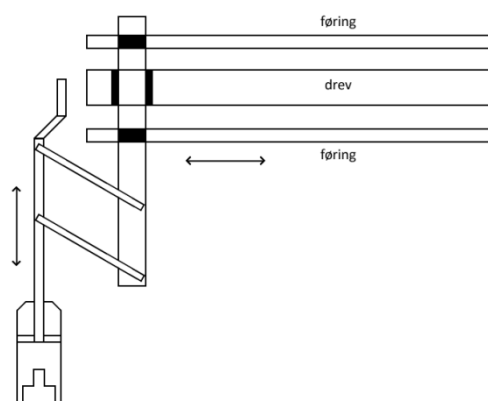
Forslagene er illustreret med koncepttegninger, der ikke er målfaste. Fæstningerne mellem "maleben" og føringerne og drevet vil blive illustreret enten som sorte firkanter, symboliserende en fast montering, eller som sorte cirkelskiver, symboliserende en montering, der tillader rotering omkring fæstningen.

2.6.1 Forslag 1 - Sidemonteret

En stor del af Mk1 bibeholdes, dog fjernes delen brugt til montering på siden af bilen.

Føringer og drev monteres på Mk1 og på siden af bilen. Robotten har mulighed for at bevæge "scoen" horisontalt henover græsset. Ved at bruge en stor del af Mk1 er det stadig muligt at løfte "benet" op i hvileposition. Samtidig sikres tolerance over for ujævnt terræn. Snavs vil kun have betydning for drevet og føringerne.

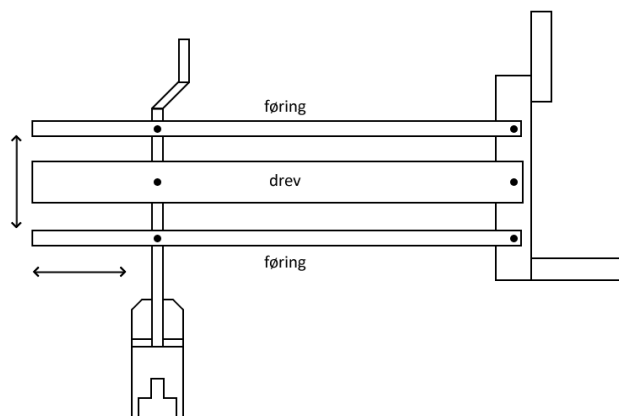
Opfylder krav: 1, 2, 3 og 4



2.6.2 Forslag 2 - Sidemonteret

I et forsøg på at få den automatiske løsning til at ligne Mk1 erstattes leddene ("låret" på "malebenet") med glidelejerne og drevet. Ved at montere føringer og drev med mulighed for at roterer omkring fastgørelsespunktet bliver det muligt at løfte "malebenet" op samt at sikre tolerance over for ujævnheder.

Ved snavs kan omdrejningspunkternes friktion øges, hvorfor denne løsning ikke er tolerant over for snavs.

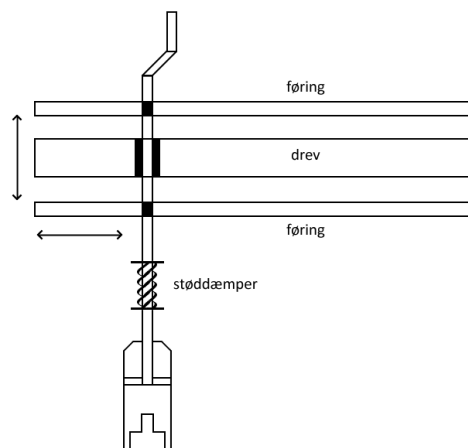


Opfylder krav: 1, 2 og 3

2.6.3 Forslag 3 - Sidemonteret

Føringerne og drevet erstatter samlingen mellem "malebenet" og bilen. Da der ikke længere indgår fleksible led til at håndtere ujævnhederne indsættes der en støddæmper over aluminiums-"skoen".

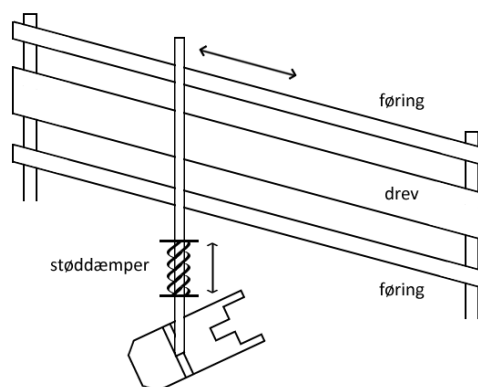
Denne løsning er ikke pladskrævende, men til gengæld er den mere kompliceret at fremstille.



Opfylder krav: 1 og 3

2.6.4 Forslag 4 - Frontmonteret

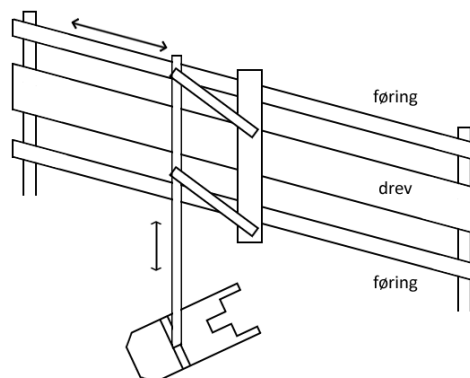
Kun den lodrette stang med "skoen" bibeholdes. Glidelejerne og drevet fastmonteres i begge ender på fronten. Der indsættes en støddæmper for at tolerere ujævnheder. Det er dog ikke muligt at løfte maledyssen fra jorden.



Opfylder krav: 1 og 3

2.6.5 Forslag 5 - Frontmonteret

Glidlejerne og drevet fastgøres to steder på bilens front. For at forbedre forslag 4 inkluderes der en større del af Mk1 i dette forslag. Herved er der nu mulighed for at opnå hvileposition, mens robotten ikke tager skade ved ujævnheder i terrænet.



Opfylder krav: 1, 2, 3 og 4

2.6.6 Sammenligning

Kun forslag 1 og 5 opfylder alle kravene. Begge løsninger er tolerante over for ujævnt terræn ved at bruge en stor del af Mk1. Leddene sikre stor bevægelsesfrihed i vertikal retning. Muligheden for hvileposition sikres ligeledes af det eksisterende design i Mk1. Dette krav bliver ikke opfyldt i forslag 3 og 4, eftersom de fokuserer på ikke at være pladskrævende. Det kan diskuteres om forslag 1 er pladskrævende, men den anses for at være i kategorien af mindre pladskrævende modsat forslag 2.

Der er en lav kompleksitet af fremstillingen af forslag 1 og 5 i forhold til f.eks. forslag 2, hvor antallet af bevægende dele giver forslaget en del praktiske og vedligeholdelsesmæssige udfordringer.

Man kan med fordel dreje "sken" 90 grader i det horisontale plan, således at orienteringen af "sken" og leddene er ensrettede og ikke vinkelrette på hinanden. Herved vil maledyssens position være direkte foran slædens position.

I alle forslagene bevæger "sken" sig sidelæns over græsset, når slæden bevæges over slaglængden. Det antages at belastningen af de mekaniske dele, er af en størrelsesorden der kan ignoreres.

Forslag 1 og 5 anses for de bedste løsningsforslag af de opstillede.

3. Løsningsforslag

I analysen blev det klart, at forslag 1 og 5, opfyldte alle de fastsatte krav. Disse to løsninger ligner meget hinanden i opbygningen, hvorfor det valgte løsningsforslag vil samle disse to til ét forslag, hvor det er muligt både at front- og sidemontere malerobotten.

Løsningsforslaget bygger på en kombination af forslag 1 og 5, hvor drevet vil tage form af et tandremstræk. Se appendiks A for koncepttegning. For at mindske friktionen ved bevægelse af robotten benyttes der glidelejer. Glidelejerne er fremstillet af igus® og sikrer en minimal gnidningsmodstand mellem lejerne og slæden. For at sikre stabilitet monteres glidelejerne på en metalplade, hvorved det sikres, at der er en konstant afstand mellem glidelejerne. Tandremmen fastholdes ved hjælp af legebukke, der holder akslen gennem de to tandremshjul. Bevægelsen af tandremmen sikres af en elmotor, der forbindes til det ene tandremshjul.

Det er kun "malebenet" fra Mk1, der benyttes, med en masse på 11 kg. Ved at benytte disse dele af Mk1 minimeres påvirkningen fra ujævnt terræn på glidelejerne og tandremmen. Samtidig sikres det, at "skoen" altid er i kontakt med græsset.

I det følgende vil de enkelte komponenter i løsningsforslaget samt de tilhørende beregninger blive gennemgået. Komponenternes databladene forefindes på vedlagte CD.

3.1 Gearmotor

Der skal bruges en motor med høj nominal torque, da den anvendte del af Mk1 vejer meget, hvorfor der er valgt en "Performax 63.2 ECI6340" børsteløs DC motor fra Zeitlauf®, der opererer ved 24VDC. Denne er valgt på grund af sin høje nominal torque på 8.9 Nm samt sin maksimale rotationshastighed på 138 rpm. Disse værdier passer sammen med tandremssystemet, hvilket bliver gennemgået senere, i afsnit 3.3. Det er vigtigt, at motorens belastningsværdier er store nok til, at motoren ikke tager skade af at blive koblet til tandremssystemet. Den valgte motor har $F_{radial} = 350N$ og $F_{aksial} = 500N$, hvilket i det følgende vil være et dimensioneringskrav for tandremssystemet, da dette er den maksimalt tilladte belastning for motoren. For at sikre at motoren ikke tager skade ved en direkte kobling til tandremmen, indsættes der en kobling fra Mobra A/S. Koblingen er en kompensationskobling af aluminium, der er valgt ud fra kravet om, at det maksimale drejemoment skal være mere end motorens, hvilket bliver opfyldt med koblingens maksimale drejemoment på 15 Nm. Herved kan den holde til at blive indsat i systemet mellem motoren og akslen gennem tandremshjulet. Koblingen opfylder et vedligeholdelsesmæssigt formål: ved stor belastning af robotten vil koblingen gå i stykker frem for motoren, se Figur 5. Koblingen er væsentligt billigere end motoren.



Figur 5: Koblingen forbinder motoren med akslen.

Motoren indeholder en planetgearing med en reduktion 30 til 1. Planetgearingen består af 3 tandhjul, der roterer rundt om et midtertandhjul.

Motoren monteres med et vinkeljern, hvor der bores hul til akslen, se Figur 5. De fire skruehuller i gearmotorens front benyttes til at fæstne denne til pladen. Herved sikres en stabil placering af motoren.

Til motoren købes der fra samme forhandler en encoder, der sikrer koblingen mellem motoren og styringen. Encoderen er en "opto-electronic incremental encoder" med 512 pulser pr. rotation og er valgt efter ønsket om højst muligt antal pulser pr. rotation, så der er en høj opløsning på positionsbestemmelsen af rotoren. Encoderen overvåger rotorens position og kan evaluere rotationerne med en opløsning på 512 pulse pr. rotation.

3.2 Styring

Styringen af motoren forgår over en driver. Der er valgt en "EA4718" driver fra ElectroCraft®, efter forslag fra Zeitlauf®. Driveren udmærker sig ved sin store tolerance i forsyningsspænding (9-70 V), hvilket er en stor fordel, da spændingen fra akkumulatorerne kan variere meget. Motoren kan styres på fire forskellige måder: PWM-, Hall-, Encoder- og Torque-mode, hvoraf kun to af dem vil blive brugt i projektet. Det drejer sig om Encoder-mode og Hall-mode, hvor Hall-mode udelukkende bliver brugt ved debugging af forbindelsen mellem motoren og styringen. I driftstilstanden vil Encoder-mode blive brugt, hvor styringen sender encoderens værdi videre til pc-boardet. Encoderens værdi kan bruges til at positionsbestemme rotoren og derefter slæden på robotten.

3.3 Tandrem og tandremshjul

De specifikke krav til tandremssystemet er: den skal kunne opnå hastigheder på 40 cm/s og have en slaglængde på 50 cm. Herudover skal tandremmen kunne klare belastningen på 500N svarende til motorens maksimale belastning, således at det ikke er tandremssystemet, der sætter grænsen for belastningen af det samlede system.

Tandremmens type fastlægges ud fra belastningen på tandremmen. Tabel 28 i bilag 1, viser de tilladte belastninger for tandremstyperne: MXL, XL, L, H og XH, samt de mulige bredder af tandremmene. Den tilladte belastning afhænger både af typen og af tandremmens bredde. Tabellen gennemses for tilladte

belastninger på mere end 500N. Det bemærkes at MXL og XL-modellerne ikke tillader så høje belastninger, mens XH belastningsgrænse er meget over det nødvendige. Typerne L og H opfylder kravet ved en bredde på henholdsvis 50.8 mm og 25.4 mm, svarende til henholdsvis 2" og 1". Da 1" tandremme er mere udbredte end 2" og for at gøre løsningen mere kompakt, vælges typen H med bredden 25.4 mm.

Ud fra motorens nominale hastighed kan antallet af tænder på tandremshjulet fastlægges. Dette gøres ud fra nedenstående formel, se (ConiTech, side 39), der udtrykker tandremmens hastighed ud fra tandremshjulets parametre;

$$v = \frac{t \cdot z_k \cdot n_k}{60 \cdot 10^3} \text{ m/s}$$

Hvor t er afstanden mellem tandremmens tænder, z_k er antallet af tænder på tandremshjulet, og n_k er hastigheden i rpm. Konstanten i nævneren er en korrektionsfaktor, der dels sørger, for at tandremmens hastighed får enheden m/s, dels omregner fra aksels rotation til tandremmens hastighed.

For tandremme af typen H er $t=12.7$ mm. Den ønskede hastighed for tandremmen er $v=0.40$ m/s, mens n_k er givet fra motoren som 138 rpm. I ovenstående formel isoleres z_k , og værdierne indsættes;

$$z_k = \frac{v \cdot 60 \cdot 10^3}{t \cdot n_k} = \frac{0.40 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 60 \cdot 10^3}{12.7 \text{ mm} \cdot 138 \text{ rpm}} = 13.69 \text{ tænder}$$

Det ses derfor tydeligt, at tandremshjulene skal have 14 tænder. Der er foretaget en oprunding fra 13.69 til 14 tænder, herved opnås der en lidt højere hastighed af tandremmen på 0.41 m/s.

Det fremgår af databladet for det anvendte tandremshjul at diameteren er $d_0=56.59$ mm. For at tjekke om tandremshjulet kan holde til den nødvendige belastningen, udregnes den maksimale kraft på tandremshjulet. Der regnes ud fra centret af akslen, dette punkt kaldes C. Kraften påvirker systemet på kanten af tandremshjulet, dette punkt kaldes P. Kraften bestemmes ud fra formelen; $\tau = l \cdot F$, hvor τ er aksels torque, l er afstanden mellem P og C (tandremshjulets radius). Kraften bliver herved;

$$F = \frac{\tau}{l} = \frac{\tau}{\frac{1}{2}d_0} = \frac{8.9 \text{ Nm}}{\frac{1}{2}0.05659 \text{ m}} = 314.54 \text{ N}$$

Dette svarer til en lodret påvirkning af omkring 30 kg, hvilket er langt over de 11 kg, som den benyttede del af Mk1 vejer. Det kan derfor konkluderes, at tandremshjulene kan holde til påvirkningen af Mk1.

Længden af tandremmen bestemmes ud fra tandremshjulets diameter og omkreds. Tandremmens længde bestemmes som;

$$L = 2 \cdot \text{slag} + O + 4 \cdot r$$

hvor r er hjulets radius, O er omkredsen, og slag er den ønskede slaglængde på minimum 50 cm. Længden af tandremmen bliver derfor;

$$L = 2 \cdot 500 \text{ mm} + 56.59 \text{ mm} \cdot \pi + 4 \cdot \frac{1}{2} \cdot 56.59 \text{ mm} = 1290.96 \text{ mm}$$

Tandremme forhandles primært med længder i tommer. Den ovenstående længde svarer til 50.82". Da der ikke forhandles tandremme med denne længde, undersøges slaglængden for den tandrem med længden 70", der er den nærmeste uden at gå under;

$$slag = \frac{L - O - 4 \cdot r}{2} = \frac{70" \cdot 25.4 \frac{\text{mm}}{\text{inch}} - 56.59\text{mm} \cdot \pi - 4 \cdot \frac{1}{2} \cdot 56.59\text{mm}}{2} = 743.52\text{mm}$$

I og med at tandremmen er længere end det påkrævede, er det muligt at placere glidelejerne tættere sammen, da motoren ikke længere behøver at være placeret mellem glidelejerne. Løsningen bliver herved mere kompakt.

Da tandremmen har en fikseret længde, er det nødvendigt med en anordning, der kan stramme tandremmen, således at der ikke opstår slør. Tandremms-strammeren realiseres ved at fastmontere en blok på bagpladen foran legebukkene, der placeres i aflange huller. Ved at sætte skruer vandret gennem blokken kan man stramme tandremmen ved at spænde skrueerne, inden man skruer legebukkene fast, se Figur 6. Tandremms-strammeren laves kun i den ene ende, da legebukkene skrues fast ved motoren i den anden ende.



Figur 6: Tandremms-strammeren.

Den fundne tandremstype samt tandremshjulene opfylder de fastsatte krav. Både tandremmen og tandremshjulene købes fra RSonline.

3.4 Glidelejer

Eftersom tandremmen ikke kan holde den samlede vægt af Mk1, indsættes der glidelejer til at bære vægten. Til dette formål vælges glidelejer fra igus®. Kravet til dem er, at der skal sikres en slaglængde på 50 cm, og at der ikke må forekomme udbøjning ved belastningen.

Opstillingen består af to parallelle aluminiumsstænger, der bliver holdt fast af WA-blokke, der påmonteres robotens bagplade. På hver stang er der en RTA-blok, der kan glide frit. WA og RTA er betegnelserne brugt af igus®. Glidelejerne i RTA-blokkene sikrer en lav friktion, der gør blokkene i stand til at bevæge sig hurtigt over stangen. Det eneste dimensionsmæssige krav til WA- og RTA-blokkene er, at de skal passe til aluminiumsstængerne. Stængerne vælges med en tykkelse på 30 mm, efter anbefaling fra igus®, da disse stænger vil have en minimal udbøjning for opstillingen belastet med 11 kg.

Længden af stængerne bestemmes ud fra, at de skal gå gennem en WA-blok i hver ende samt en RTA-blok. Den effektive slaglængde måles fra midterpunktet af RTA-blokken, når denne er i kontakt med WA-blokken i venstre side til midterpunktet af RTA-blokken, når denne er i kontakt med WA-blokken i højre side. Aluminiumsstængerne købes i en længde på 750 mm, hvorved der opnås en slaglængde på;

$$\begin{aligned} \text{slag} &= L - 2 \cdot b_{WA} - b_{RTA} \\ \text{slag} &= 750\text{mm} - 2 \cdot 40\text{mm} - 152\text{mm} \\ \text{slag} &= 518\text{mm} \end{aligned}$$

Stængernes længde stemmer overens med tandremmens, hvilket sikrer en effektiv slaglængde for det samlede system på 518 mm.

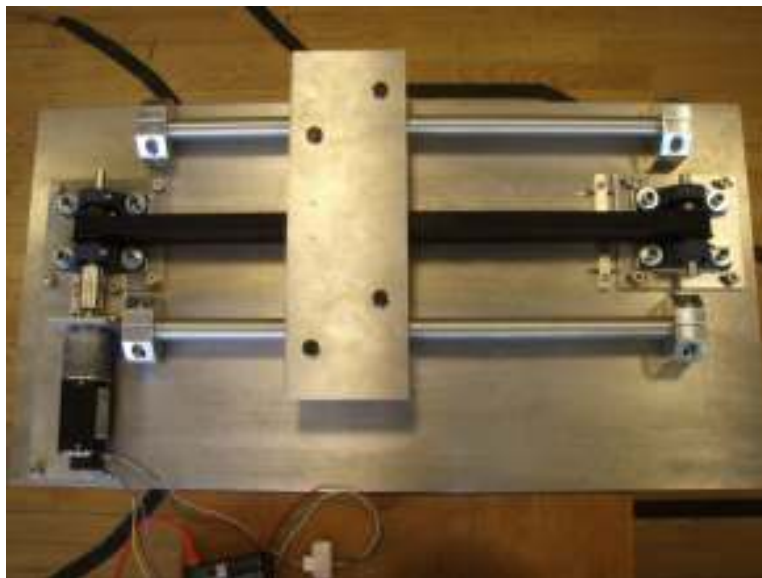
3.5 Kamera

Kameraet skal bruges til at opsamle billeder af snoren og de tidligere streger. Disse billeder vil derefter blive behandlet for at afgøre stregernes og snorens placering i forhold til robotten.

Det valgte kamera er et F-036C guppy kamera fra Allied Vision Technologies. Det er samme slags som dem, der er monteret på SMR-robotterne hos DTU Elektro, Automation and Control. For mere information om SMR'erne se (timmy-hjemmesiden). Kameraet kan forbindes til et pc-board via et firewire-kabel.

3.6 Det samlede system

På Figur 7 kan man se det samlede system monteret på en aluminiumsplade. Slæden er placeret omkring midten af billedet.



Figur 7: Billede af den mekaniske del af robotten.

Motoren og legebukkene er placeret på mindre plader, der skrues fast til bagpladen. Dette er gjort for at øge muligheden for ændringer i systemet, uden at der skal indkøbes en ny bagplade. Disse undersystemer er lette at af- og påmontere, så vedligeholdelsen af legebukkene er let at foretage.

3.6.1 Vedligeholdelse

Elementerne til robotten er valgt således, at vedligeholdelsen er minimeret. Glidelejerne er resistente over for snavs og vand. Der er ingen vedligeholdelse af glidelejerne, ud over at de skal skiftes, når de er slidt ned. Denne vedligeholdelse er meget simpel og let at udføre.

Da motoren er børsteløs, vil slid kun finde sted på akslen. Motoren skal ikke smøres eller ses efter. På den mekaniske del af robotten ligger vedligeholdelsen i at smøre legebukkene, når disse trænger.

Den minimale vedligeholdelse sikrer, at KFB's personale ikke skal sætte ekstra tid af til arbejdsgangen omkring genoptegning af boldbanerne.

3.7 Delkonklusion

De fastsatte krav til den mekaniske del af robotten er alle sammen opfyldt med den valgte løsning.

- Kravet om tolerance over for ujævnt terræn bliver sikret ved at bruge dele af Mk1, hvilket også gælder for kravet om mulighed for hvileposition.
- Kravet om tolerance over for snavs er opfyldt for igus®-delene, der har en garanti for resistens over for snavs. Forbindelsen mellem tandremmen og tandremshjulene vil blive påvirket af snavs, men det vurderes til at være i et meget lille omfang på grund af de forholdsvis store dimensioner. Både motoren og styringen er forseglet, så de enkeltvist er tolerante over for snavs, dog er der mulighed for, at ledningsforbindelserne kan påvirkes af fint støv og lignende.
- Den opnåede slaglængde er ca. 2 cm længere end den ønskede. Dette skyldes elementernes bestillings-dimensioner. Det konkluderes derfor, at dette dimensionskrav er opfyldt.

Løsningen er ikke uhensigtsmæssigt pladskrævende, da der er mulighed for front og sidemontering, hvilket gør brugeren i stand til at vælge den løsning, der passer bedst til omgivelserne.

Kompleksiteten ved fremstillingen er lav, idet delene skal skrues fast på metalplader. Kompleksiteten ville have været væsentligt højere, hvis der f.eks. skulle benyttes svejsede samlinger.

I bilag 2 er budgettet for malerobotten angivet. Budgettet dækker kun over de indkøbte materialer. Nogle af forhandlerne har givet rabat på deres varer, da komponenterne blev købt af DTU Elektro, Automation and Control. Hertil kommer udgifterne til pc-board og kamera. Det bemærkes at udgifterne ligger inden for budgettet.

4. Billedbehandling

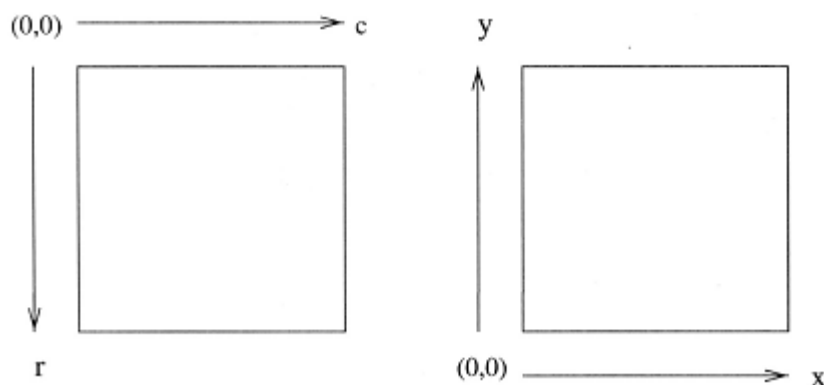
For at følge strengen, der skal optegnes, skal denne lokaliseres. Ved anlæggelse af nye baner følges en hvid snor. Lokaliseringen foregår med kameraet, der placeres 1 meter over græsset på det bevægende "maleben". Billederne fra kameraet er input til billedbehandlingssoftware, der har til formål at finde stregens (eller snorens) placering i billedet, der herefter bruges til at regulere slædens position. I det følgende vil begrebet linje dække over strengen og snoren.

4.1 Billedbehandlings teori

Kameraer benyttes ofte på robotter for at give dem en metode til at opfatte deres omgivelser. Behandling af kameraets billeder giver mulighed for at identificere objekter, finde ansigter, registrere farver og meget mere. I det følgende vil der blive givet en kort introduktion til teorien bag opbygningen af et billede taget med et digitalt kamera samt en metode til at sortere elementer ud. Dette underafsnit kan springes over hvis læseren er bekendt med billedbehandlingsteori.

4.1.1 Billedopbygning

Billeder består af pixels opstillet på matrixform. Hver pixel kan identificeres ud fra koordinaterne i matricen. Der er to forskellige metoder til at repræsentere disse koordinatsystemer; der er (r,c) - og (x,y) -koordinatsystemerne. I et (r,c) beskrives pixlens placering ud fra antallet af rækker og søjler fra begyndelsespunktet i øverste venstre hjørne, denne repræsentering er noget anderledes end det vante (x,y) system, hvor Origo er placeret i nederste venstre hjørne. De to systemtyper er afbilledet i Figur 8;



Figur 8: De to koordinatsystemtyper. Figur fra (Carstensen, 2002, side 18).

Begge koordinatsystemer har formen $M \times N$, hvor M er den totale højde, og N er den totale brede. Transformationerne fra den ene type koordinatsystem til det andet foretages ved følgende formler.

$$(r,c) \text{ til } (x,y); \quad (x,y) = (c, M-1-r)$$

$$(x,y) \text{ til } (r,c); \quad (r,c) = (x, M-1-y)$$

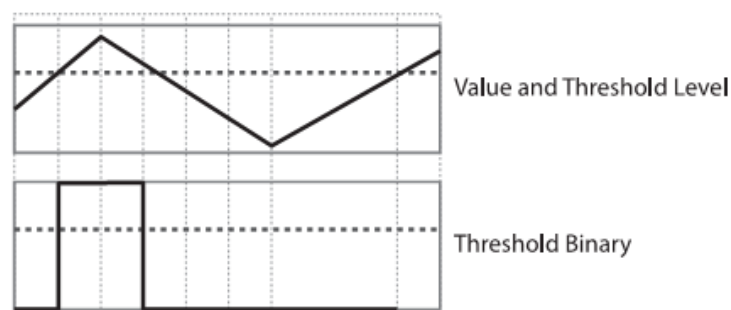
Hver pixel i billedet har en farve, hvilket tilsammen giver billedet dets karakteristiske udseende. I et 1-channel 8-bit billede er denne farve fastlagt ved ét tal i intervallet $[0; 255]$, jo højere værdi desto tættere er

farven på hvid, og jo tættere værdien er på 0 desto mørkere bliver farven. Da et sådan billede kun indeholder nuancer mellem sort og hvid, kaldes det også for et grayscale-billede.

I et 3-channel 8-bit billede er farven af pixlen bestemt ud fra tre tal, et for hver af de tre farver rød, grøn og blå (RGB). Hver af disse farver har en talværdi i intervallet $[0;255]$. Det er muligt at opnå kombinationer af de tre farver ved, at pixlen indeholder en værdi forskellig fra nul for mere end en af de tre farver.

4.1.2 Thresholding og binære billeder

For at udvælge de interessante områder i et billede kan man skelne mellem pixelværdierne ved at benytte thresholding, der sorterer pixels, alt efter hvilken værdi de har. Der er mange metoder til at sortere pixels på, men i det følgende vil der kun blive arbejdet med den binære metode. Denne metode skelner mellem, om pixelværdien ligger over eller under en fastsat grænse. Hvis den er over, bliver pixlen godkendt, ellers bliver den forkastet. En billedlig repræsentation af denne fremgangsmåde er afbilledet på Figur 9;



Figur 9: Binær thresholding. Figur fra (Bradski og Kaehler, 2008, side 136).

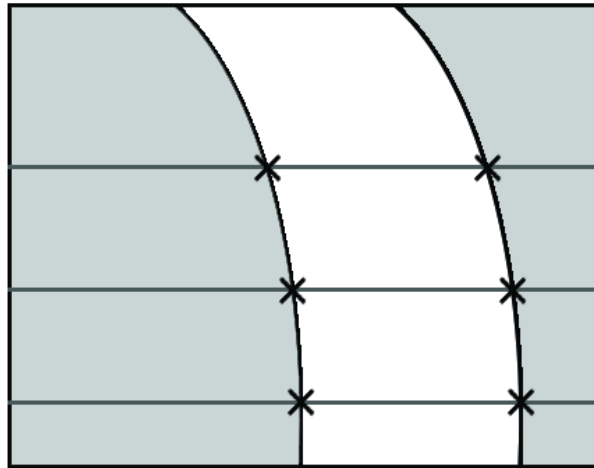
Sorteringen, der foretages med thresholding, kan med fordel benyttes til at oprette binære billeder, hvor de godkendte pixels afbildes som hvide, mens de frasorterede pixels forbliver sorte. I denne form for billeder vil der derfor kun optræde to farver; sort (0) og hvid (255).

4.2 Analyse

Det antages, at føreren af køretøjet kører nogenlunde parallelt med de linjer, der ønskes tegnet efter. Disse linjer kan derfor kun forekomme lodret orienteret i billedet. Dog vil en linje, der er parallel med bilens køreretning, forekomme skrå i billedet, hvis linjen ligger i yderkanten af synsfeltet.

Da boldbanerne ikke udelukkende består af rette linjer, men også af cirkelstykker, kan det ikke forventes, at linjerne er lige. De gængse metoder til at finde linjer som "Hough Line Transform" (Bradski og Kaehler, 2008, side 153ff) kan derfor ikke benyttes. Problemet ligger i, at kanten mellem græsset og linjen ikke altid er en ret linje, men kan have en udflydende overgang.

Dette problem kan løses ved at kigge på de enkelte rækker af pixels i billedet, og finde overgangen mellem græsset og linjen i hver række. Ved herefter at udføre lineær regression efter punkterne kan man danne sig et overblik over linjens placering i billedet. Dette er vist i Figur 10 for tre rækker i billedet.



Figur 10: Vandret søgning efter linje, her i et sving.

Krydserne på figuren angiver punkterne ved overgangen mellem det grå græs og den hvide linje.

Overgangen mellem græsset og linjen kan bestemmes ud fra pixelværdierne. Linjerne vil være hvidere end de omkringliggende pixels, der antageligt vil være grønlige (græs) eller brunlige (jord).

4.3 Implementering

Den valgte løsning til billedbehandling vil blive gennemgået i dette afsnit. I forbindelse med billedbehandling er der skrevet nogle hjælpemetoder - disse inkluderer: `meanValues()`, `SValues()`, `dataHandling()`, `residuals()` og `lineWidth()`. Disse metoder vil ikke blive gennemgået her, da kilde koden anses for at være intuitiv. Kildekoden kan findes på CD'en i filen `FindingLines.cpp` og som pdf udskrift. C++ biblioteket `opencv` er benyttet i udviklingen af billedbehandling.

Selve søgningen efter linjer forgår i `lineFinder()`-metoden. Metoden tager fem input;

- `imageName`
Navnet på billedet givet som `char*`.
- `Regression`
Svar destinationens array med plads til to elementer, `a` og `b`, af typen `double`.
- `debugmode`
Boolean. Hvis `true` sendes der dataoutput til terminalen.
- `thresholdValue`
Denne `int` værdi benyttes, når kanten mellem græsset og linjen skal findes.
- `mode`
Integer. Hvis `mode` er 1, køres der efter en eksisterende streg. Hvis `mode` er 2, køres der efter en snor.

Grunden til, at variabelen `mode` ikke er en boolesk værdi, er, at ved at bruge `int`-typen er det muligt senere at tilføje ekstra `modes`.

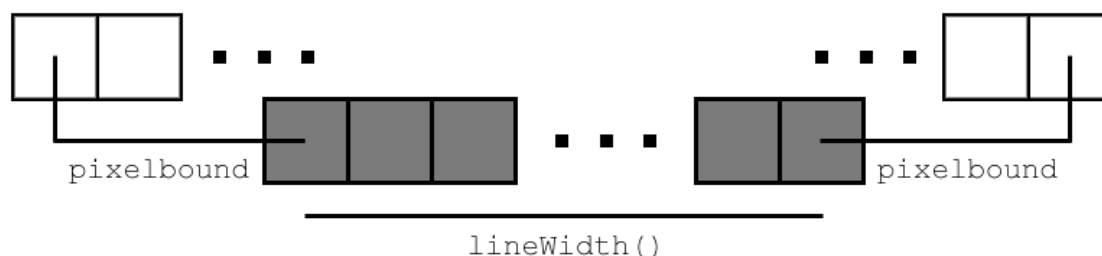
Input-billedet behandles som et grayscale billede, hvorved kan der skelnes mellem grøn og hvid ved at kigge på intensiteten i billedet. Dette gøres fordi den hvide farve vil ligge langt fra den grønne i intensitet.

Hvis strengen og snoren havde en anden farve, f.eks. blå, ville man med fordel kunne benytte RGB billeder i stedet.

Indledningsvist beskæres billedet med Region Of Interest (ROI), således at det kun er et mindre, relevant stykke af billedet, der viderebehandles. Der er ingen grund til at behandle den øverste del af billedet, da linjen i dette område ligger så langt foran, at det ikke bør påvirke slædens position. Med det valgte kamera beholdes bredden, mens de øverste 60% af højden skæres fra. Herved nedsættes behandlingstiden væsentligt.

På grund af lysforholdene kan græsstråene til tider forekomme hvide på billederne. Dette er ikke ønskeligt, da det kun er de hvide linjer der er interessante. Denne form for støj fjernes med et medianfilter, hvor hver pixel erstattes af den "midterste" af nabo-pixlerne, se (Bradski og Kaehler, 2008, side 111). Her skal "midterste" forstås som placeringen i intensitet og ikke som placering i billedet. Dette filter er velegnet til at fjerne støj, der kun påvirker et lille antal pixels i et stort område. De støjfyldte pixels bliver herved erstattet af de omkringliggende pixelværdier. Filteret får billedet til at fremstå sløret, og overgangen mellem græsset og linjen bliver mere uskarpt. Dette betyder, at det ikke længere er muligt at benytte edge-detection, hvor der søges efter veldefinerede kanter i billedet. Derimod er det fordelagtigt at lave et binært billede, da der er stor forskel på intensiteten af græs-området og linje-området.

Det ønskes nu at finde et estimat af linjen. Dette gøres ved at finde linjens yderste punkter i hver række i billedet lige som krydserne i Figur 10. Disse punkter findes ved i hver række af pixels at tage den første hvide pixel, som startpixel, og herefter benytte den senest fundne hvide pixel som slutpixel. Der søges udelukkende i et pre-specificeret interval, der afhænger af den forrige linjes fundne pixels, se Figur 11.



Figur 11: Lokalisering af yder-pixels

Billedet viser søgeområdet for en række, der er bestemt af de fundne pixels (de er her farvet grå) i den forrige række. Søgningen begynder i bunden af billedet og arbejder sig k rækker op, hvor k er givet ved LIMIT konstanten. Søgeområdet i række i er bestemt ud fra startpixelen i række $i-1$ som længden `pixelbound` til venstre og `lineWidth() + pixelbound` til højre i billedet.

Den sidste pixel, slutpixelen, ligger ikke altid i afstanden `lineWidth()` fra startpixelen, da linjen i billedet kan være smallere end den forventede. Der søges dog på trods af dette over hele afstanden angivet af `lineWidth()`, da der kan optræde "huller" i linjerne. Disse "huller" kommer fra skygger eller svagt optegnede områder, der har pixelværdier under tærskelværdierne.

Når de yderste pixels er fundet, findes midterpunktet af disse for hver linje, se `dataHandling()` for yderligere information. Disse midterpunkter bruges i en lineær regression for at finde et tilnærmelsesvist udtryk for linjen. Til dette benyttes hjælpemetoderne: `meanValues()`, `SValues()` samt

`residuals()`. Det antages her, at cirkelstykkerne i boldbanerne med god tilnærmelse kan beskrives med et første ordens polynomium, da der estimeres over længder på under en meter.

Afslutningsvist returneres regressionslinjens hældning (a) og skæring med y-aksen (b), så det er muligt at udregne punkterne på regressionslinjen $y=ax+b$. Bemærk, at billedet behandles som et (x,y)-billede med Origo i nederste venstre hjørne. Hvis `mode=2` forskydes regressionslinjen til højre, således at der ikke tegnes direkte oven på den. Den forskudte regressionslinje er farvet gul.

De 5 billeder, der vises for `debugmode=true`, er;

<i>Source image</i>	Input billedet i grayscale
<i>Blurred image</i>	Billedet beskæres med ROI og filtreres
<i>Binary image</i>	Det binære billede viser de accepterede pixels
<i>Useful pixels</i>	De brugbare pixels farves grå
<i>Measured points and regression line</i>	Målepunkterne farves blå, og den røde (og gule) regressionslinje indtegnes.

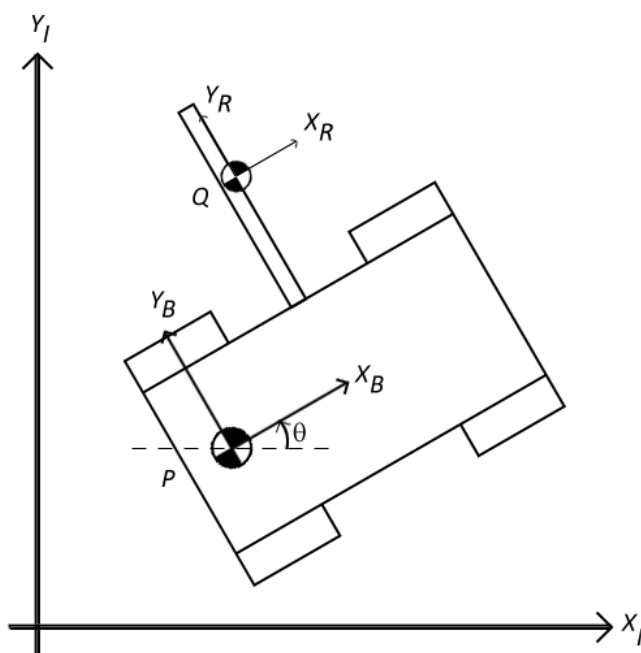
Konstanterne `LIMIT`, `medianValue` og `thresholdValue` er bestemt ud fra tests, se henholdsvis appendiks B, C og D for fastlæggelsen af konstanterne. Der er en forhindring i forbindelse med korrelationskoefficient-vurderingen af regressionslinjen. Dette problem er gennemgået i appendiks E, hvor konstanten `rlimit` fastlægges.

5. Simulering

For at fastlægge en passende regulator til systemet simuleres kørslen med malerobotten i Matlab Simulink. Til simuleringen er der opstillet undersystemer for en Ackerman-styret bil og en elektromotor. Undersystemerne vil blive gennemgået i det følgende. Simulink systemet er vist i appendiks F og den tilhørende m-kode med konstanterne kan findes på CD'en i system.m-filen.

5.1 Koordinatsystemer

Der arbejdes med tre koordinatsystemer: verdens (I), bilens (B) og robottens (R). Enhver position i et vilkårligt af disse koordinatsystemer er givet ved tre koordinater; x , y og θ . Bilens koordinatsystem har Origo i midterpunktet på bagakslen og har x -aksen i køreretningen og positiv y -retning vinkelret til højre for køreretningen. For robotten ligger Origo i midterpunktet for slaglængden. Slaglængden er den samlede længde, robotten kan regulere over, hvilket her er 518 mm. Koordinatsystemet er forskudt i forhold til bilens uden rotation, således at robottens koordinatsystemet er orienteret på samme måde som bilens. Den positive omdrejningsretning, for både bilen og robotten, er angivet mod uret. De tre koordinatsystemer er afbilledet på Figur 12, her er robotten placeret på venstre side af bilen.



Figur 12: Bilens og robottens lokale koordinatsystemer i verdens koordinatsystemet

Origo for robottens og for bilens koordinatsystem er markeret med cirkler og er benævnt henholdsvis Q og P . Transformationen fra bilkoordinater til robotkoordinater er givet ud fra robottens montering på bilen. På figuren er robotten monteret på midten af bilens side hvor slaglængden begynder ud for hjulets yderside. Transformationen for denne konfiguration er:

$$\zeta_R = \zeta_B + \begin{bmatrix} \frac{\text{billængde} - \text{hjullængde}}{2} \\ \frac{\text{bilbredde}}{2} + \text{hjulbredde} + \frac{\text{slaglængde}}{2} \\ 0 \end{bmatrix}$$

hvor ζ_R og ζ_B angiver henholdsvis robotens og bilens position. Hjulets dimensioner er beskrevet ved en længde og en bredde, i henholdsvis x_B - og y_B -retningerne. Slæden bevæger sig på y -aksen mellem de to endepunkter.

Transformationen af slædens koordinater i robotkoordinater til verdens koordinater er givet ved:

$$\begin{bmatrix} x_I \\ y_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_R \\ y_R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_P \\ y_P \end{bmatrix}$$

$$\theta_I = \theta_R + \theta_P$$

hvor (x_P, y_P) er koordinaterne til punktet P i verdens koordinater. Da der ikke er nogen drejning mellem robot- og bilkoordinatsystemet, vil $\theta_R=0$, hvorved $\theta_I=\theta_P$. For mere information om transformation se (*smrcl*-noten, side 5).

5.2 Bilmodel

Da malerobotten skal monteres på en bil, indgår bilens position i forhold til linjen som forstyrrelse i reguleringssystemet. Hvis føreren kører således, at bilen holdes parallelt med linjen, og linjen er inden for slædens rækkevidde, skal slæden bevæge sig hen over linjen og blive der. Førerens kørsel kan bidrage med store og små forstyrrelser til systemet.

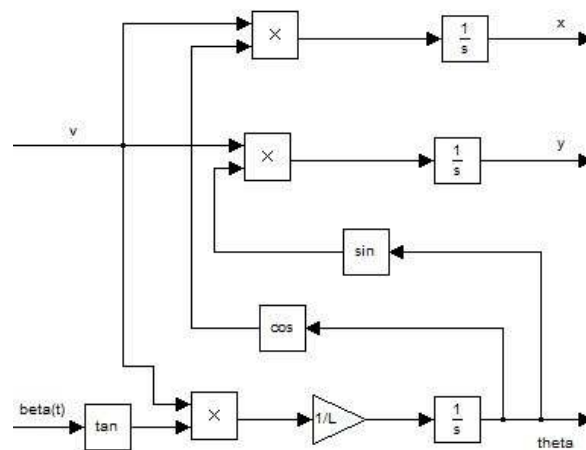
Simuleringen af bilen laves ud fra bilens kinematiske ligninger, der er udledt i appendiks G;

$$\dot{\zeta}_I = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \cos(\theta) \\ v \sin(\theta) \\ \frac{v}{L} \tan(\beta(t)) \end{bmatrix}$$

De kinematiske ligninger beskriver bilens hastighed i retningerne x , y og θ . Bilens position opnås ved at integrere over tiden.

Simuleringen tager bilens totale hastighed (v) og styringsvinkel ($\beta(t)$) som input, dette svarer til, hvor meget føreren træder på speederen, og hvor meget rattet drejes. Konstanten L beskriver bilens længde, der afgør drejningsradien for bilen. Vinklen θ , der optræder i formlen for x - og y -hastighederne, er bilens vinkel, der regnes ud fra vinkelhastighedsformlen.

Det samlede system for bilen forbindes i Simulink, se Figur 13;



Figur 13: Simulink model af Ackerman styret bil.

Systemets to inputs ses i diagrammets venstre side, mens de tre outputs ses i højre side. Bilens vinkel θ_v tilbagekobles til x og y gennem henholdsvis cosinus- og sinus-blokke. Hastighed og styrervinkel inputtene kan simuleres med de gængse Simulink Sources såsom: trigonometriske-, trin-, rampe- eller impulsfunktioner. Outputtene x og y , kan bruges til at plote bilens bevægelser.

5.3 Motormodel

Den børsteløse DC motor simuleres som en ankerstyret DC motor, se (Jannerup og Sørensen, 2006, side 41f og 75ff), ud fra de to formler;

$$v(t) = R_a i(t) + L_a \frac{d i(t)}{d t} + K_a \omega(t)$$

$$J \dot{\omega}(t) = K_m i(t) - b \omega(t) - \tau_l(t)$$

der beskriver henholdsvis spændingen og momentet i motoren. Hvor $K_a \omega(t)$ er mod-EMK-spændingen, τ_l er det ydre belastningsmoment og J er motorens inertimoment. $K_m i(t)$ er det moment, som motoren udøver på ankeret. De to konstanter K_a og K_m har i SI-enheder samme talstørrelse. $b \omega(t)$ er viskøst friktionsmoment der er proportionalt med hastigheden.

Motoren beskrives ved de to ligninger, hvor ankerspændingen, $v(t)$, er input og hastigheden $\omega(t)$ er output. De to ligninger overføres til Laplace-domænet, og belastningsmomentet sættes lig med nul;

$$V(s) = R_a I(s) + L_a s I(s) + K_a \Omega(s)$$

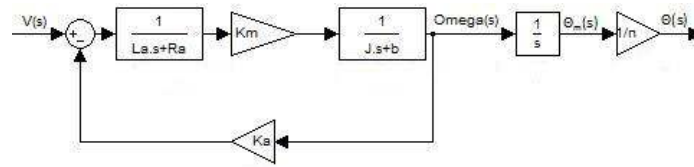
$$J s \Omega(s) = K_m I(s) - b \Omega(s)$$

Ved at ordne ligningerne efter $I(s)$ og $\Omega(s)$ bliver det tydeligt, hvilke overføringsfunktioner der skal benyttes;

$$V(s) - K_a \Omega(s) = (R_a + L_a s) I(s)$$

$$(J s + b) \Omega(s) = K_m I(s)$$

Ligningerne kombineres nu til et blokdiagram med $V(s)$ som input og $\Omega(s)$ som output, se Figur 14;



Figur 14: Simulink motormodel.

Det skal bemærkes, at de sidste to blokke ikke er med i ligningerne. Disse blokke integrerer signalet fra vinkelhastighed til vinkel, således at rotorens position er givet ved $\Theta_m(s)$. Gearingen i motoren påvirker akslens rotation med forholdet $1/n$.

Den første overføringsfunktionsblok beskriver den elektriske del af motoren, mens den anden beskriver den mekaniske del af motoren. De to førsteordens systemer er forbundet gennem omdannelsen af strøm til moment.

Konstanterne i motormodellen er givet i databladene fra firmaet ebmpapst. Værdierne gengives her;

Terminal induktans, L_a [H]	$0.72 \cdot 10^{-3}$
Terminal resistans, R_a [Ω]	0.18
Rotor inertimoment, J_R [kgm^2]	$16.8 \cdot 10^{-6}$
Induceret spænding, K_a [V/rad]	0.0439
Gearing, n	30

Konstanterne K_m og b bestemmes ud fra "Motor characteristic", se pdf på CD'en. K_m bestemmes som hældningen af I-linjen, til; $K_m = 0.0435$ V/rad, hvilket er acceptabelt tæt på den opgivne værdi for K_a , og siden disse skal være ens, benyttes $K_m = K_a$. På samme måde findes værdien for b som hældningen af M-linjen. Dette giver $b = 3.054 \cdot 10^{-5}$ Nm/(rad/sek). For udregninger se Matlab koden i system.m-filen på CD'en.

Det angivne inertimoment dækker kun rotoren. Det samlede inertimoment er summen af J_R og et inertimoment fra belastningen. Belastningen er givet ved en masse, en afstand og motorens gearing. Her er massen den del af Mk1, der benyttes (12 kg, der er indsat margin for udhæng af "malebenet") i afstanden $r = d_0/2$, der er tandremshjulenes radius. Det samlede inertimoment er;

$$\begin{aligned}
 J_{total} &= J_R + J_{belast} \\
 J_{total} &= J_R + \frac{r^2 m}{n} \\
 J_{total} &= 2.7475 \cdot 10^{-5} \text{ kg } m^2
 \end{aligned}$$

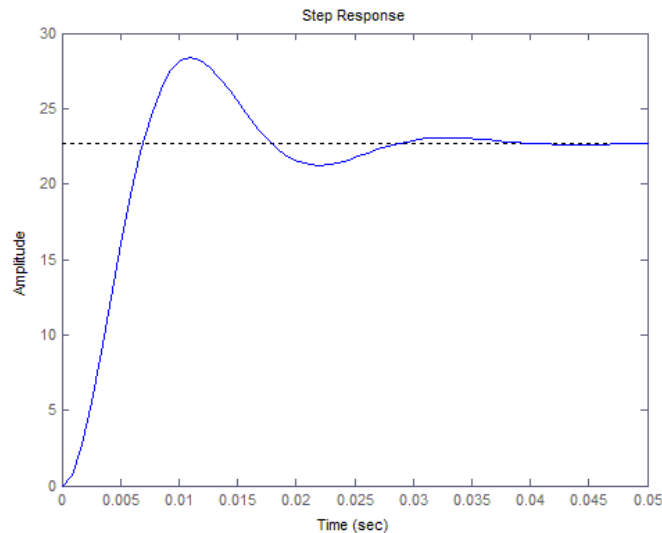
Med de angivne konstanter indsættes motormodellen i Simulink. Lukket-sløjfe overføringsfunktionen for motoren, fra $V(s)$ til $\Omega(s)$, fås til;

$$G_{motor}(s) = \frac{K_m}{L_a J s^2 + (L_a b + R_a J) s + (R_a b + K_a K_m)} = \frac{0.0439}{1.978 \cdot 10^{-8} s^2 + 4.967 \cdot 10^{-6} s + 0.0019}$$

Den samlede overføringsfunktion for motoren med gearing fås ved at gange de sidste to blokke på;

$$G(s) = G_{motor}(s) \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{n} = \frac{0.04393}{5.935 \cdot 10^{-7} s^3 + 0.000149 s^2 + 0.05805 s}$$

Det bemærkes, at alle leddene i det karakteristiske polynomium har positivt fortegn, hvilket ifølge Routh-Hurwitz' kriterium (Christensen, 2006, side 49) betyder, at samtlige poler ligger i det venstre komplekse halvplan. Det kan derfor konkluderes, at motorens overføringsfunktion repræsenterer et stabilt system. Stepresponset for den samlede motoroverføringsfunktion er afbilledet på Figur 15.



Figur 15: Steprespons for motormodel.

Det bemærkes, at der er et væsentligt oversving, $M_p = (28.4 - 22.7)/22.7 = 0.25$, hvilket er meget uønsket. Tidsdomænespecifikationerne ønskes forbedret ved at indsætte regulatorer.

5.4 Regulatorer

For at forbedre tidsdomænespecifikationerne for motoren ønskes der dimensioneret en regulator, der kan fjerne stationære fejl, mindske oversving, indsvingningstid samt stigtid. Der dimensioneres en P-, PI- og PID-regulator. Da kameraet ikke kan sample i kontinuert tid, er der indsat et zero-order hold i systemet. Dette zero-order hold konverterer det kontinuerte signal til et diskret signal.

Der samples i det følgende med en frekvens på 0.040 sek^{-1} svarende til en samplingtid for kameraet på 25 sek. Motorens overføringsfunktionen, $G(z)$, konverteres til diskret tid;

$$G(z) = \frac{0.1473z^3 - 0.09801z^2 - 0.007014z - 2.42 \cdot 10^{-5}}{z^4 - 1.807z^3 + 0.8113z^2 - 0.004787z + 3.477 \cdot 10^{-5}}$$

Regulatorerne dimensioneres alle ud fra motorens overføringsfunktion i diskret tid. Matlab koden til regulatorerne forefindes på CD'en i filen system.m.

5.4.1 P-regulator

Proportional regulatoren dimensioneres ud fra bodeplottet af $G(z)$. Da systemet ønskes stabilt, tilstræbes en fasemargin på 60 grader. Krydsfrekvensen bliver derfor fundet ved $-180+60=-120$ grader, til $\omega_c = 23.6$ rad/sek. Ved samme frekvens er amplituden -29.8 dB. Proportional konstanten bliver derfor;

$$K_p = -29.8 \text{ dB} = 10^{29.8/20} = 30.90$$

Ved at indsætte P-regulatoren i systemet opnås der en fasemargin på 60 grader som ønsket. For bodeplots se appendiks H.

5.4.2 PI-regulator

Krydsfrekvensen fundet i afsnit 5.4.1 benyttes til at finde tidskonstanten i integrator delen af PI-regulatoren. Forholdet mellem tidskonstanten, τ_i , og krydsfrekvensen er her valgt til 1/4. Tidskonstanten bliver derfor;

$$\tau_i = \frac{4}{\omega_c} = \frac{4}{23.6 \text{ rad/sek}} = 0.17 \text{ sek}$$

Integratorleddet indsættes i systemet, og der tegnes et nyt bodeplot for at dimensionere proportionaldelen, denne dimensioneres ligesom for en P-regulator. Det er dog ikke muligt at vælge en krydsfrekvens på -120 grader, derfor vælges en krydsfrekvens, der kommer så tæt på som muligt, $\omega_c = -16.4$, ved en fasedrejning på -130 grader. Ved denne frekvens er amplituden -26.2 dB, hvilket giver en K_p på;

$$K_p = -26.2 \text{ dB} = 10^{26.2/20} = 20.42$$

Den samlede PI-regulator har hermed formen;

$$G_{PI}(z) = K_p \frac{\tau_i z + 1}{\tau_i z} = 20.42 \frac{0.17 z + 1}{0.17 z}$$

Når denne regulator indsættes opnås der kun en fasemargin på 50 grader, hvilket er mindre end de ønskede 60 grader. For bodeplots se appendiks I.

5.4.3 PID-regulator

Indledningsvist sættes tidskonstanten i differentiator-leddet lig med den største pol i systemet, $s=J/b$, $\tau_d = 0.90$ sek. Overføringsfunktionen for differentiator-delen er da;

$$G_{diff}(z) = \frac{\tau_d z + 1}{\alpha \tau_d z + 1}$$

hvor konstanten α er sat til 0.2. Denne overføringsfunktion indsættes i systemet, og der tegnes et bodeplot. Ud fra bodeplottet bestemmes τ_i på samme måde som for tidskonstanten i integrator-delen af PI-regulatoren. I dette tilfælde opnås en krydsfrekvens på 31.3 rad/sek, hvilket giver en tidskonstant på; $\tau_i = 0.13$ sek. Overføringsfunktionen for integrator-delen er;

$$G_{int}(z) = \frac{\tau_i s + 1}{\tau_i s}$$

Integrator-delen indsættes nu sammen med differentiator-delen, og der tegnes et nyt bodeplot, der benyttes til at bestemme proportionaldelen af PID-regulatoren. Fremgangsmåden er den samme som for K_p i P-regulatoren. Krydsfrekvensen findes ved 18.5 rad/sek, igen for en fasedrejning på -120 grader. Ved denne frekvens er forstærkningen -13.4 dB, hvilket giver en K_p på;

$$K_p = -13.4 \text{ dB} = 10^{13.4/20} = 4.68$$

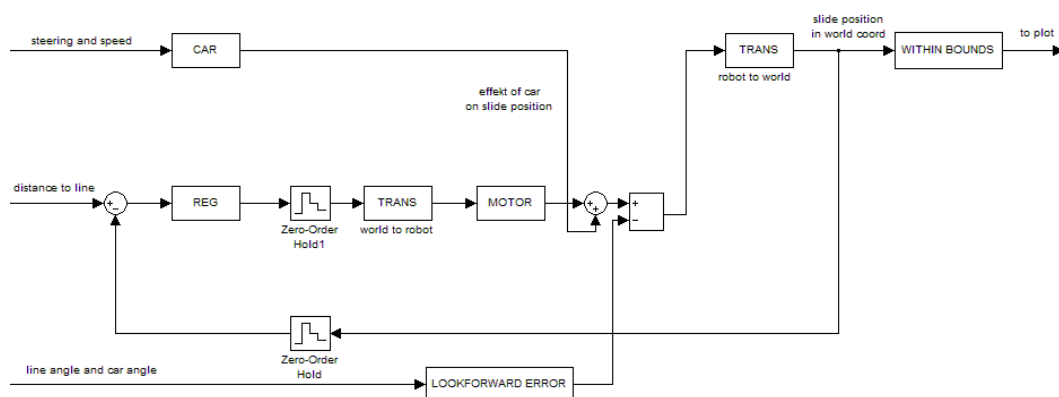
Den samlede overføringsfunktion for PID-regulatoren er;

$$G_{PID}(z) = K_p \frac{\tau_i s + 1}{\tau_i s} \frac{\tau_d z + 1}{\alpha \tau_d z + 1} = 4.68 \frac{0.13 s + 1}{0.13 s} \frac{0.90 z + 1}{0.2 \cdot 0.90 z + 1}$$

Med denne regulator opnås en fasemargin på 60 grader som ønsket, se appendiks J.

5.5 Samlet model

Det samlede system er bygget op omkring undersystemerne: motoren, bilen og reguleringssystemerne. Systemet tager linjens placering (start punkt og vinkel) i verdens koordinater, styrevinklen af bilen og bilens hastighed som input og giver slædens position i verdenskoordinater som output. På Figur 16 er systemets opbygning skitseret.



Figur 16: Skitse af simuleringssystemet

De tre undersystemer er: REG (reguleringssystemet), MOTOR (motorens lukket-sløjfe overføringsfunktion) og CAR (simuleringen af bilen). Bilens position er en forstyrrelse i systemet svarende til, at føreren kan køre med mange udsvingninger. Kameraets sampling-frekvens simuleres med de to Zero-order hold-blokke. Blokkene kaldet TRANS er transformationen fra verdenskoordinater til robotkoordinater eller omvendt. WITHIN BOUNDS-blokken sikre at slæden ikke bevæger sig uden for de fysiske grænser sat af slaglængden. Grund til at det ikke er den "afgrænsede" værdi for slædens position der sendes tilbage i tilbagekoblingen er at systemet, derved vil prøve at gøre op for den fejl der opstår når slædens position begrænses. Systemet vil derved forsøge at sende slæden gennem enderne på slaglængden og når linjen igen kommer inden for slaglængden vil systemet have opbygget så stor en fejl at den ikke kan regulere sig ind på linjen på kort tid. For det komplette system, se appendiks F.

LOOKFORWARD ERROR-blokken regner afstanden til strengen ud fra geometriske betragtninger over, hvor langt kameraet ser fremad i forhold til slæden. Denne udregning tager bilens styrevinkel, θ_v , ind og

returnerer $\text{lookForward} \cdot \sin(\theta_v)$, hvor lookForward er en konstant, der angiver afstanden mellem slæden og det punkt, som billedbehandlingen undersøger. For en grafisk repræsentation af de geometriske overvejelser se appendiks K.

6. Tests

Testene er inddelt i tre områder: de mekaniske dele, billedbehandlingen og simuleringen.

6.1 Mekaniske dele

Det overordnede mekaniske system skal leve op til kravene om en slaglængde på 50 cm, samt at slæden kan bevæges med 40 cm/s. Slaglængden er opmålt til 51.8 cm, hvilket giver mulighed for at korrigere med ca. ± 26 cm. Dette krav er derfor opfyldt.

6.1.1 Gnidning

For at bestemme gnidningsmodstanden mellem glidelejerne og akslerne fjernes tandremmen, og modstanden måles med en fjederkraft-måler. Målingen foretages ved at trække i pladen, der er monteret på glidelejerne, i køreretningen. For statisk gnidningsmodstand viser fjederkraftmåleren 1.8 kg, mens den falder til 1.4 kg, når slæden er i bevægelse. Disse målinger svarer til gnidningskræfter på henholdsvis 17.7 N og 13.7 N for statisk henholdsvis dynamisk gnidningskræfter.

Disse værdier er meget små i forhold til motorens maksimale belastningsgrænse på 350 N for radial påvirkning, se Zeitlauf datablad, se CD'en. Denne gnidningsmodstand vil derfor ikke påvirke driften af systemet.

6.1.2 Kørsel uden belastning

Der foretages en kørsel uden belastning, hvor det undersøges, hvordan opstillingen reagerer på forskellige hastigheder og hurtige retningsændringer. Der foreligger et videoklip på den vedlagte CD.

Det er tydeligt, at det er muligt at køre med forskellige hastigheder og ændre retning hurtigt. Det er desuden muligt at opnå en stationær tilstand uden drift af motoren og slæden.

Det er muligt at opnå vilkårlige positioner på hele den effektive slaglængde.

6.1.3 Kørsel med belastning

For at undersøge, hvordan opstillingen påvirkes af en belastning svarende til den udvalgte del af Mk1, foretages der en kørsel, hvor slæden belastes med 12 kg. Der foreligger videodokumentation for dette på vedlagte CD.

Det bemærkes, at opstillingen ikke påvirkes af den ekstra belastning, hvorved det kan konkluderes, at opstillingen er i stand til at bevæge en masse svarende til "malebenets".

Det tager lidt over 1 sekund for slæden at bevæge sig fra den ene ende af slaglængden til den anden, ved tophastighed. Da slaglængden er på 51.8 cm, kan det konkluderes at robotten kan opnå hastigheder i nærheden af de ønskede 40 cm/s.

6.2 Billedbehandlingstest

Billedbehandlingens stabilitet skal undersøges. Dette gøres ved at teste for billeder taget forskellige steder på en fodboldbane. I det følgende vil billedbehandlingen blive testet for både tydelige og utydelige streger samt for snoren brugt ved anlæggelse af nye baner. Billederne med utydelige streger repræsenterer worst-

case-scenario (WCS), hvor stregerne er blevet udvasket af regn og slid. Disse WCS-billeder bedømmes af Claus Harald Mortensen fra KFB til at være meget værre end de streger, de genoptegner efter. Målet er derfor at billedbehandling skal kunne finde stregen på de tydelige billeder og på nogle af WCS-billederne.

Billederne er taget med meget lukket iris for at fjerne påvirkningen af sollyset. Alle billeder er taget i en højde af 1 meter over græsset med en vinkel på 55 grader til lodret.

Et par eksempler på billederne vises her.

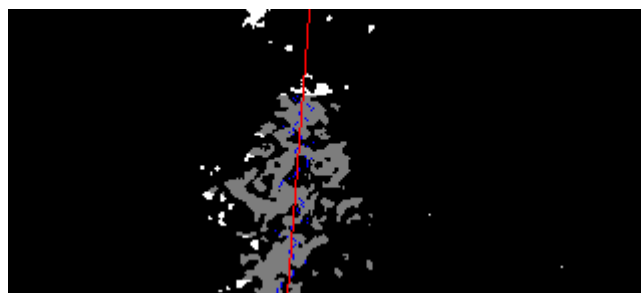
Utydelig streg



Figur 17: Utydelig streg

$$a = 12.71$$
$$b = -1768.98$$

Regressionslinjen stemmer godt overens med den aktuelle linje.



Figur 18: Regressionslinje for utydelig streg

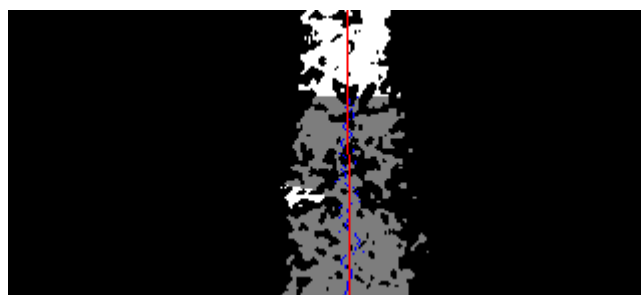
Tydelig streg



Figur 19: Tydelig streg

$$a = -276.59$$
$$b = 46937.66$$

Godt fit!



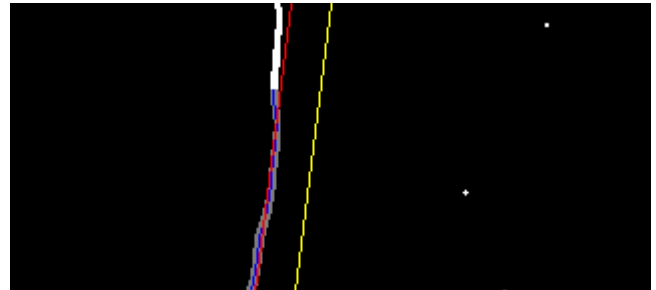
Figur 20: Regressionslinje for tydelig streg

Snor



Figur 21: Hvid snor

$$a = 7.73$$
$$b = -1094.77$$



Figur 22: Regressionslinje for hvid snor

Ud fra billedtestene kan det konkluderes at det er muligt at lokalisere tydelige streger (Figur 19 og Figur 20) og snoren (Figur 21 og Figur 22). I nogle tilfælde er det muligt også at lokalisere stregerne i WCS-billederne (Figur 17 og Figur 18). Det bemærkes at regressionslinjen for snoren er forskudt til højre, så der ikke males ovenpå snoren. Antagelsen om at buestykkerne kan approksimeres til rette linjer, viser sig at være gyldig, idet regressionslinjerne stemmer overens med den aktuelle linje i billedet i det undersøgte område.

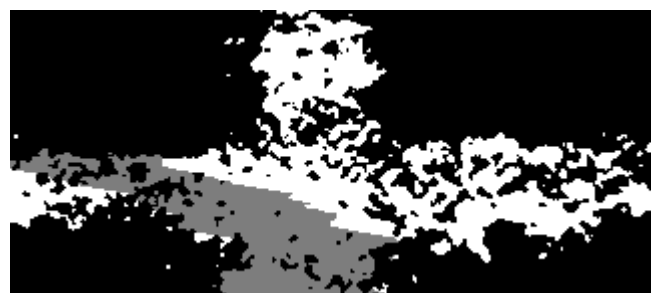
De ovenstående billeder er eksempler, hvor strengen blev fundet. De følgende er eksempler, hvor der opstår problemer. De følgende billeder viser kryds og hjørner;

Firearmet-kryds



Figur 23: Firearmet-kryds

Regressionslinjen bliver frasorteret da den passer dårligt til målepunkterne.



Figur 24: Regressionslinjen for firearmet-kryds er uegnet

Hjørne



Figur 25: Hjørne

$a = 0.00$

$b = 0.00$

Billedbehandlingen fejler på hjørnet.



Figur 26: Regressionslinjen for hjørnet er uegnet

Det ses tydeligt, at billedbehandlingen ikke kan finde en passende regressionslinje i disse tilfælde (Figur 23 til Figur 26). Det skyldes, at ved at søge vandret efter overgangen mellem græsset og stregen i billedet vil de tværgående streger bevirke, at søgningen driver mod venstre side af billedet.

Dette anses dog ikke for at være en stor forhindring, da en væsentlig større del af banen består af rette linje i forhold til, hvor mange hjørner og kryds der er. Problemet kan løses ved, at den overliggende software, der bestemmer robotens bevægelser på baggrund af regressionslinjen, forsætter lige ud, hvis der er et billede med en dårlig regressionslinje. Herved vil robotten blive på stregen og vil blive rettet ind efter krydset, hvor billedbehandlingen igen kan lokalisere den rette linje.

Beregningstiderne for billedbehandlingen ligger i gennemsnit omkring 0.021 sek for de undersøgte billeder, hvilket anses for at være tilstrækkeligt hurtigt til, at det ikke er behandlingen af billederne, der sætter grænsen for, hvor hurtigt der kan reguleres.

Det skal bemærkes, at de testede billeder alle sammen er stilbilleder, taget i en stationær tilstand. Det forventes, at der kan forekomme problemer, når billederne tages under bevægelse. F.eks. kan rystelser ved billedopsamlingen føre til at flere billeder bliver forkastet, da de bliver mere utydelige.

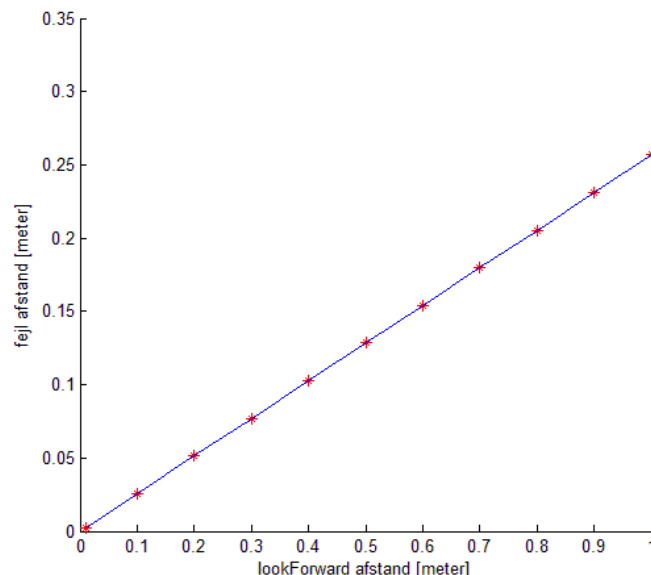
Se appendiks L for resten af billedtestene, hvor der blandt andet testes for sving, kryds, eksterne påvirkninger mm. Eksterne påvirkninger såsom skygger, kraftigt lys eller manglende græs kan håndteres af billedbehandlingen.

6.3 Model test

Simuleringssystemet skal testes for, om det afspejler virkeligheden. I appendiks M er undersystemet, der beskriver bilens bevægelser, testet. Det kan derfra konkluderes, at simuleringssystemet, der beskriver bilen, afspejler virkeligheden ved kørsel lige ud såvel som i buer.

Ud fra lookForward-delen af simuleringen kan det undersøges, hvor langt frem kameraet bør se. Hvis der ses for langt fremad, vil robotten reagere på information, der ikke passer til dens position. Referencen er sat til 0, der er ingen regulator i systemet, og input vinklen er givet som $(0.10 \cdot \sin(0.5 \cdot t + \pi/2))$, hvilket svarer

til, at føreren af bilen laver udsvingninger på rattet på ± 5.7 grader i forhold til lige ud. På Figur 27 er sammenhængen mellem lookForward konstanten og den maksimale fejl-afstand afbilledet, se plottingLFE.m på CD'en.



Figur 27: Fejlafstandsgraf

Det bemærkes, at der er en tydelig lineær sammenhæng (den blå linje) mellem de røde målepunkter. Ud fra grafen kan det konkluderes, at jo kortere kameraet ser fremad desto mindre bliver fejl-afstanden. Hvis lookForward konstanten sættes til 1.0 m opnås, der en fejl-afstand på omkring 25.5 cm, hvilket er uacceptabelt. Hvis konstanten derimod sættes til 0.1 m, bliver fejl-afstanden kun 2.6 cm. Grunden til at kameraet ikke peger lodret ned og derfor har en lookForward på 0.0 m, er, fordi kameraet herved ville se "skoen" og være mere udsat for skygger fra robotten og bilen. Det anbefales, at kameraet placeres således, at det har en lookForward-konstant i intervallet [0.05 m ; 0.15 m].

Hvis tilbagkoblingen og afstandskorrektionen ($\text{lookForward} \cdot \sin(\theta_v)$) fjernes, vil slædens position være i en konstant afstand til bilen, da der ikke foretages nogen form for regulering i systemet.

Hvis ikke slæden reguleres, vil den forblive i den samme stationære position i robot- og bilkoordinat-systemerne, se afsnit N.1 i appendiks N.

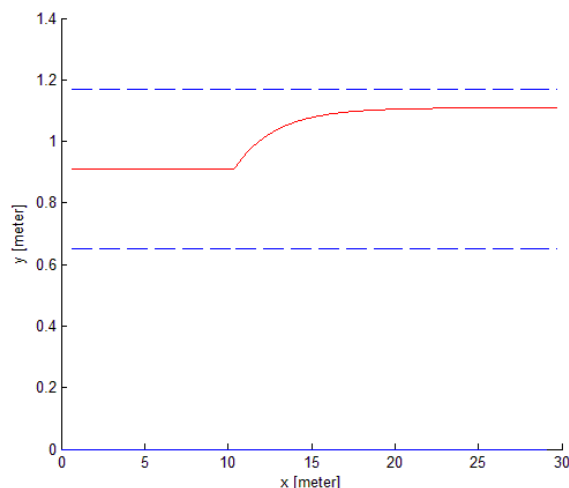
6.3.1 Regulator tests

I det følgende vil det samlede systemet blive testet. Bilens hastighed holdes konstant, svarende til 7 km/t, mens der foretages trin på slædens position-reference (denne reference svarer til linjens position i verdens koordinater). Systemets egenskaber testes over en længere periode ved at sætte en sinus-kurve på styrevinklen for at afgøre, hvordan systemet påvirkes ved gentagende ændringer i styringen.

I det følgende vil testene blive dokumenteret med en graf, hvor bilens position er markeret med blåt mens slædens position er markeret med rødt. Slaglængdens grænser er afbilledet med stiplede blå linjer. Graferne i de følgende afsnit er også at finde i appendiks N, hvor samtlige tests af de tre regulatorer forefindes.

6.3.1.1 Reference trin-respons

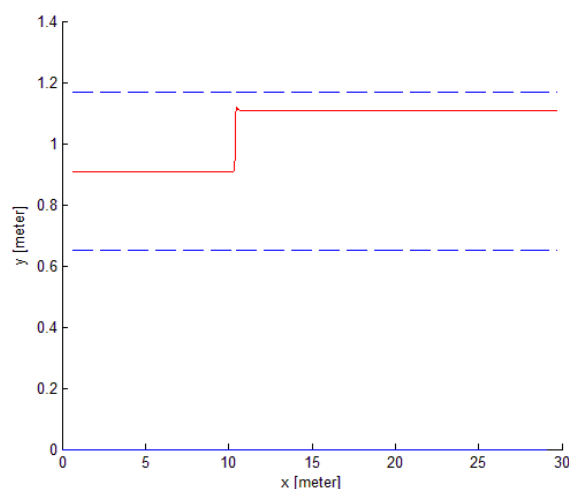
Bilens styrervinkel sættes til nul, mens der udføres et trin på linjens reference position fra 0.909 m (y-afstanden fra bilens Origo til midten af slaglængden) til 1.109 m til tiden 5 sekunder. Det svarer til at linjen instantant bevæger sig 20 cm til siden. Simuleringen skal vise i hvor høj grad, systemet er i stand til at håndtere ujævnheder i den opmærkede linje. Et spring på 20 cm er langt over hvad der kan forekomme på boldbanerne, men hvis systemet er i stand til at håndtere dette, kan det også håndtere mindre ujævnheder. Figur 28 viser slædens position i forhold til bilen, hvor der ikke er indsat en regulator.



Figur 28: Reference trin-respons uden regulator

Robotten er lang tid om at svinge ind til den ønskede position (omkring 10 sekunder), hvor bilen når at bevæge sig ca. 20 meter. Det er derfor tydeligt at der er behov for en regulator i systemet.

Ud fra testene af de tre regulatorer (se appendiks N) vurderes P-regulatoren til at være den bedst egnede til at håndtere denne form for påvirkning, se Figur 29.



Figur 29: Reference trin-respons med P-regulator

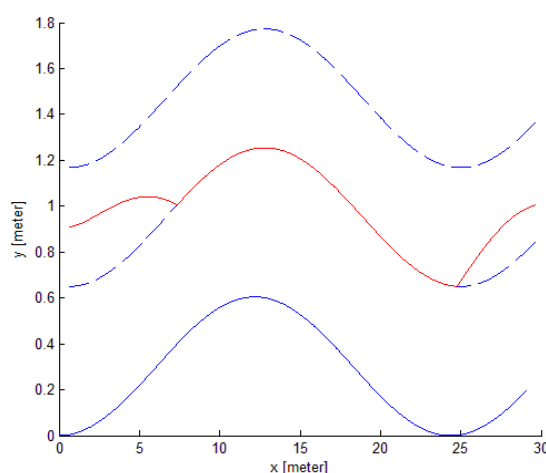
Med den valgte regulator er det tydeligt at systemet forbedres væsentligt, idet slæden opnår den ønskede position efter blot 0.2 sekunder. Der er ingen stationær fejl efter indsvingningen, hvilket er et krav for at regulatoren kan godkendes.

Forskellen mellem P- og PI-regulatoren ligger i at PI-regulatoren har et oversving, men bortset fra dette er de meget lig hinanden. Især ved mindre trin-påvirkninger er forskellen mellem de to regulatorer minimal.

6.3.1.2 "Sinus"-kørsel

Denne test skal vise hvor meget systemet påvirkes af at bilen svinger. Linjens referencepositionen sættes til 0.909 m, svarende til midten af slaglængden. Linjen ligger derfor horisontalt i koordinatsystemet i en konstant højde af 0.909 m. Styrevinklen sættes til en sinus-kurve af formen, $0.03 \cdot \sin(0.5 \cdot t + \pi/2)$. Dette svarer til at føreren af bilen hele tiden svinger rattet fra side til side, med et maksimalt udsving på 1.7 grader. Bilen vil komme til at køre i en harmonisk bevægelse.

Ved denne sinus-kurve vil det ikke være muligt for robotten at placere slæden over strengen hele tiden, da linjen til tider vil ligge uden for robottens slaglængde. På Figur 30 ses en "sinus"-kørsel, hvor der ikke er indsat en regulator i systemet.

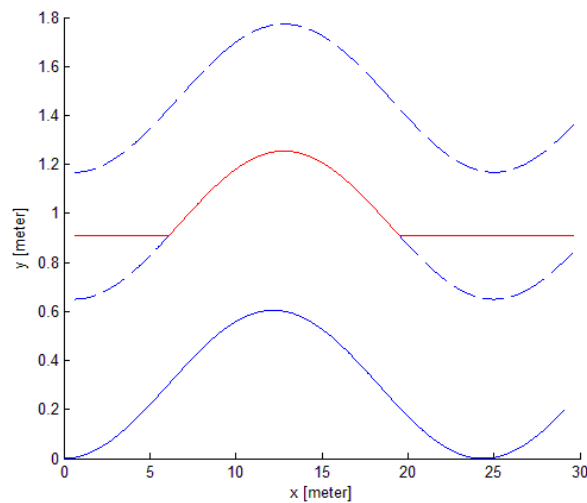


Figur 30: "Sinus"-kørsel uden regulator

Bilen laver udsving op til 60 cm over en afstand på 12 m. Når KFB's personale optegner streger er de vant til at køre mere præcist efter linjen. Denne simulering viser hvordan systemet vil reagere på en mere "udsvingende" kørsel.

Det er tydeligt at robotten ikke formår at følge strengen, når denne er inden for slaglængden. Endnu en gang er det tydeligt at der er behov for regulering af robotten, for at opnå lige streger.

Af de tre undersøgte regulatorer er det PI-regulatoren der er bedst egnet til denne form for påvirkning. På Figur 31 ses en "sinus"-kørsel med PI-regulator.



Figur 31: "Sinus"-kørsel med PI-regulator

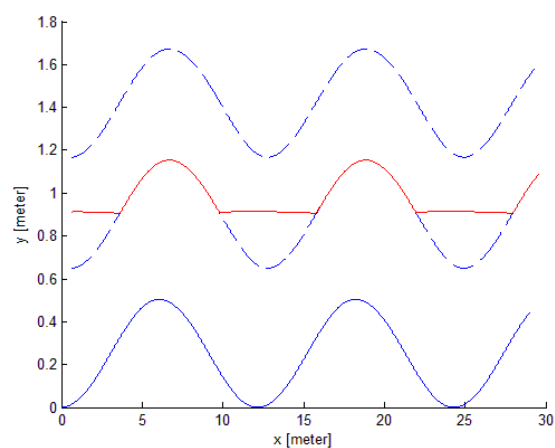
Der er sket en tydelige forbedring i forhold til kørslen uden regulator. Når strengen er inden for slaglængden, så det er muligt for robotten af placere sig over strengen, er der en fejlfafstand på ± 2 mm. Dette er væsentligt bedre end det KFB's personale kan opnå med Mk1.

6.3.1.2 Afrunding

På baggrund af testene vurderes det at PI-regulatoren vil være den bedst egnede regulator til malerobotten. Denne vurdering bygger på at PI-regulatoren har den mindste fejlfafstand ved "sinus"-kørsel. Det vurderes at robotten hellere skal kunne modstå påvirkninger fra bilens udsvingninger frem for påvirkningerne af at linjen "hopper" til siden. Selvom P-regulatoren er vurderet til at være det bedste valg ved trin-påvirkninger på linjens position, medfører de små forskelle mellem P- og PI-regulatorernes trin-responser at PI-regulatoren kan benyttes. PI-regulatoren anses for at være det bedste "all-round" valg af regulator.

De udførte tests viser senarier der er være end dem der kan forekomme ved optegning af boldbanerne. KFB's personale er vant til at køre med en nøjagtighed på et par centimeter og strengen vil ikke instantant flytte sig 20 centimeter. Det kan derfor konkluderes at der ved at indsætte en PI-regulator kan opnås en præcision på ± 2 mm ved optegning af boldbaner.

Afslutningsvist simuleres systemet med den valgte PI-regulator, hvor styrevinklen er en sinus kurve af formen, $0.10 \cdot \sin(1 \cdot t + \pi/2)$, hvilket er udtryk for en meget voldsom kørsel. På Figur 32 er denne kørsel vist.



Figur 32: Voldsom kørsel med PI-regulator

Det bemærkes at slæden stadig placeres over linjen, når linjen er inden for slaglængdens begrænsninger. Fejlafstanden bliver nu ± 6 mm, hvilket er over den ønskede nøjagtighed. Denne test viser at føreren af bilen ikke kan køre meget voldsomt og stadig forvente at få en nøjagtig og lige genoptegning.

7. Konklusion

Dette kapitel indledes med en kort gennemgang af mulighederne for at arbejde videre med projektet. Afslutningsvist vil de opnåede resultater blive præsenteret.

7.1 Videre arbejde

Billedbehandlingen kan forbedres ved at tilføje muligheden for at ignorere tværgående streger, hvorved billedbehandlingen også vil kunne finde en brugbar regressionslinje i kryds og hjørner. Herudover er der mulighed for at finde en løsning på problemet angående vurderingen af regressionslinjen.

Den valgte regulator skal implementeres, det være sig i software eller hardware.

Systemet skal samles, ved at montere et kamera på robotten og udvikle det overliggende software, til kørsel af robotten. Her skal der blandt andet arbejdes med, hvordan positionen af slæden bestemmes ved start, og hvordan man forhindrer slæden i at køre helt ud til enderne af slaglængden.

7.2 Perspektivering

En visionstyret malerobot kan finde anvendelse inden for andre områder end optegning af boldbaner. Iblandt anvendelsesmulighederne kan nævnes optegning af vejstriber og landingsbaner.

I United Kingdom er der udviklet en autonom løsning til optegning af boldbaner. Projektet hedder BeamRider™ og er et multi-million projekt udviklet til at tegne rette linjer efter en laserstråle. BeamRider™ består af en laser og en vogn med maleudstyr. Ved at placere en laserstråle og en reflektor på en ret linje, kan maleudstyret regulere sin position i forhold til laserstrålen. Fordelene ved dette system er at stregerne bliver lige, dog er der ikke mulighed for at tegne cirkler med dette system. Desuden er opsætningen af laseren inden hver linje kan tegnes omstændig. For mere information se (BeamRider™-hjemmesiden).

7.3 Resultater

Der er designet, udviklet og konstrueret en malerobot til optegning af boldbaner. Robotten kan bruges ved både sidemontering og frontmontering på en golfbil. Med et kamera er det muligt at følge en eksisterende streger eller en hvid snor. Der er gennem projektperioden opnået følgende målsætninger;

- Den udviklede billedbehandling gør det muligt at følge eksisterende streger eller en hvid snor brugt ved opmærkning af nye boldbaner.
- Den valgte PI-regulator sikrer en nøjagtighed på ± 2 mm, ved kørsel med 7 km/t.
- Den mekaniske del af robotten har en samlet slaglængde på 51.8 cm, hvilket muliggør korrektioner op til ± 25.9 cm.
- Slæden på robotten kan bevæge sig med omkring 40 cm/s.

Det kan derfor konkluderes at kravspecifikationerne er nået.

Ud fra simuleringen af systemet kan det konkluderes at malerobotten kan optegne lige linjer, også under påvirkning fra bilen.

Billedbehandlingen kan lokalisere både rette linjer og buestykker, dog er der problemer ved tværgående linjer. Dette problem anses ikke for at være kritisk, da der er væsentlig færre kryds end linje- og buestykker på banerne. Problemet kan derfor løses ved at den overliggende software holder robotten på samme kurs, hvis billedbehandlingen skulle fejle på et billede.

Arbejdsgangen omkring genoptegning af boldbaner er, ved introducering af malerobotten, blevet simplificeret og gjort mindre krævende for føreren. Det kan konkluderes, at det er lettere at opnå nøjagtig optegning med malerobotten.

Det konkluderes at den konstruerede malerobot, ved indførelse i optegningsprocessen, vil gøre det lettere at opnå mere præcis optegning og gøre arbejdsprocessen mindre krævende for KFB's personale.

Referencer

Bøger:

G. Bradski og A. Kaehler, *Learning OpenCV*, O'Reilly, 1. udgave, 2008, ISBN 9780596516130.

J. M. Carstensen, *Image Analysis, Vision and Computer Graphics*, DTU, 2. udgave, 2002.

O. Christensen, *Differentielligninger og uendelige rækker*, DTU, 2006.

O. Jannerup og P. H. Sørensen, *Reguleringsteknik*, Polyteknisk forlag, 4. udgave, 2006, ISBN 8750209825 9878750209829.

R. A. Johnson, *Miller & Freund's Probability and Statistics for Engineers*, Pearson Prentice Hall, 7. udgave, 2005, ISBN 0131278401.

I. R. Nourbakhsh og R. Siegwart, *Introduction to Autonomous Mobile Robots*, The MIT Press, 2004, ISBN 026219502X 9780262195027.

P. Printz og U. Kirch-Printz, *C pocket reference*, O'Reilly, 1. udgave, 2002, ISBN 9780596004361.

H. D. Young og R. A. Freedman, *University physics – with modern physics*, Pearson Addison Wesley, 12. udgave, 2008, ISBN 0321501306 9780321501301.

Noter:

S. Perreault og P. Hébert, *Median Filtering in Constant Time*, IEEE.

ConiTech, *Conti Syncrobelt – Synchronous Drive Belts*, ConiTech Division of Continental AG.

Aratron, *Tandremme*, Aratron.

smrcl – note fra DTU Elektro, Automation and Control.

Hjemmesider:

BeamRider™. Hjemmeside for BeamRider™ optegnings systemet;

<http://www.beamrider.org.uk/>

Timmy. Information om SMR'erne på DTU Elektro, Automation and Control;

<http://timmy.elektro.dtu.dk/rse/wiki/index.php/SMR>

Yamaha, Industrial robots, Forhandler af lineær aktuatorer;

<http://www.yamaha-motor.co.jp/global/industrial/robot/index.html>

Igus, Forhandler af glidelejer mm.;

<http://www.igus.dk/default.asp>

Mobra A/S, Forhandler af tandremshjul;

<http://www.mobra.biz/?layout=0>

ROnline, Forhandler af tandremme og legebukke;

<http://dk.rs-online.com/web/>

Zeitlauf, Forhandler af børsteløse elektromotorer;

<http://www.zeitlauf.com/start.html>

ElectroCraft, Forhandler af styreapparater;

<http://www.electrocrafter.com/products/drives/>

Mathworld, Beskrivelse af Least-squares metoden;

<http://mathworld.wolfram.com/LeastSquaresFitting.html>

CS, Introduktion til programmering med openCV;

<http://www.cs.iit.edu/~agam/cs512/lect-notes/opencv-intro/index.html>

OpenCV funktioner og beskrivelser af disse;

http://www710.univ-lyon1.fr/~bouakaz/OpenCV-0.9.5/docs/ref/OpenCVRef_ImageProcessing.htm

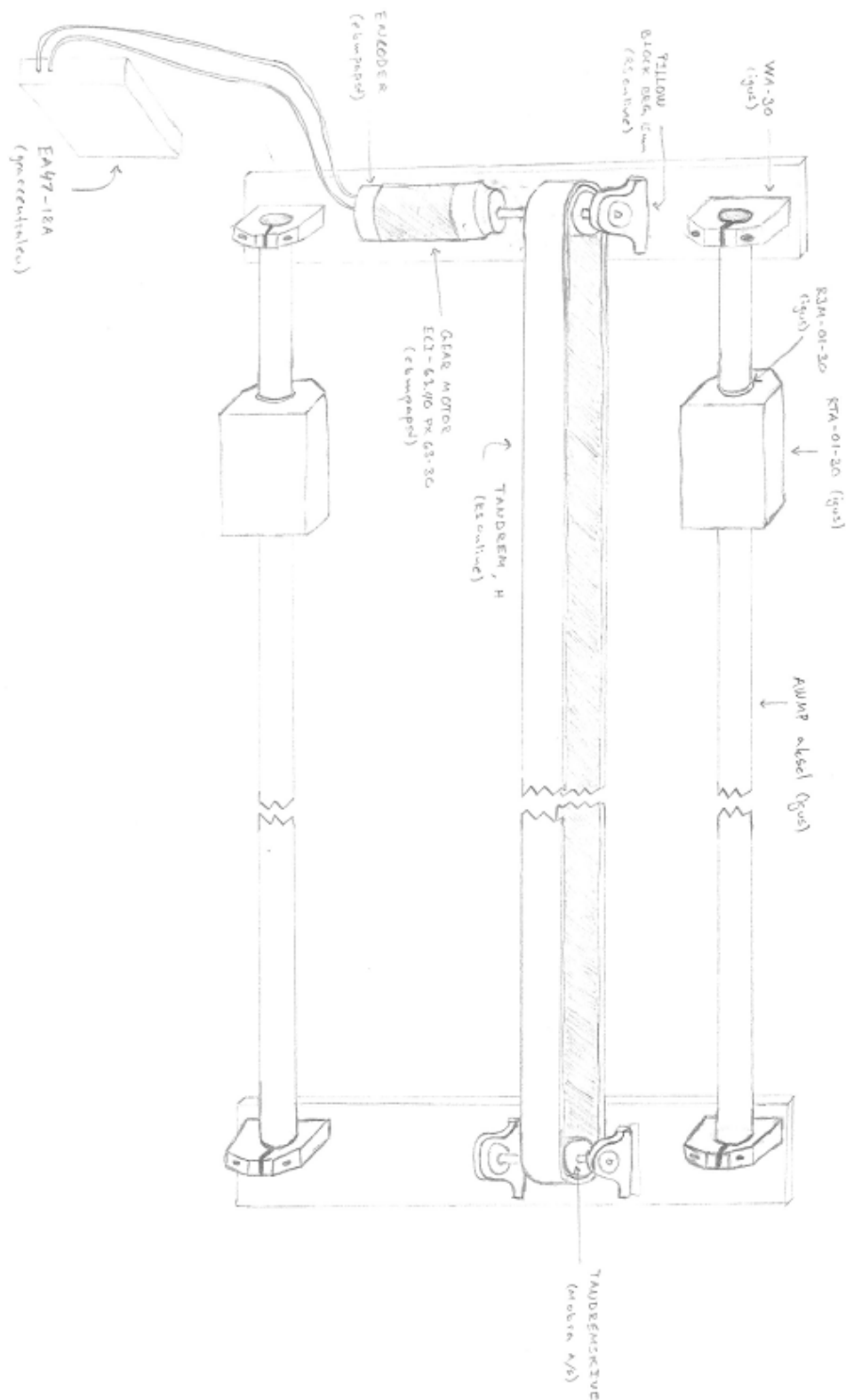
Beskrivelse af Region Of Interest i openCV;

http://nashruddin.com/OpenCV_Region_of_Interest_%28ROI%29

Tutorial i openCV;

<http://www.site.uottawa.ca/~laganier/tutorial/opencv+directshow/cvision.htm>

Appendiks A: Skitse af robotten



Appendiks B: Fastlæggelse af LIMIT

Konstanten LIMIT bruges i billedbehandlingen til at angive, hvor mange pixelrækker der skal undersøges i billedet. Hvis der vælges for få, bliver regressionslinjen upræcis, og hvis der vælges for mange, udføres der unødige udregninger, der forlænger beregningstiden.

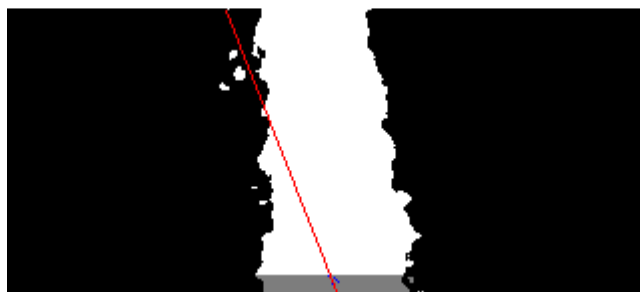
Konstanten fastlægges ved at undersøge dens indvirkning på regressionslinjen. Konstanten medianValue er sat til 5. Der afprøves med forskellige værdier af LIMIT på input billedet;



Figur 33: Input billede til LIMIT fastlæggelse

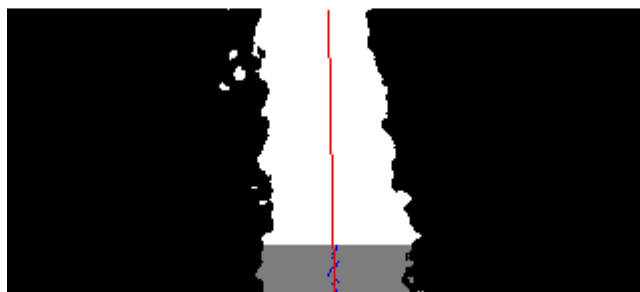
For LIMIT=20

Det ses tydeligt, at den estimerede regression ikke stemmer overens med linjen.



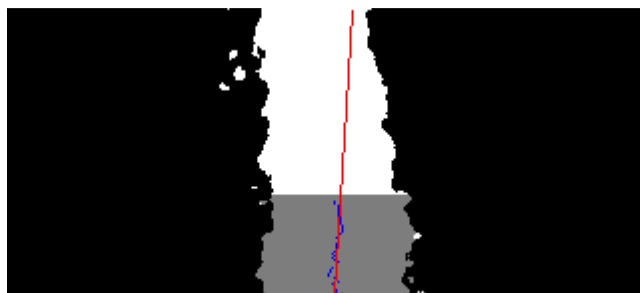
For LIMIT=50

Estimeringen er tydeligt forbedret i forhold til, regressionslinjen for 20 målepunkter.



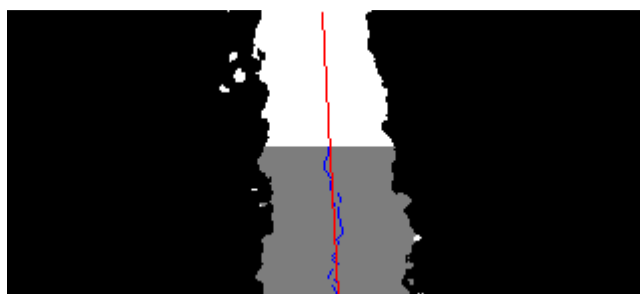
For LIMIT=100

Ved et lille antal målepunkter er regressionslinjen meget følsom over for udsving i linjen.



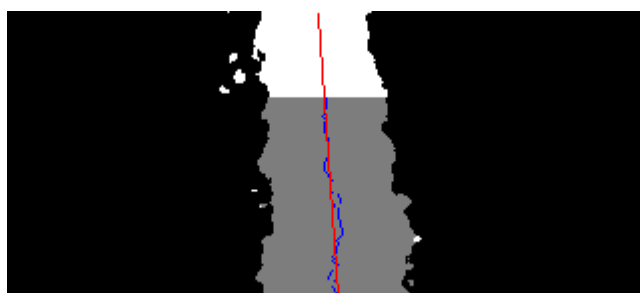
For LIMIT=150

Regressionslinjen følger pænt den opmalede hvide streg.



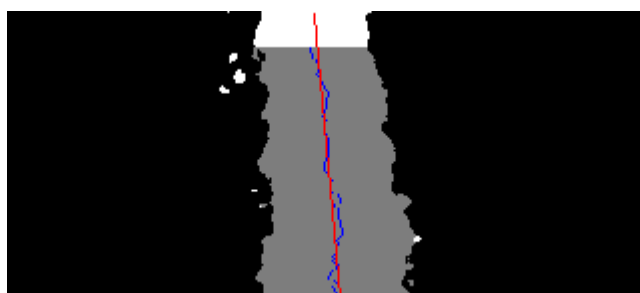
For LIMIT=200

Forskellen mellem denne regressionslinje og den ovenstående er minimal.



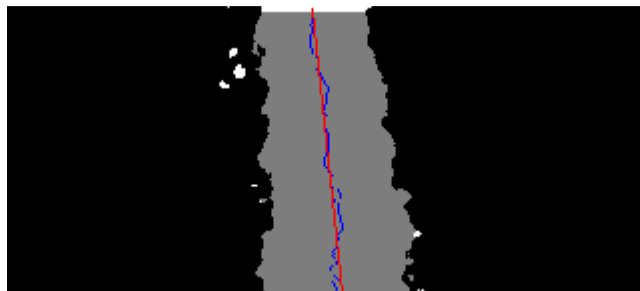
For LIMIT=250

Regressionslinjen ligner meget den for 200 målepunkter.



For LIMIT=280

Regressionslinjens hældning er stort set uændret fra testen med 250 punkter.



B.1 Konklusion

Det ses tydeligt ud fra billederne, at en LIMIT-værdi på 100 eller derunder medfører en stor fejl og ustabilitet mellem det estimerede og det aktuelle. Samtidig bemærkes det, at forskellen mellem regressionslinjerne er minimal fra 150 rækker og op. Forskellen i beregningstiden mellem at benytte 150 og 200 rækker er ikke væsentlig, og det anslås derfor, at LIMIT=200, vil være en passende størrelsesorden for konstanten.

Appendiks C: Fastlæggelse af medianValue

Konstanten medianValue angiver i billedbehandling, hvor stort et område der "midles" over med filteret. Medianfilteret erstatter hver pixel i source-billede med medianen over området $n \times n$, hvor n er medianValue. Det bemærkes, at medianValue skal være et ulige tal. Konstanten bestemmes ved at undersøges dens påvirkning på billedet. Der afprøves forskellige værdier af medianValue på input billedet (Figur 34);



Figur 34: Input billede til fastlæggelse af medianValue

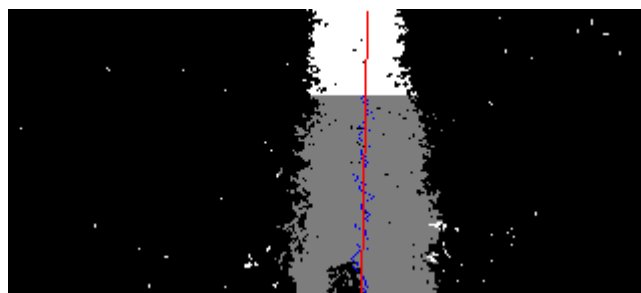
Det mørke område på stregen nederst i billedet er skyggen af kameraet. Billederne behandles kun i ROI-området fastlagt i billedbehandling. Vurderingen af konstantens indvirkning bygger på sammenligning af billederne *Blurred image* og *Measured points and regression line* for forskellige værdier af medianValue.

For medianValue = 1

Der er ingen forskel mellem input-billedet og det filtrerede billede.

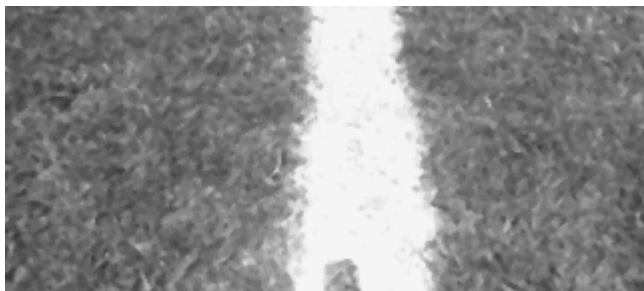


Det ses tydeligt, at der er støj i form af hvide pixels fra græsset.

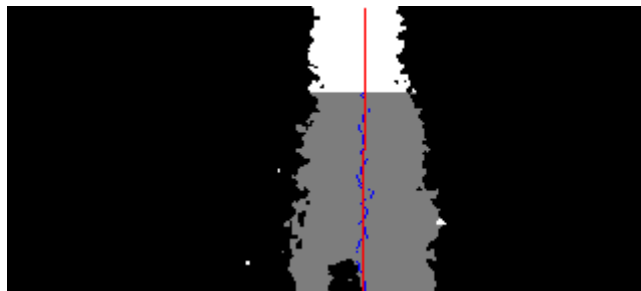


For medianValue = 3

Det filtrerede billede fremstår mere uskarpt.

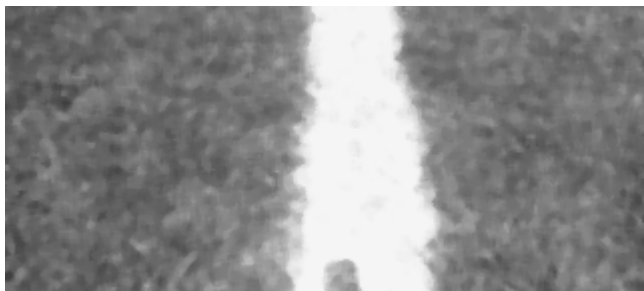


Det ses tydeligt, at den uønskede støj er fjernet.



For medianValue = 5

Det er nu svært at se konturer i græsset.



Kanterne er blevet mere afrundede og jævne.

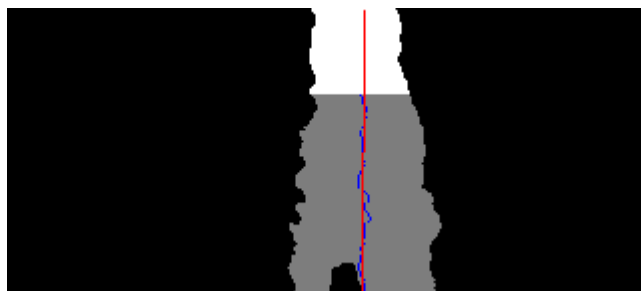


For medianValue = 7

Græsset fremstår som én sammenhængende flade.



Overgangen mellem græsset og stregen bliver mere jævn.

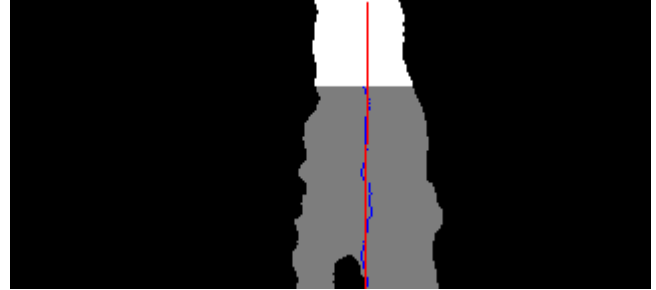


For medianValue = 9

Stregen er krympet i forhold til input-billede.
Billedet er blevet meget uklart.

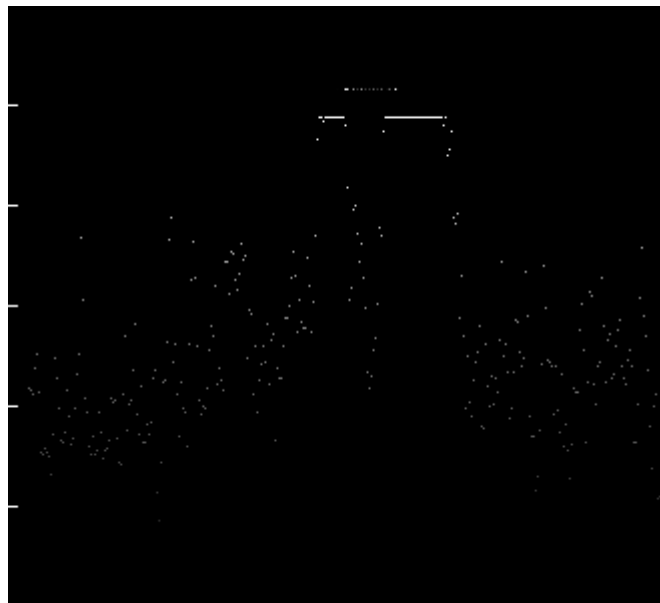


Der er meget få ujævnheder i overgangen mellem græs og streg.



Det er tydeligt ud fra billederne, at med en lille værdi for medianValue vil der forekomme støj i græs-områderne og i overgangen mellem strengen og græsset. Ud fra billederne med høje værdier for medianValue, står det klart, at det hvide område mindskes væsentligt. Dette er ikke fordelagtigt, da gamle streger er utydelige, og derved vil de brugbare område blive mindre, hvilket vil gøre det sværere at finde og følge strengen præcist. Jo større værdien for medianValue er, desto større er beregningstiden, da der skal behandles flere pixels ved hver udregning af middelværdien for nabo-pixlerne.

Det vurderes, at værdien for medianValue bør være 3, 5 eller 7. For disse værdier undersøges intensitetsdiagrammerne. Et intensitetsdiagram viser fordelingen af pixelværdierne i et grayscale-billede. Fordelingen af intensiteten i en række i billedet undersøges efter filtreringen. Der er en smule støj øverst i billedet, dette har ingen relation til intensiteten, skalaen i venstre side af figuren har en inddeling på 50. Der undersøges for den femte nederste række i billedet. Uden filtrering har billedet følgende intensitetsfordeling;

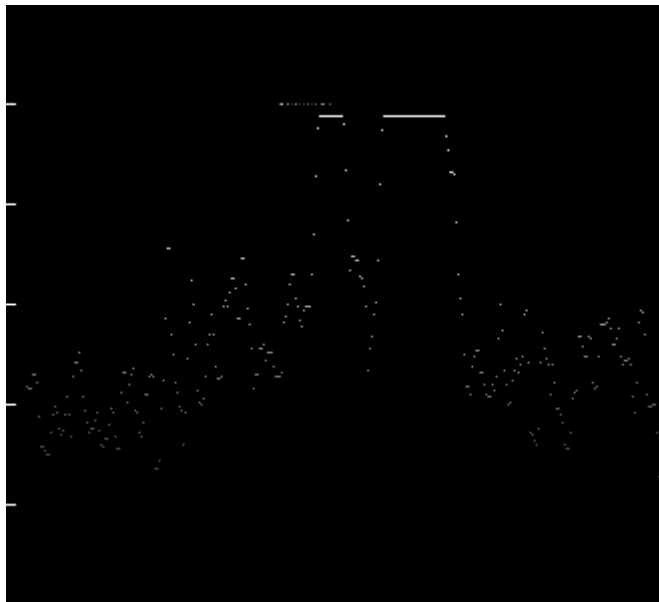


Figur 35: Intensitetsdiagram for femte nederste række i source billedet

Området omkring den hvide streg er tydelig på intensitetsdiagrammet, idet maksimumværdien på 255 opnås. Det bemærkes, at græsområdet indeholder nogle out-liers, der fejlagtigt kan godtages af billedbehandlingen som en del af strengen. Det undersøges nu, om der er en passende afstand mellem strengen og græsset for filtrerede billeder.

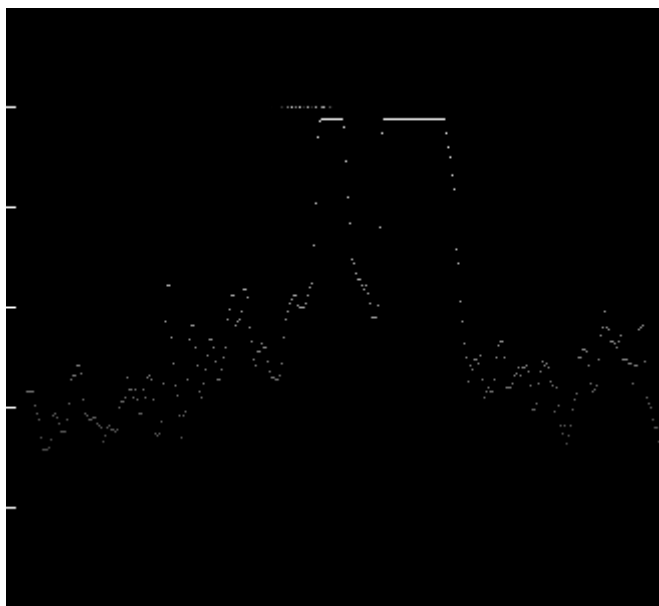
For medianValue = 3

En del af støjen er blevet reduceret, men der er stadig nogle enkelte punkter, der afviger fra det generelle græs-område.



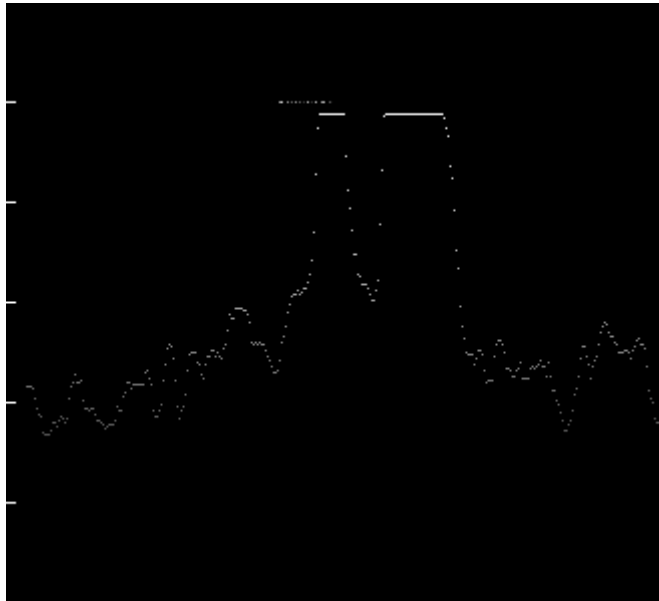
For medianValue = 5

Intensiteten for græs-området er blevet mere jævn og mindre støjfyldt.



For medianValue = 7

Græssets intensitet er blevet tydelig mere uniform, og der er nu en klar overgang mellem græsset og stregen.



Ud fra intensitetsgraferne er det tydeligt, at jo højere medianValue konstanten er, desto mere uniform bliver græssets intensitet, og intensitetskurven bliver mindre støjfyldt. Dog er det allerede muligt for medianValue=3 at se en tydelig forskel mellem græssets og stregens intensitet.

Da det anslås, at det er bedre med støj frem for at fjerne for mange brugbare punkter, vælges medianValue =3.

Appendiks D: Fastlæggelse af thresholdValue

Konstanten ligger i intervallet $[0;255]$ og angiver grænsen mellem acceptabel og uacceptabel pixelværdier i det filtrerede billede. Hvis pixlen har en acceptabel værdi, bliver denne tegnet hvid i det binære billede, ellers bliver den sort.

I det følgende vil det blive undersøgt, hvor godt det binære billede repræsenterer source billedet ved forskellige threshValue-værdier. Der vil blive undersøgt to forskellige billeder, et, hvor strengen er tydelig og et, hvor den er utydelig. De to input billeder er:

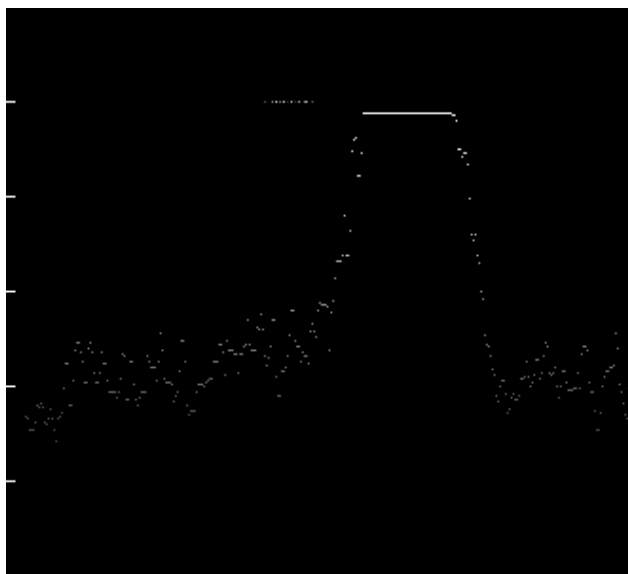


Figur 36: Tydelig streg



Figur 37: Utydelig streg

Intensitetsdiagrammerne for de to billeder med en medianValue på 3, undersøgt i række 20 fra bunden, er;



Figur 38: Intensitet for tydelig streg



Figur 39: Intensitet for utydelig streg

Værdien for `thresholdValue` skal bestemmes, således at billedbehandling inkluderer strengen men ikke græsset (eller ikke meget af græsset). Skalaen i venstre side af intensitetsdiagrammet har en inddeling på 50. Hvis `thresholdValue` vælges til 150, vil græsset ikke blive inkluderet i det binære billede, mens stregerne vil. Dog vil der blive inkluderet mere af den tydelige streg end af den utydelige streg, men dette vil altid være tilfældet.

Hvis `thresholdValue` sættes til 150, vil det binære billede for stregerne blive;



Figur 40: Binært billede for den tydelige streg



Figur 41: Binært billede for den utydelige streg

Mens der forekommer støj på billedet for den tydelige streg, er der ingen støj på billedet for den utydelige streg. Denne mængde af støj, kan dog håndteres af billedbehandling, og regressionslinjerne for billederne stemmer overens med stregens retning og placering.

Det kan derfor konkluderes, at en tærskelværdi på minimum 150 for `thresholdValue` vil give brugbare resultater. Dog vil en højere tærskelværdi give et mindre støjfyldt billede for tydelige streger; det anbefales derfor, at `thresholdValue` ligger i intervallet [150;200] for utydelige til tydelige streger.

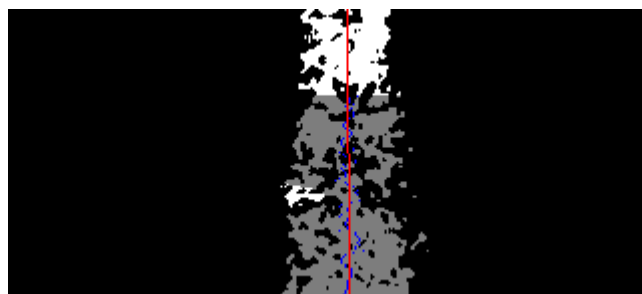
Appendiks E: Fastlæggelse af rlimit

Konstanten r_{limit} bruges i billedbehandlingen beskriver tærskelværdien for den kvadrede korrelationskoefficienten r^2 , som et mål for, om regressionslinjen stemmer passende overens med målepunkterne. Konstanten indgår i en if-sætning, der undersøger, om linjens kvadrerede korrelationskoefficient, r^2 , er for lille til at blive accepteret. En lille r^2 betyder, at regressionslinjen er et dårligt estimat af målepunkternes tendens.

Der forekommer dog et problem, idet nogle regressionslinjer der stemmer godt overens med målepunkterne, har en meget lav r^2 . Eksempelvis har følgende billede en passende regressionslinje, men dens r^2 -værdi er meget lav.

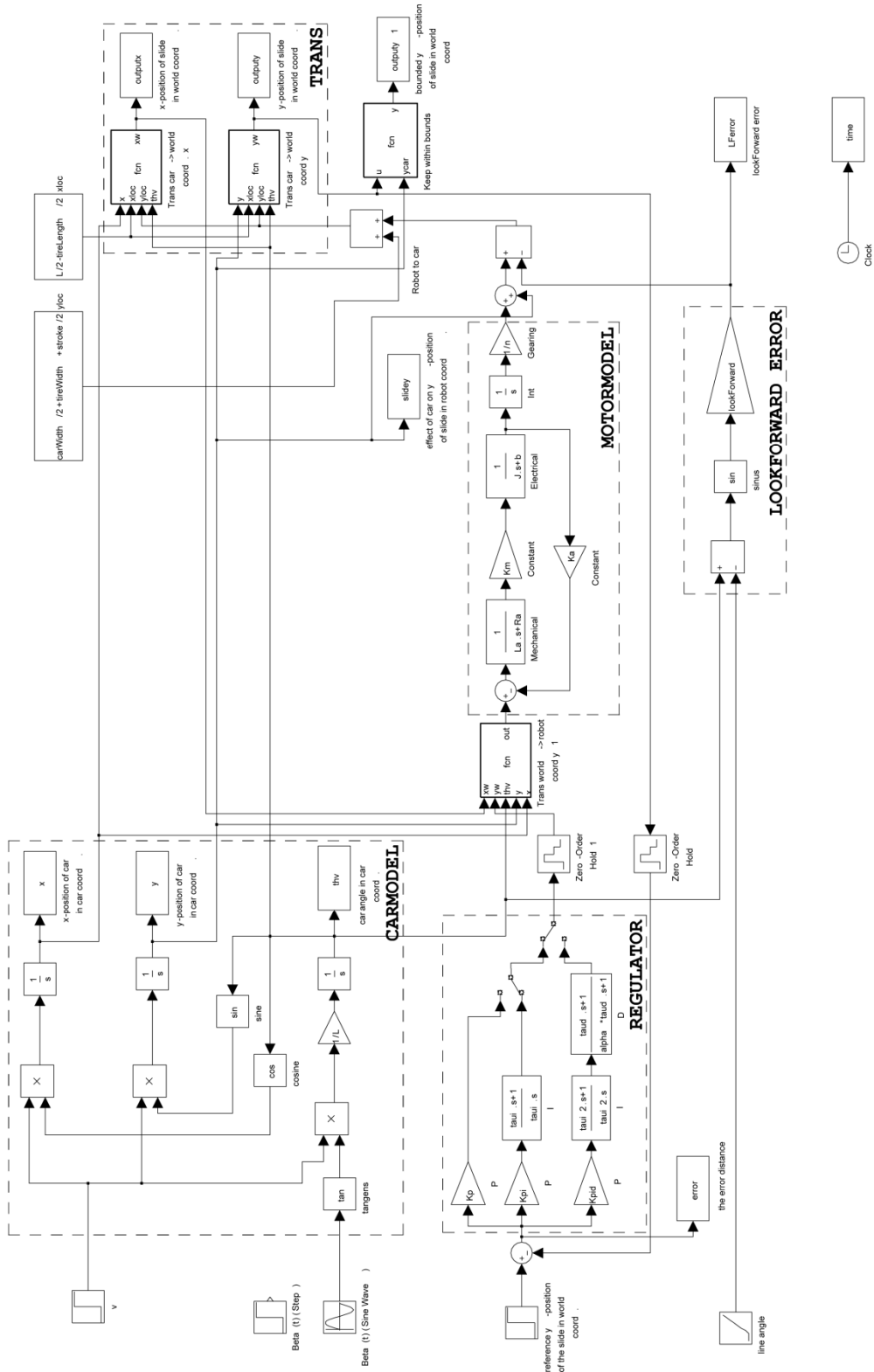


$$r^2 = 0.00139$$



Denne regressionslinje anses for at stemme overens med målepunkterne. Det er muligt, at der er en fejl i udregningen af korrelationskoefficienten. Konstanten r_{limit} er i de udførte tests sat så lav, så den godtager alle regressionslinjer.

Appendiks F: Den samlede model



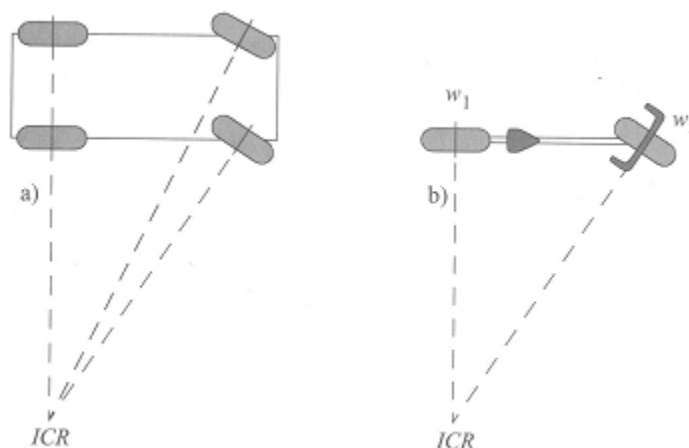


Appendiks G: Model af bil

I det følgende vil der blive opstillet en model af en Ackerman-styret bil. Simuleringen af bilen vil afspejle kørsel ved lave hastigheder (5-7 km/t), hvorfor det antages, at bilen kan simuleres udelukkende ved hjælp af de kinematiske ligninger. Det antages herved, at de dynamiske egenskaber ikke er af en størrelsesorden, der påvirker simuleringen. Denne antagelse bygger på, at bilen for eksempel ikke vil hælde sideværts ved sving ved lave hastigheder.

De kinematiske ligninger for et hjul beskriver dets bevægelser ud fra to ligninger kaldet rolling constraint og en sliding constraint, der beskriver, hvilke retninger hjulet henholdsvis kan glide i. Det antages, at hjulets kontaktpunkt med underlaget er punktformigt.

En firehjulet Ackerman styring, hvor de to bagerste hjul er fikserede, og de to forreste kan drejes, kan simplificeres til en tohjulet cykel, med et fikseret baghjul og et styrende forhjul, se Figur 42.



Figur 42: (a) Ackerman styring og (b) cykel, afbilledet med deres ICR. (Nourbakhsh og Siegwart, 2004, side 68)

Af billedet fremgår det, at begge køretøjer har samme ICR (Instantaneous Center of Rotation), der beskriver omdrejningspunktet for køretøjet ved sving. I det følgende vil de kinematiske ligninger for cyklen blive udledt og benyttet til simuleringen af bilen.

Referencepunktet P fastlægges i centeret for det bagerste hjul. Samtlige afstande og vinkler regnes ud fra P. De kinematiske ligninger opstilles for hver hjul på cyklen, hvor hjulets afstand (l) og vinkel til P (α), samt hjulets interne orientering (β) skal bestemmes. Se (Nourbakhsh og Siegwart, 2004, side 54 og 56) for figurerne for et fikseret standardhjul og et styret standardhjul samt deres parametre.

For et fikseret standardhjul og et styret standardhjul er de kinematiske ligninger, rolling (G.1) og sliding (G.2), givet som henholdsvis;

$$\begin{bmatrix} \sin(\alpha + \beta) & -\cos(\alpha + \beta) & (-l)\cos(\beta) \end{bmatrix} R(\theta) \dot{\zeta}_T - r\dot{\phi} = 0 \quad (\text{G.1})$$

$$\begin{bmatrix} \cos(\alpha + \beta) & \sin(\alpha + \beta) & l\cos(\beta) \end{bmatrix} R(\theta) \dot{\zeta}_T = 0 \quad (\text{G.2})$$

Hvor $R(\theta)$ er en 3x3 matrice, der transformerer koordinaterne fra bilens koordinatsystemet $\{X_B, Y_B\}$ til det globale koordinatsystem, $\{X_I, Y_I\}$. $\dot{\zeta}_I$ er en søjle vektor med tre elementer, der beskriver hastigheden i retningerne x , y og θ . $R(\theta)$ og $\dot{\zeta}_I$ er givet som;

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{og} \quad \dot{\zeta}_I = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}$$

hvor θ er vinkel, der er påkrævet for at dreje bilkoordinatsystemet over i det globale koordinatsystem.

Hjul 1

Dette hjul er et fikseret standardhjul med parametrene; $l=0$, $\alpha=0$ og $\beta = \frac{\pi}{2}$. Indsættes dette i formlerne (G.1) og (G.2), fås

Rolling;

$$\begin{bmatrix} \sin\left(0 + \frac{\pi}{2}\right) & -\cos\left(0 + \frac{\pi}{2}\right) & (0)\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} R(\theta) \dot{\zeta}_I - r\dot{\phi} = 0$$

Sliding;

$$\begin{bmatrix} \cos\left(0 + \frac{\pi}{2}\right) & \sin\left(0 + \frac{\pi}{2}\right) & 0\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} R(\theta) \dot{\zeta}_I = 0$$

Ud fra hjulets rolling constraint kan ses det, at hjulet kan rulle i x -retningen (fremad), såfremt der en påvirkning i denne retning, mens hjulets bevægelse begrænses af sliding constraint'en, der beskriver, hvilke retning hjulet ikke kan glide i, i dette tilfælde y -retningen.

Hjul 2

Dette hjul er et styret standardhjul med parametrene; $l=L$, $\alpha=0$ og $\beta = \frac{\pi}{2} - \beta(t)$, hvor L er afstanden mellem hjulene. Indsættes dette i formlerne (G.1) og (G.2), fås

Rolling;

$$\begin{bmatrix} \sin\left(0 + \frac{\pi}{2} - \beta(t)\right) & -\cos\left(0 + \frac{\pi}{2} - \beta(t)\right) & (-L)\cos\left(\frac{\pi}{2} - \beta(t)\right) \\ \cos(\beta(t)) & -\sin(\beta(t)) & -L\sin(\beta(t)) \end{bmatrix} R(\theta) \dot{\zeta}_I - r\dot{\phi} = 0$$

Sliding;

$$\begin{bmatrix} \cos\left(0 + \frac{\pi}{2}\right) & \sin\left(0 + \frac{\pi}{2}\right) & 0\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} R(\theta) \dot{\zeta}_I = 0$$

Da cyklen er baghjulstrukket, er der ikke nogen rolling constraint på forhjulet.

De tre tilbageværende constraints samles i en matrice, M ;

$$M = \begin{bmatrix} J_{1f} \\ C_{1f} \\ C_{1s}(\beta_s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\beta(t)) & -\cos(\beta(t)) & -L \cos(\beta(t)) \end{bmatrix}$$

hvor de to øverste er henholdsvis rolling og sliding constraint for hjul 1, og den nederste er sliding constraint for hjul 2.

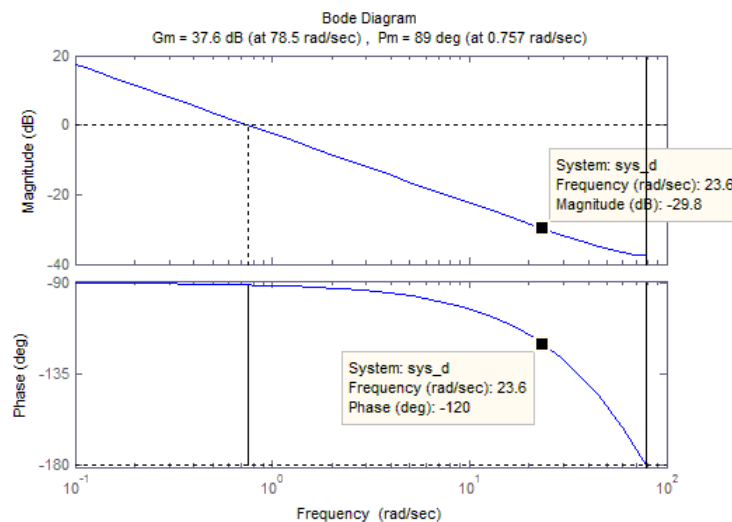
Det er nu muligt at bestemme $\dot{\zeta}_I$ ved at isolere denne i constraint-formlerne;

$$\begin{bmatrix} J_{1f} \\ C_{1f} \\ C_{1s}(\beta_s) \end{bmatrix} R(\theta) \dot{\zeta}_I = \begin{bmatrix} v \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \dot{\zeta}_I = R(\theta)^{-1} \begin{bmatrix} J_{1f} \\ C_{1f} \\ C_{1s}(\beta_s) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \cos(\theta) \\ v \sin(\theta) \\ \frac{v}{L} \tan(\beta(t)) \end{bmatrix}$$

Bilens bevægelser kan simuleres med ovenstående ligninger, hvor hastigheden i x-retningen er givet ved $v \cos(\theta)$, hastigheden i y-retningen er givet ved $v \sin(\theta)$, mens vinkelhastigheden er givet ved $\frac{v}{L} \tan(\beta(t))$, hvor $\beta(t)$ er styrervinklen af bilen.

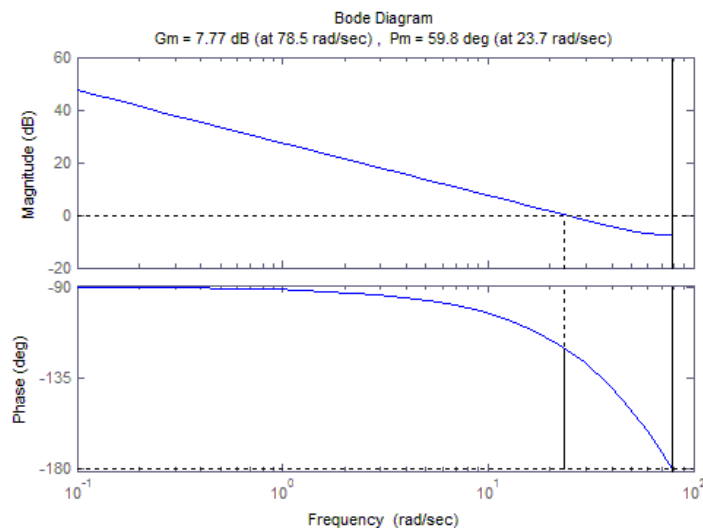
Appendiks H: P-regulator bodeplots

På plottet for fasedrejningen aflæses frekvensen ved -120 (der ønskes en fasemargin på 60 grader), ved samme frekvens aflæses amplituden, i amplitudekarakteristikken.



Figur 43: Bodeplot for system uden regulator

Kp dimensioneres ud fra denne amplitude. Når P-regulatoren indsættes i systemet, opnås følgende bodeplot;



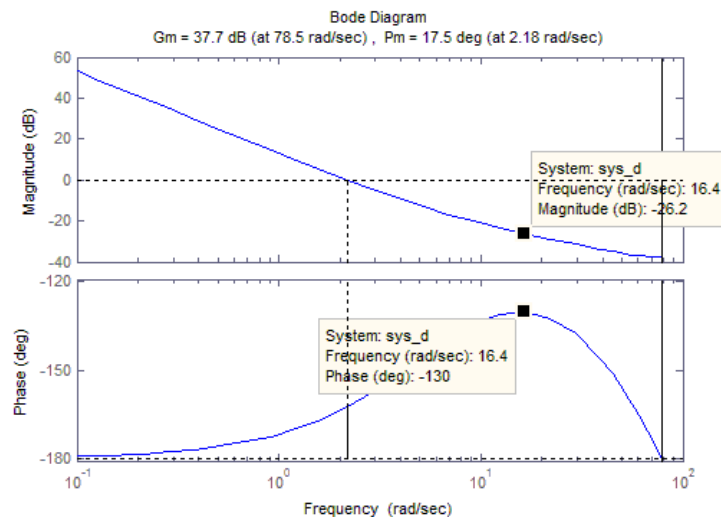
Figur 44: Bodeplot for systemet med P-regulator

Det bemærkes, at fasemarginen er på 60 grader som ønsket.

Appendiks I: PI-regulator bodeplots

For at bestemme tidskonstanten τ_i benyttes krydsfrekvensen i bodeplottet i Figur 43.

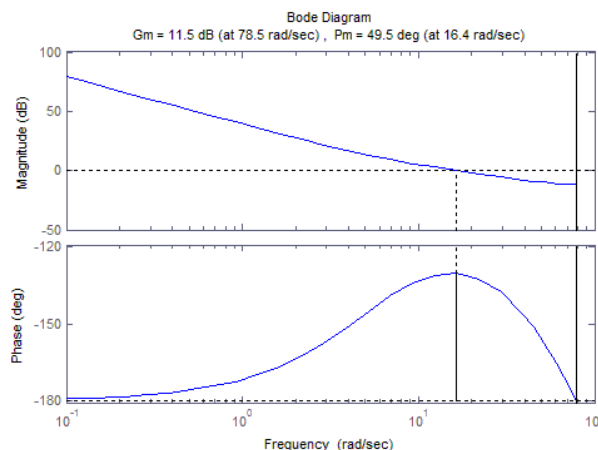
Integratorleddet indsættes, og der tegnes et nyt bodeplot;



Det bemærkes, at der ikke kan opnås en fasedrejning på -120 grader, hvorfor der vælges -130 grader, der er den fasedrejning, der kommer tættest på. Proportionalforstærkningen i PI-regulatoren bliver derfor;

$$K_p = -26.2 \text{ dB} = 10^{26.2/20} = 20.42$$

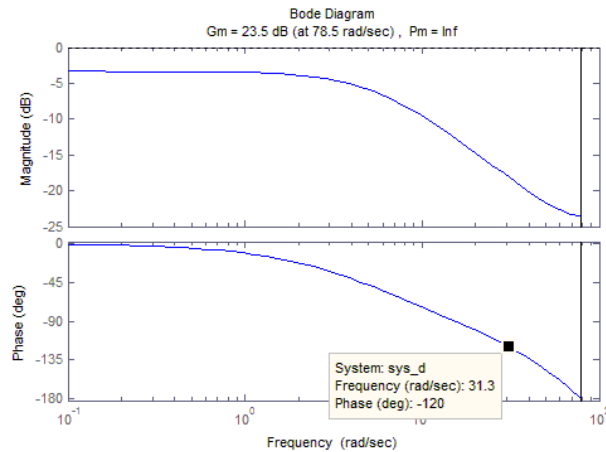
Indsættes denne forstærkning, opnås et bodeplot som vist nedenfor:



Det ses, at den opnåede fasemarginen kun er 50 grader.

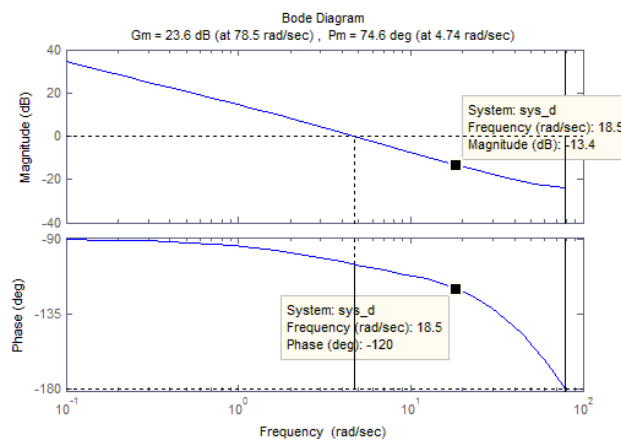
Appendiks J: PID-regulator bodeplots

Efter indsættelsen af differentiator-delen bliver bodeplottet;



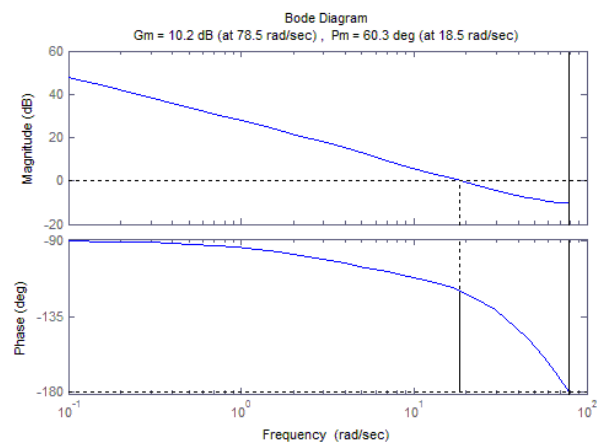
Figur 45: Bodeplot for system og differentiator-delen

Herved bliver tidskonstanten i integrator-delen; $\tau_i = 4/(31.3 \text{ rad/sek}) = 0.13 \text{ sek}$. Når integrator-delen indsættes sammen med differentiator-leddet, bliver bodeplottet;



Figur 46: Bodeplot for systemet med differentiator- og integrato-leddene

Proportionalforstærkingen bliver derfor $K_p = -13.4 \text{ dB} = 10^{13.4/20} = 4.68$. Med denne K_p bliver bodeplottet for systemet med den samlede regulator;

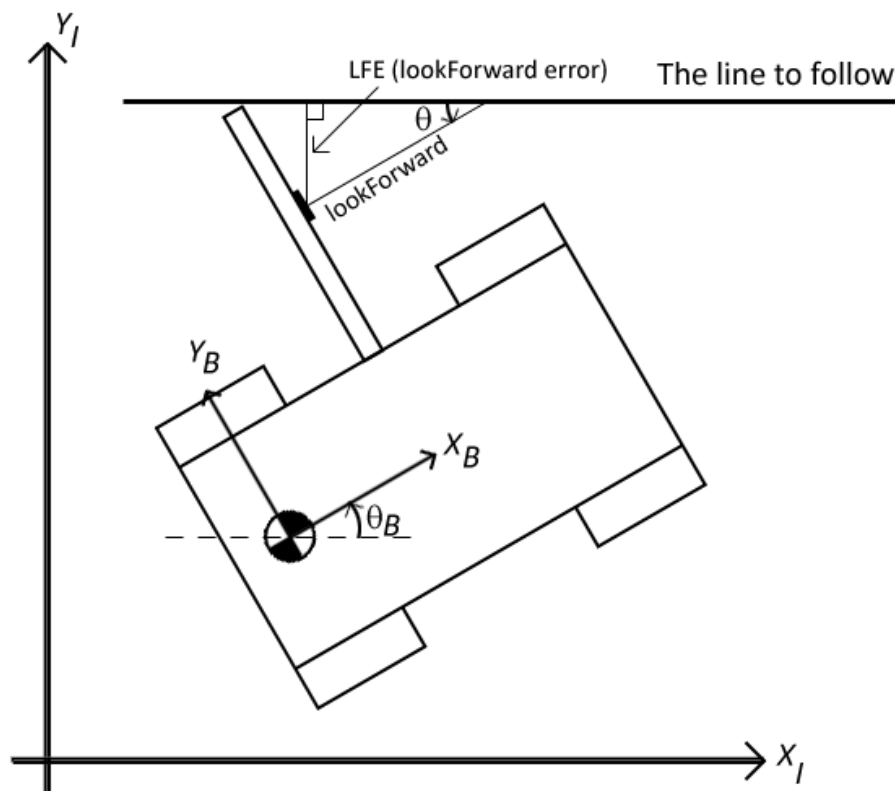


Figur 47: Bodeplottet for det samlede system med PID-regulatoren

Det bemærkes, at fasemarginen igen er 60 grader.

Appendiks K: lookForward fejlen

Hvis kameraet ser for langt frem, vil der være en fejlafstand mellem slædens position og strengen. Dette er illustreret i nedenstående figur.



Figur 48: Fejlafstanden grundet lookForward

Længden LFE der er afstanden mellem slæden og linjen, hvor denne afstand er vinkelret på linjen. De kendte faktorer er vinklen θ og længden lookForward. Fejlafstanden bestemmes ud fra geometriske overvejelser som;

$$LFE = lookForward \cdot \sin(\theta)$$

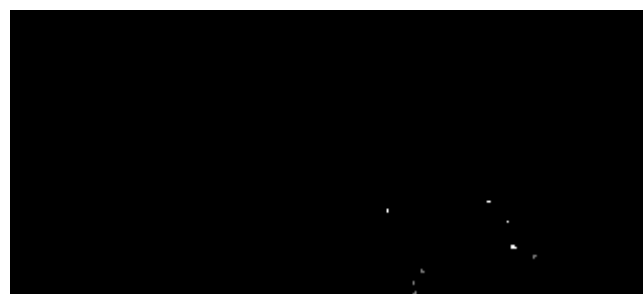
Den vinkel der bruges som argument for sinus-funktionen er differensen mellem bilens vinkel, θ_B , og linjens vinkel, θ_v : $\theta = \theta_B - \theta_v$. På Figur 48 er linjens vinkel 0 grader.

Appendiks L: Test af billedbehandling

For hvert billede vil regressionslinjens parametre blive givet samt debug-billedet *Measured points and regression line* til visuel sammenligning. På vedlagte CD ligger samtlige billeder og en liste over dem, der er brugt i rapporten.

L.1 Test uden linje

Hvis ikke der er en linje, skal billedbehandling returnere et flag og ikke give en regressionslinje.



$a = 0.00$

$b = 0.00$

Da billedbehandling ikke finder nogen streg eller snor i billedet, returnerer den default-værdierne for regressionslinjens hældning og skæring med y-aksen.

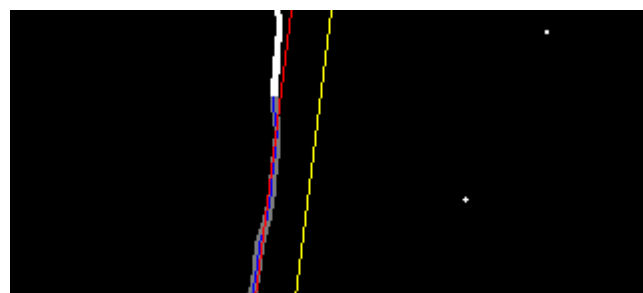
Det er hermed vist, at hvis der ikke er nogen linje i billedet, opfører billedbehandling sig korrekt.

L.2 Test på snor

For at lokalisere snoren sættes `mode` til 2, hvorved regressionslinjen forskydes til højre for at sikre, at der ikke tegnes oven på snoren. Den forskudte regressionslinje er her tegnet med gult. Konstanten `thresholdValue` er sat til 200.



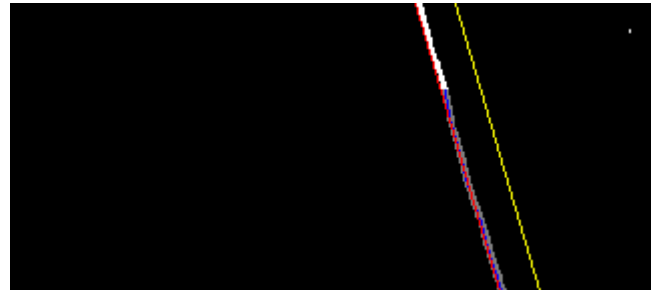
$a = 7.73$
 $b = -1094.77$





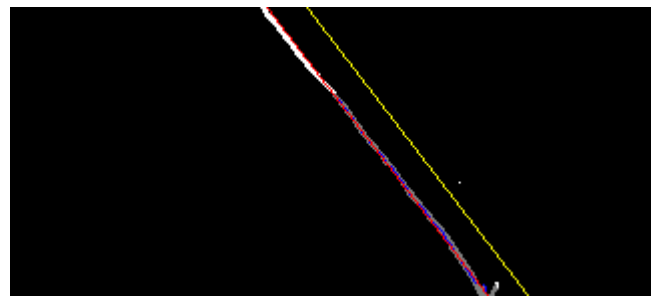
$$a = -3.44$$

$$b = 907.05$$



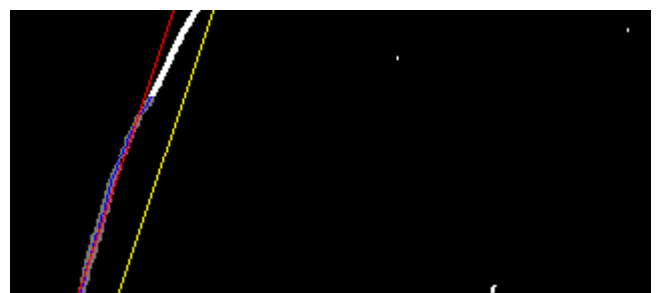
$$a = -1.30$$

$$b = 335.27$$



$$a = 2.95$$

$$b = -155.04$$



Det ses, at snoren bliver fundet, og at regressionslinjen stemmer overens med snoren. Det bemærkes, at den gule og røde regressionslinje er parallelle.

L.3 Test på utydelige streger

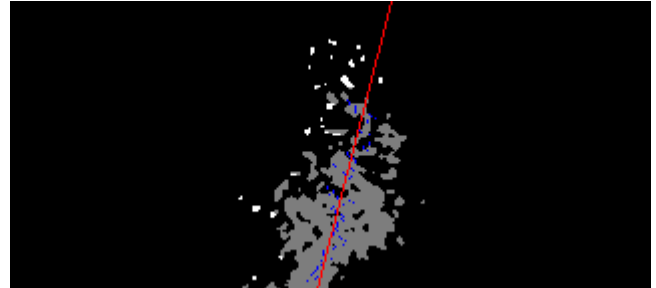
De følgende billeder viser worst-case-senario-stregerne. Disse er meget udviskede og svære at se. Konstanten thresholdValue er sat til 150 for de følgende tests.



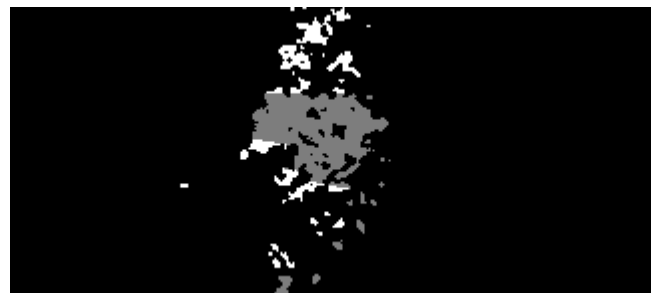
$$a = 3.89$$

$$b = -596.24$$

Linjen bliver fundet, og den anses for at være god nok til at følge.



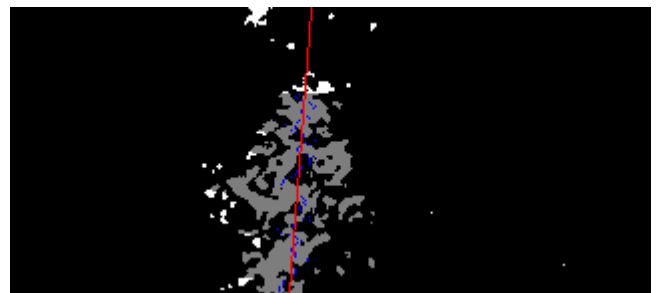
Regressionslinjen passede for dårligt til målepunkterne, så regressionslinjen blev forkastet.



$$a = 12.71$$

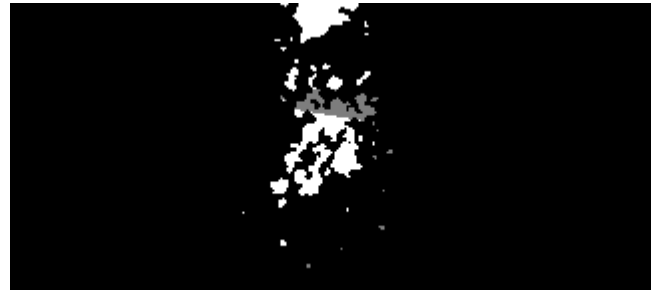
$$b = -1768.98$$

Regressionslinjen stemmer godt overens med den aktuelle linje.





Billedbehandlingen finder ikke en brugbar regressionslinje.



Det er ikke muligt at følge alle WCS-billederne, men det er muligt at opnå passende regressionslinjer for nogle af billederne.

L.4 Test på tydelige streger

De følgende billeder har en tydeligere streg og er derfor lettere for billedbehandlingen at håndtere. Konstanten thresholdValue er sat til 200 for de følgende tests.

L.4.1 Lige ud

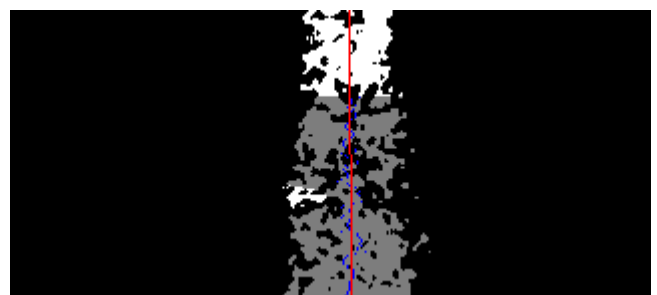
Det meste af en fodboldbane er rette linjer, og det er derfor vigtigt, at billedbehandlingen kan håndtere disse uden problemer.

Lige foran



$a = -276.59$
 $b = 46937.66$

Godt fit!

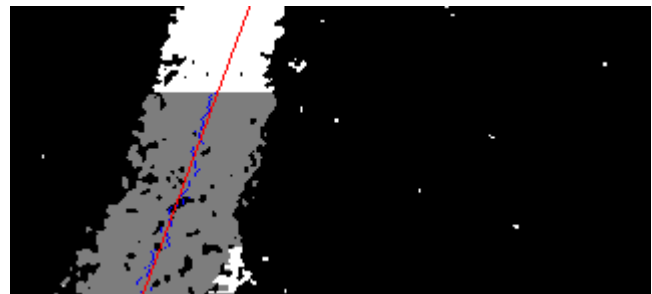


Venstre side



$$a = 2.72$$
$$b = -180.32$$

Godt fit!

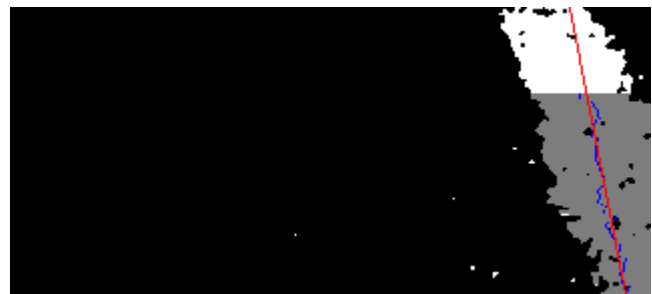


Højre side



$$a = -5.12$$
$$b = 1569.11$$

Acceptabel estimering.



Regressionslinjerne for de tydelige streger stemmer overens med de aktuelle linjer. Forskellen mellem den aktuelle hældning og regressionslinjens hældning er væsentligt mindre end for de utydelige streger.

L.4.2 Sving

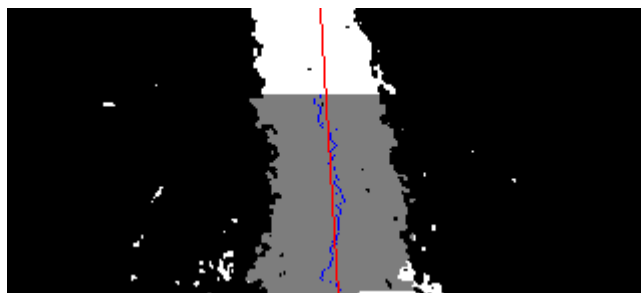
Eftersom billedbehandlingen tilnærmer linjerne til førsteordens polynomier, er buestykkerne på banerne interessante at teste for at afgøre, om denne antagelse er tilladelig.

Lige foran



$$\begin{aligned}a &= -17.17 \\b &= 2825.13\end{aligned}$$

Det ses, at det buede stykke på det korte udvalgte stykke med god tilnærmelse kan ses som lige.

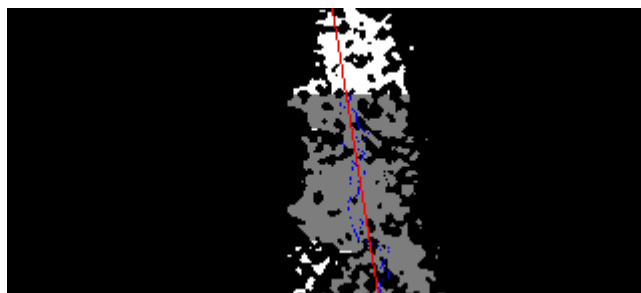


Venstre



$$\begin{aligned}a &= -6.09 \\b &= 1128.51\end{aligned}$$

Regressionslinjen for den mere ujævne linje stemmer overens med den aktuelle.



Højre side



$$a = -3.24$$
$$b = 943.46$$

God overensstemmelse.



Billederne viser en klar tendens mellem de aktuelle linjer og regressionslinjerne, der retfærdiggør approksimationen fra buestykke til første ordens polynomium.

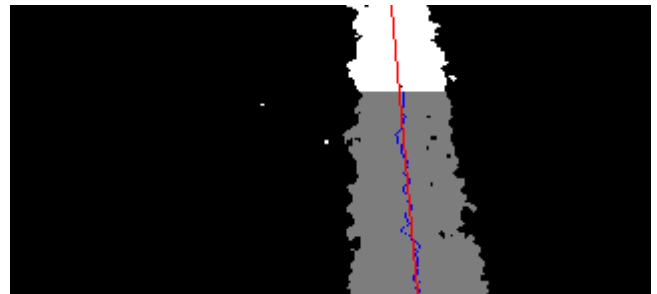
L.4.3 Hjørne

Hjørnerne på banen kan give vanskeligheder for billedbehandlingen. De følgende billeder viser kørsel hen mod et hjørne.



$$a = -10.83$$
$$b = 2195.73$$

Der er ingen problemer med at finde en passende regressionslinje.

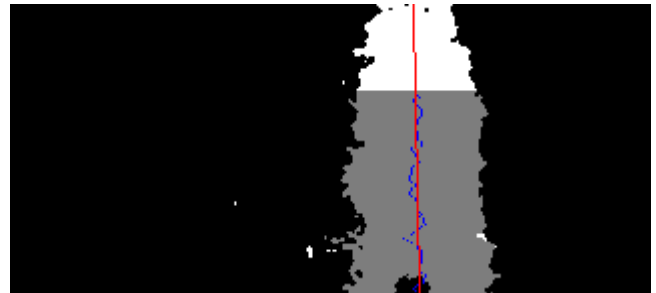




$a = -63.55$

$b = 12937.63$

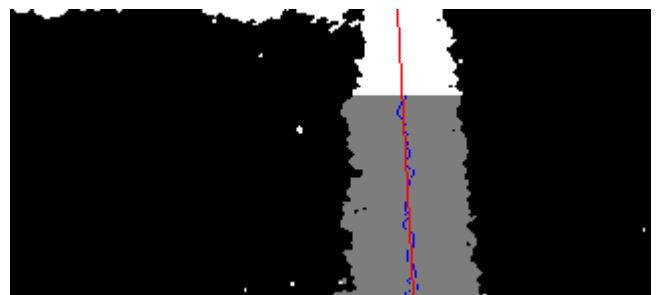
Skyggen nederst i billedet skyldes kameraet.



$a = -19.75$

$b = 3964.08$

Den tværgående streg kan nu skimtes i ROI.



$a = 0.00$

$b = 0.00$

Billedbehandlingen fejler på hjørnet.



Det er tydeligt at se, at billedbehandlingen finder linjen med et godt fit, indtil den når selve hjørnet. I hjørnet bliver bestemmelsen af regressionslinjen forstyrret af den tværgående linje.

L.4.4 Forgrening

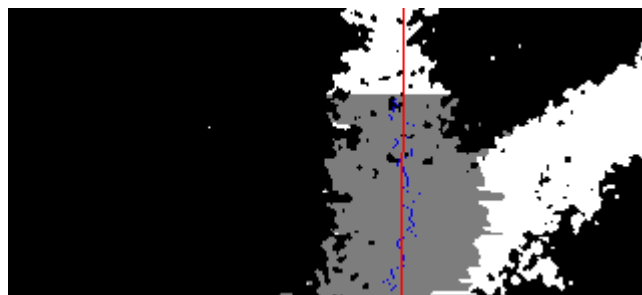
Ved målfeltet er der en forgrening mellem en ret linje og et buestykke.



$$a = 111.55$$

$$b = -21843.99$$

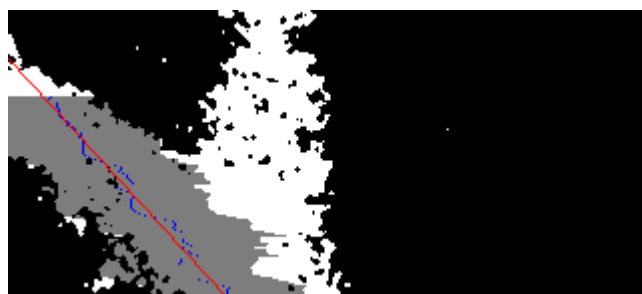
Den fremadrettede forgrening vælges.



$$a = -1.08$$

$$b = 118.02$$

Den venstre forgrening vælges.



I forgreninger vil billedbehandlingen give en regressionslinje, der følger den venstre forgrening.

L.4.5 Kryds

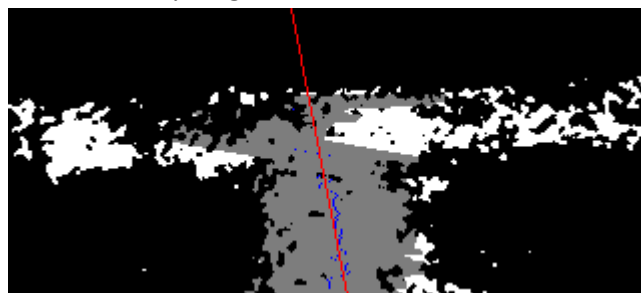
I skæringen mellem midterlinjen og langsiden er der T-kryds, mens der mellem midtercirklen og midterlinjen er fire-armet kryds.

T-kryds



$$a = -5.29$$
$$b = 890.82$$

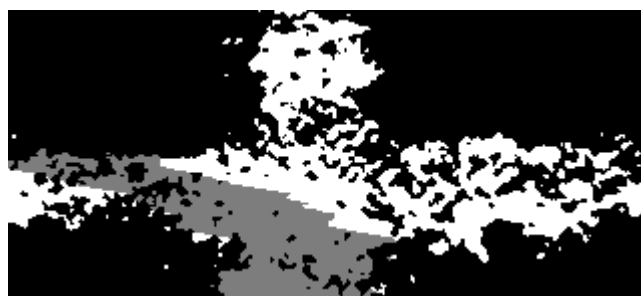
Den ville have fejlet, hvis den tværgående streg havde været tydeligere.



Firearmet-kryds



Regressionslinjen bliver frasorteret, da den passer dårligt til målepunkterne.



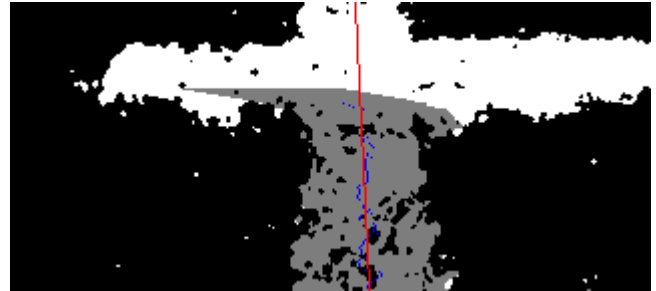
Midterplet



$a = -20.70$

$b = 3705.50$

Den estimerede linje stemmer godt overens med den ønskede køreretning.



Det bemærkes, at der kan opstå problemer for billedbehandlingen ved skæringer mellem linjer.

L.4.6 Eksterne påvirkninger

Eksterne påvirkninger som: skygger, kraftig belysning og manglende græs kan have indvirkning på billedbehandlingen. Dette vil nu blive undersøgt med nogle eksempler.

Skygger 1



For thresholdValue = 200

$a = -10.81$

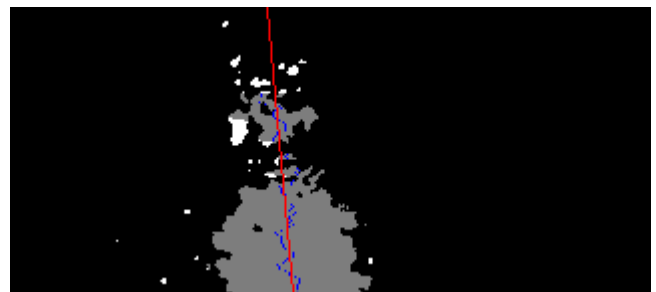
$b = 1520.68$



For thresholdValue = 150

$a = -11.01$

$b = 1553.20$



Ændringen i regressionslinjens parametre er minimal.

Skygger 2



For thresholdValue = 200

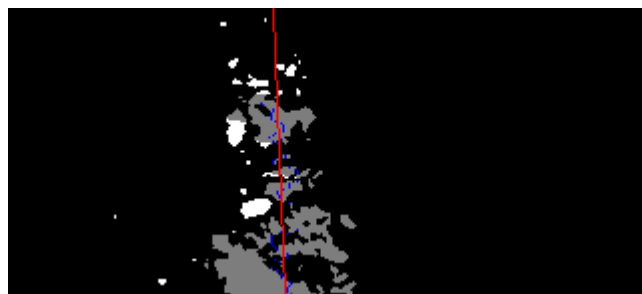
Ingen regressionslinje



For thresholdValue = 150

$a = -22.99$

$b = 3166.77$



Ved at ændre værdien for thresholdValue fra 200 (tydelige streg) til 150 (utydelige streg) opnås der brugbare resultater. Regressionslinjerne for thresholdValue = 150 passer godt til den aktuelle linje.

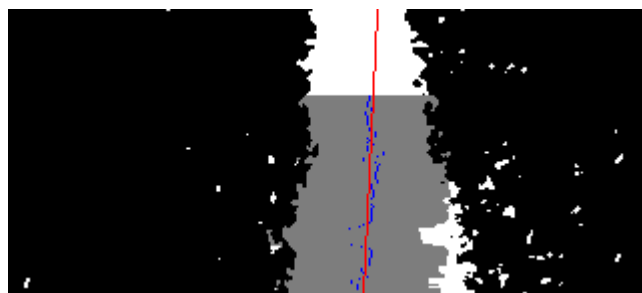
Kraftigt belysning 1



$a = 20.96$

$b = -3716.76$

Godt fit.

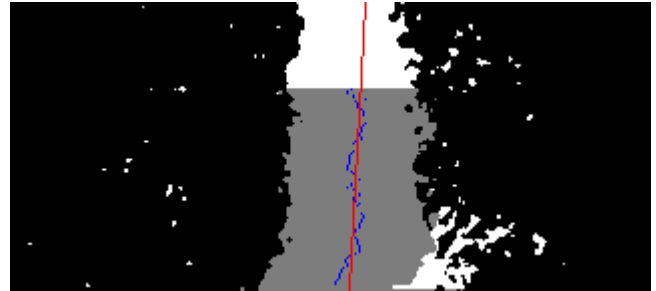


Kraftigt belysning 2



$a = 17.36$
 $b = -2926.01$

Godt fit.



Ved kraftig belysning vil pixelværdierne stige. Flere af stregens pixelværdier vil ligge på 255, samtidig med at græsområdets pixelværdier vil komme tættere på tærskelværdien. Så længe græssets pixelværdier ikke stiger til over tærskelværdien, vil der ikke være nogen problemer med at finde stregen. Skulle problemet opstå, kan det løses ved at skrue op for thresholdValue-konstanten.

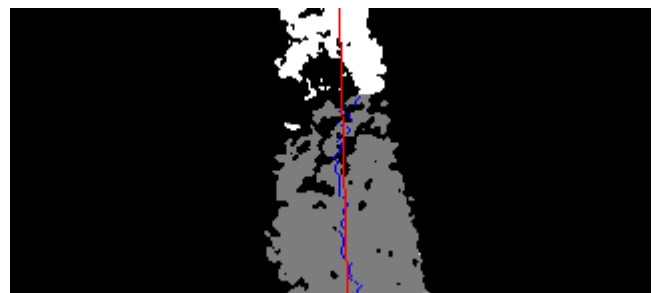
Manglende græs

Der kan forekomme stor slitage på græsset, hvilket kan medføre pletvise områder uden græs. Dette er især tilfældet omkring målfeltet og straffesparksfeltet. Billedbehandlingen skal være upåvirkelig af det manglende græs.



$a = -36.67$
 $b = 6156.78$

God regressionslinje.





a = -249.82
b = 42959.72

Godt fit.



De manglende græsområder lader ikke til at påvirke linjefindingen.

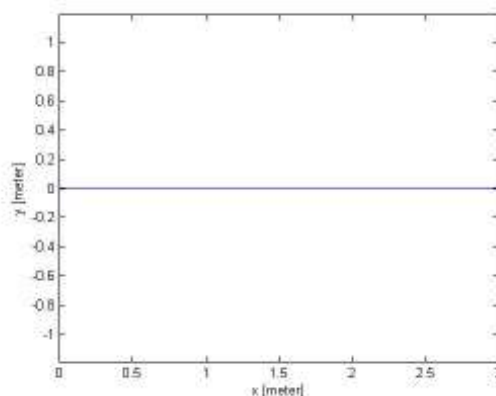
Appendiks M: Test af bil model

I det følgende vil Simulink modellen af bilen blive testet. Disse tests vil blive udført på systemet afbildet i Figur 13, hvor der er mulighed for input på "v" og "beta(t)". Graferne i dette afsnit viser referencepunktet P's placering i det globale koordinatsystem.

M.1 Lige linje

Hvis der sættes et step på "v" men ikke på "beta(t)", skal der fremkomme en lige linje, hvilket repræsenterer en fremadrettet bevægelse af bilen.

Med et step på "v" på 1, svarende til en hastighed på 1 m/s og en tidshorisont på 3 sek opnås følgende figur;



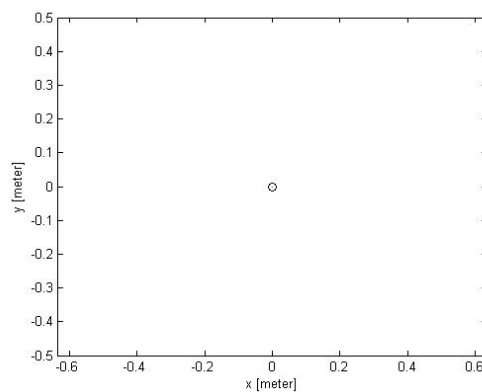
Figur 49: Respons på "v" step

Det bemærkes, at bilen bevæger sig 3 meter fremad i x-retningen uden nogen bevægelse i y-retningen som ønsket.

M.2 Rotation

Hvis der sættes et step på "beta(t)" men ikke på "v", skal bilen ikke bevæge sig i hverken x- eller y-retningen men derimod blive stående i samme punkt, hvor den vil rotere.

Med et step på "beta(t)" på 1 svarende til en vinkelhastighed på 1 rad/s og en tidshorisont på 3 sek opnås følgende figur;



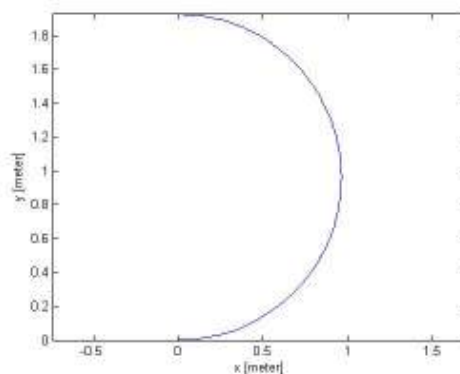
Figur 50: Respons på "beta(t)" step

Det bemærkes, at bilen ikke bevæger sig fra Origo. Det er dog umuligt ud fra figuren at afgøre, om den roterer, hvorfor dette afprøves i næste test.

M.3 Cirkel

Hvis der sættes et step på både vinklen og hastigheden, skal der opnås et cirkelbevægelse. Den forrige test er et specialtilfælde af dette, hvor rotationen foregår i samme punkt med radius $r=0$ i cirkelbevægelsen.

Der sættes step på 1 på både "beta(t)" og "v", hvor simuleringstiden stadig er 3 sek.



Figur 51: Cirkel-kørsel

Det bemærkes, at bilen beskriver en halvcirkel med radius 1 m. Figuren bekræfter, at bilen er i stand til at dreje, og at denne drejning forgår i den positive omløbsretning, når input vinkel-steppet er positivt.

M.4 Delkonklusion

Det kan konkluderes, at simuleringen gengiver bilens bevægelser, og at det er muligt at afbillede kørsel i tilfældene; lige ud, stationært sving og sving under kørsel.

Appendiks N: Test af regulatorerne

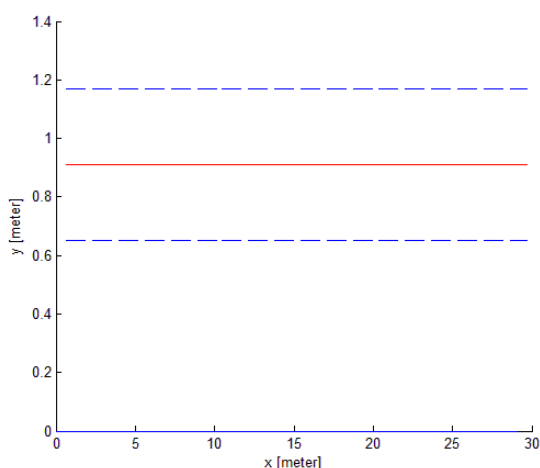
Her følger de udførte test på det samlede simuleringssystem. Der undersøges hvilken af de tre regulatorer (P, PI og PID) der er bedst egnet til at mindske påvirkningerne fra bilen.

I det følgende vil testene blive dokumenteret med to billeder. I det ene afbildes bilens position med blåt mens slædens position er markeret med rødt. Slaglængdens grænser er afbildet med stiplede blå linjer. I det andet billede vises fejlfstanden, der er afstanden mellem den ønskede værdi og slædens position. Slædens position er ikke begrænset af slaglængden i grafen for fejlfstanden, da det ønskes undersøgt hvor præcise regulatorerne er. Når slædens bevægelser begrænses af slaglængden vil fejlfstanden være større end hvis ikke den blev begrænset, men den vil også være irrelevant, da der ikke optegnes når slæden ikke er over strengen. Fejlfstandsgraferne svarer derfor til at slædens position ikke begrænses af slaglængden.

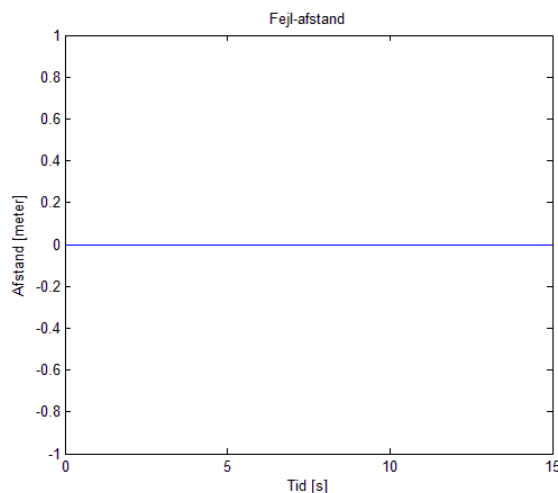
I alle testene vil bilens hastighed, v , være 1.94 m/s svarende til 7 km/t.

N.1 Lige ud

Indledningsvist testes systemet uden regulator hvor der køres lige ud. Denne test har til formål at sikre at der ikke reguleres hvis slæden er positioneret over linjen. Referencen for slæden sættes til 0.909 m.



Figur 52: Lige ud uden regulator



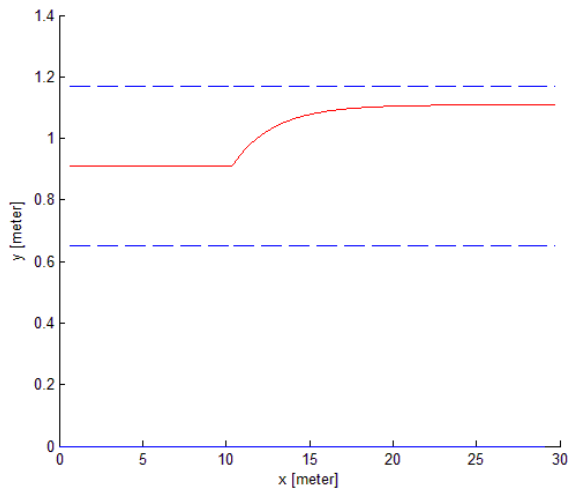
Figur 53: Fejlfastand ved kørsel uden regulator

Det kan konkluderes at slædens position forbliver direkte over den ønskede linje, selv uden at der indsættes en regulator.

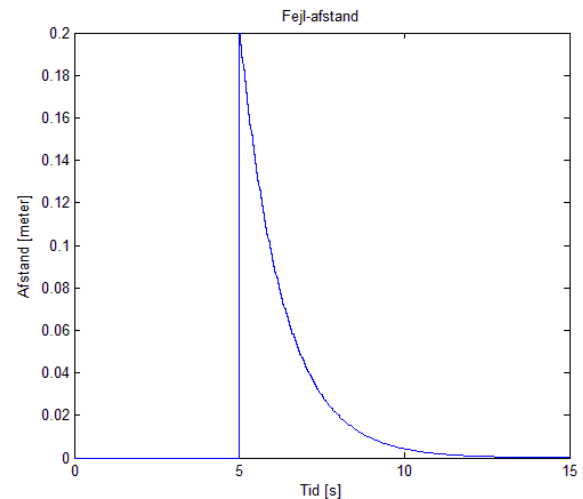
N.2 Reference trin-respons

Bilens styrvinkel sættes til nul, mens der udføres et trin på linjens reference position fra 0.909 m til 1.109 m til tiden 5 sekunder. Det svarer til at linjen instantant bevæger sig 20 cm til siden.

Uden regulator



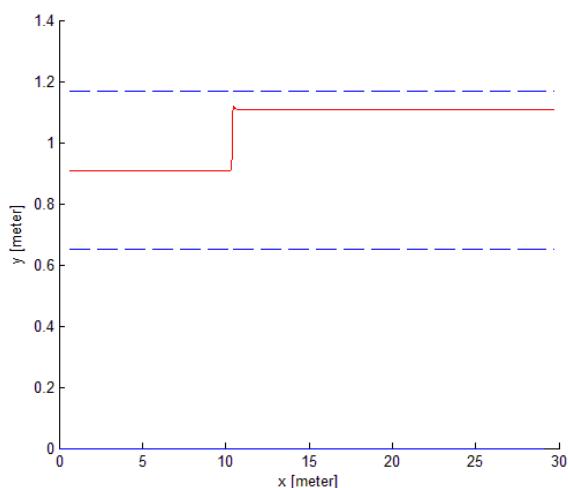
Figur 54: Kørsel uden regulator



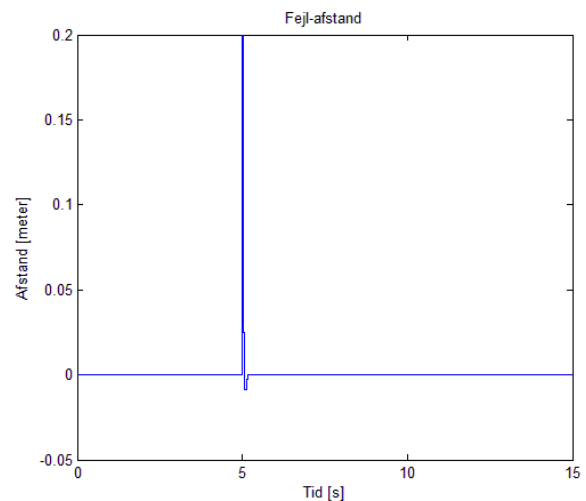
Figur 55: Fejl afstand ved kørsel uden regulator

Det ses tydeligt at der er behov for regulering af slædens position. Ved kørsel uden regulator bemærkes det at der går lang tid (2%-indsvingningstiden er ca. 10 sek) før den ønskede position opnås.

P regulator

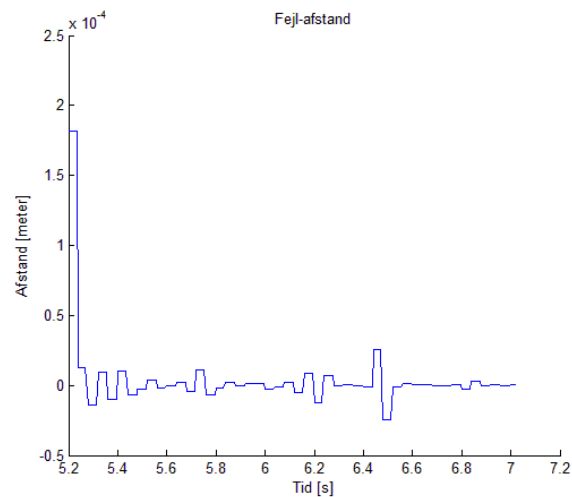


Figur 56: Kørsel med P-regulator



Figur 57: Fejlafstand ved kørsel med P-regulator

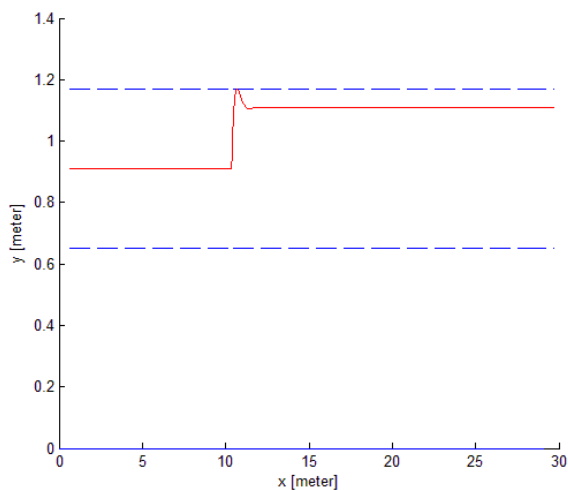
P-regulatoren er hurtig til at svinge ind og har en meget lille fejl lige efter trinpåvirkningen. Når der zoomes ind omkring trinpåvirkningen opnås grafen på Figur 58;



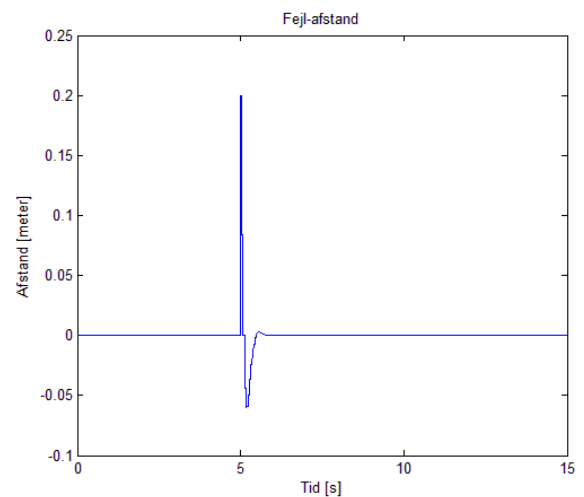
Figur 58: P-regulator efter trin påvirkning

Det bemærkes at der efter 0.2 sekunder fra påvirkningen er opnået en position svarende til det ønskede.

PI regulator

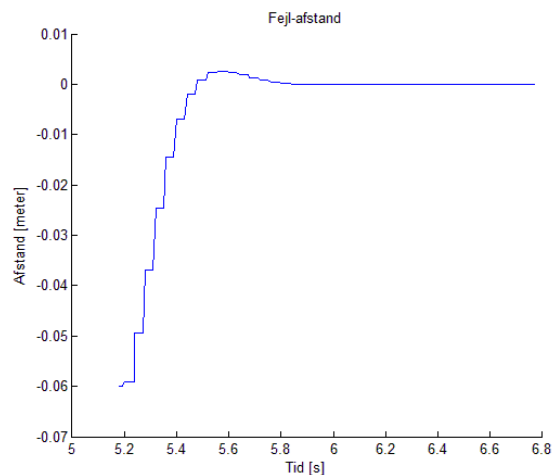


Figur 59: Kørsel med PI-regulator



Figur 60: Fejlafstand ved kørsel med PI-regulator

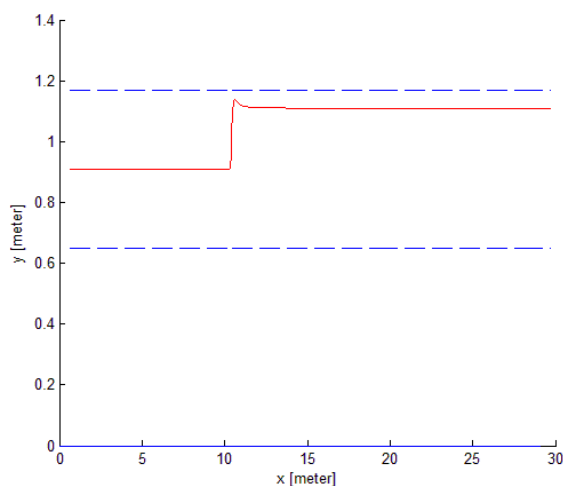
Det bemærkes at PI-regulatoren har et lille oversving, hvilket ikke er hensigtsmæssigt, det er dog ikke mere end 3 mm højt. Efter 0.8 sekunder opnår PI-regulatoren den ønskede stationære værdi.



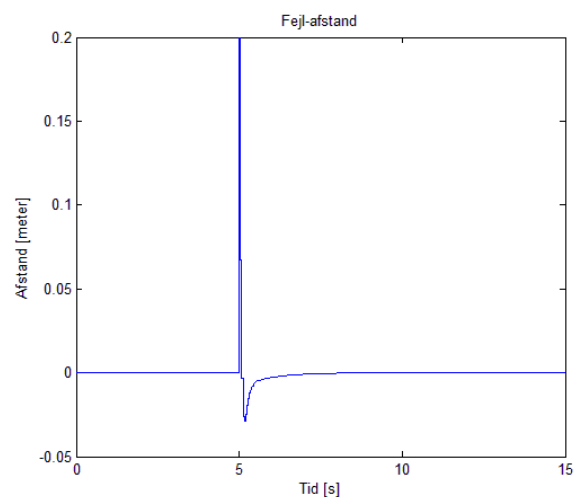
Figur 61: PI-regulator indsvingning

Ved mindre påvirkninger bliver oversvinget mindre og forskellen mellem P- og PI-regulatoren er minimal.

PID regulator



Figur 62: Kørsel med PID-regulator



Figur 63: Fejlafstand ved kørsel med PID-regulator

PID-regulatoren kan ikke leve op til de to andre regulatorer, idet dens indsvingningstid er på ca. 3 sekunder.

Indsvingningstiden for systemerne med de tre regulatorer er væsentligt kortere, end for systemet uden regulator. Kortest for P-regulatoren efterfulgt af henholdsvis PI- og PID-regulatoren. Ingen af de tre regulatorer har en stationær fejl.

Af de tre afprøvede regulatorer vurderes P-regulatoren til at være bedst egnet til trinpåvirkninger af linjen position.

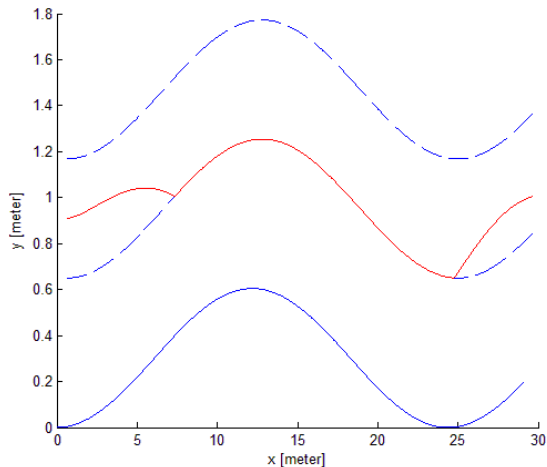
N.3 "Sinus"-kørsel

Denne test skal vise hvor meget systemet påvirkes af at bilen svinger. Linjens referencepositionen sættes til 0.909 m, svarende til midten af slaglængden. Styrevinklen sættes til en sinus-kurve af formen,

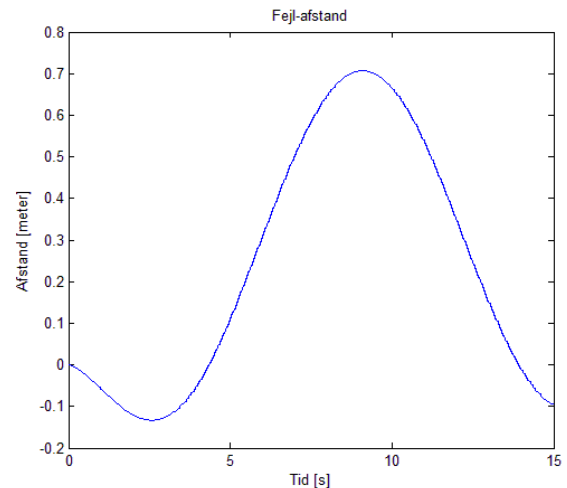
$0.03 \cdot \sin(0.5 \cdot t + \pi/2)$. Dette svarer til at føreren af bilen hele tiden svinger rattet fra side til side, med et maksimalt udsving på 1.7 grader.

Ved denne sinus-kurve vil det ikke være muligt for robotten at placere slæden over stregen hele tiden, da linjen til tider vil ligge uden for robottens slaglængde.

Uden regulator



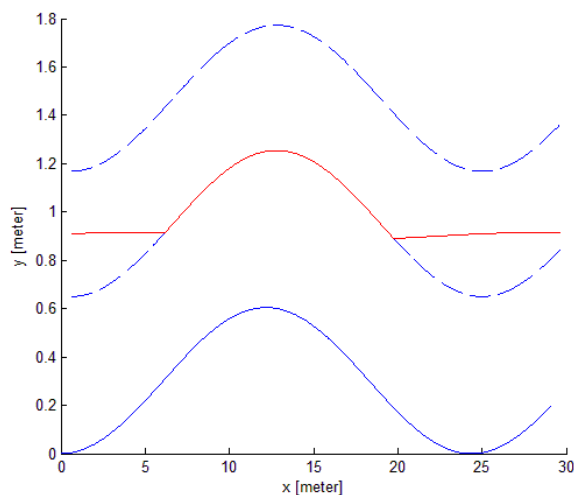
Figur 64: "Sinus"-kørsel uden regulator



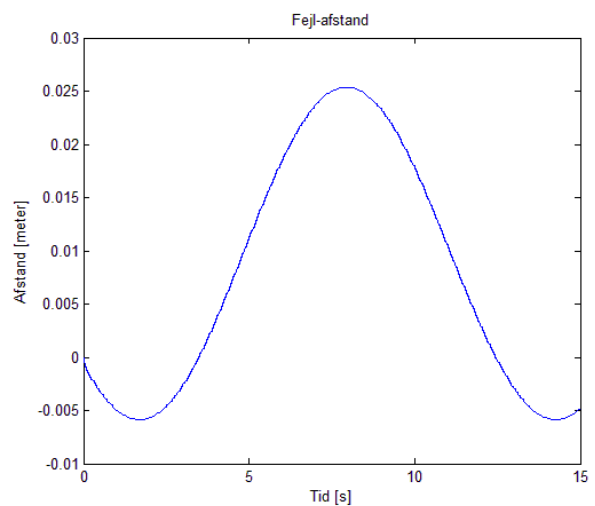
Figur 65: Fejl ved "sinus"-kørsel uden regulator

Det ses tydeligt at systemet behøver en regulator for at tegne stregen lige. Der opnås store fejlafstande i de områder hvor det er muligt at placere slæden over linjen.

P-regulator



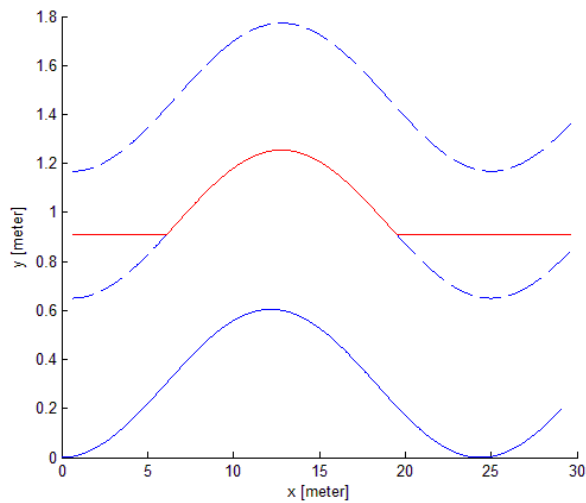
Figur 66: "Sinus"-kørsel med P-regulator



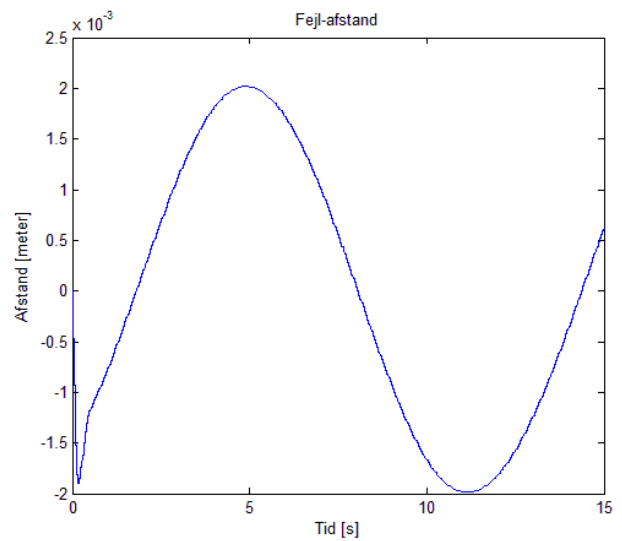
Figur 67: Fejlafstand ved "sinus"-kørsel med P-regulator

Det bemærkes at P-regulatoren følger linjen, når denne er indenfor slaglængden, dog er unøjagtigheden langt over det ønskede. Med P-regulatoren kommer fejlafstanden op på 25 mm.

PI-regulator



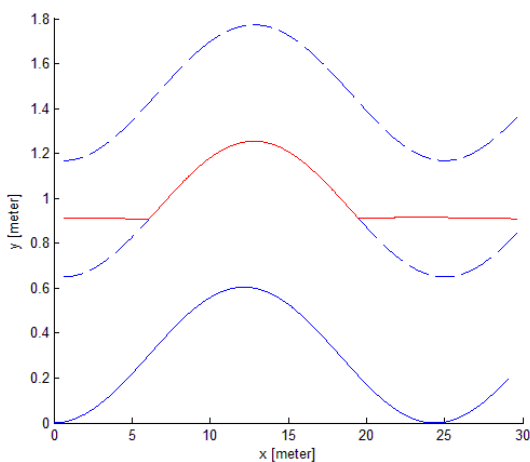
Figur 68: "Sinus"-kørsel med PI-regulator



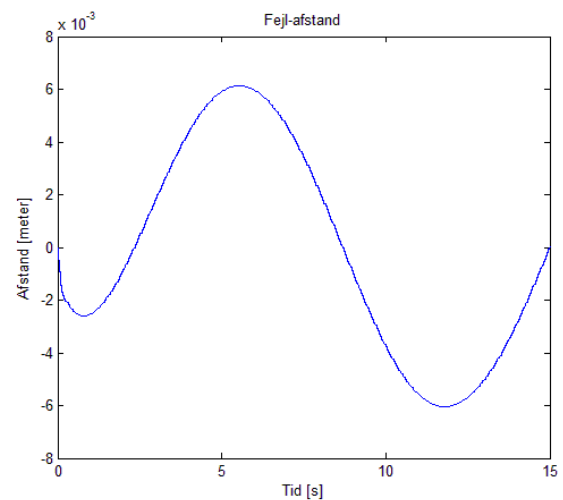
Figur 69: Fejlafstand ved "sinus"-kørsel med PI-regulator

PI-regulatoren opnår en mere præcis positionering end P-regulatoren. PI-regulatoren har en nøjagtighed på ± 2 mm. Hvilket er bedre end den fastsatte grænse på ± 3 mm.

PID-regulator



Figur 70: "Sinus"-kørsel med PID-regulator



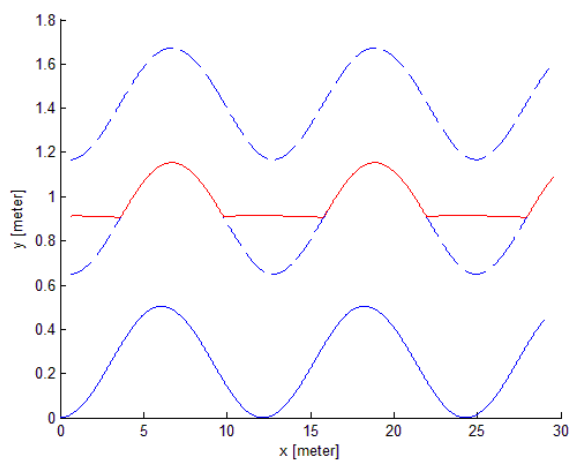
Figur 71: Fejlafstand ved "sinus"-kørsel med PID-regulator

Det bemærkes at PID-regulatoren har en fejlafstand på ± 6 mm hvilket er større end PI-regulatoren, men mindre end P-regulatoren.

Af de tre regulatorer vurderes PI-regulatoren til at være den bedst egnede til at håndtere påvirkningerne af en "sinus"-kørsel.

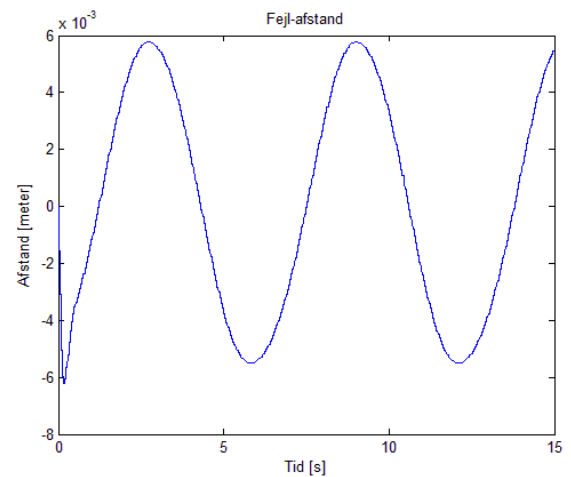
N.4 Voldsom kørsel

PI-regulatoren testes ved en voldsom kørsel, simuleret med en sinus af formen , på styrevinklen.



Figur 72: Voldsom kørsel med PI-regulator

Det bemærkes at slæden følger linjen når denne er inden for slaglængdens begrænsninger. Fejlafstanden er på ± 6 mm.



Figur 73: Fejlafstand ved voldsom kørsel med PI-regulator

Bilag 1: Tandremstype tabel

Uddrag fra (ConiTech, side 36). Følgende tabel viser den tilladte belastning af de forskellige tandremstyper. For mere information se kataloget fra ConiTech på vedlagte CD.

Allowable working tension

Allowable working tension in N are contained in Table 28.

Allowable working tension in N

Table 28

Belt width reference	Belt width mm	Pitch MXL	XL	L	H	XH
012	3.0	13				
019	4.8	20				
025	6.4	27	36			
031	7.9		44			
037	9.5		53	70		
050	12.7		81	105	263	
062	15.9		107	135	355	
075	19.1		130	180	445	
100	25.4		186	245	620	
125	31.8			315	795	
150	38.1			380	980	
175	44.5			450	1145	
200	50.8			530	1340	2000
250	63.5			665	1695	2550
300	76.2			805	2100	3100
350	88.9				2527	3775
400	101.6				2950	4450
500	127.0					

Bilag 2: Budget

Bestillingsliste til projektet: Vision styret malerobot

item	forhandler	varenr.	antal	pris	Kontakt	link	note
Løjebukke	RSonline	PILLOW BLOCK BRG 15MM	4	182,75	38169995	http://dk.r	
Tandrem, H	RSonline	475-0131	1	150,00		http://dk.r	
Tandremskive	Mobra A/S	18411400	2	36,00	46351102	http://www	
Aksel kobling	Mobra A/S	60254000	1	202,00		http://www	
Motor	Zeitauf	EC+63.40 PX 63-30	1	2.712,49	43231135		
Encoder	Zeitauf	encoder til motor	1	1.354,94			
Styring til motor	gearcentralen	FA47-18A (FleetroCraft)	1	1.862,00	74471864	http://www	
Tandem housing	igus	RTA-01-30	2	673,71	86603373	http://www	
Løje i massiv plastic	igus	RJM-01-30	2	65,27		http://www	
Præc. aksel alumin	igus	AWM-30	2	253,87		http://www	Længde 750 mm
Shaft support block	igus	WA-30	4	189,04		http://www	

kurs EUR/DK	7,4427	uden moms	9.826,33	Hertil kommer fragt og ekspeditionsgebyr
		mec moms	12.282,91	samt udgifter til aluminiums plader og bolte.

Bachelor projekt:
 Studerende: Jakob Mahler Hansen, s072091
 Vejledere: Ole Ravn & Nils Axel Andersen