



CHALMERS



Automatisk gräsklippare

Utveckling och styrning av en linjemålningsmekanism för autonom målning av linjerna på en fotbollsplan

Noel Andersson
Adam Gunnarsson
Elmer Janmark
Anton Mark
Lisa Rapp
Viktor Walldén

Institutionen för elektroteknik

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2024
www.chalmers.se

KANDIDATARBETE 2024

Automatisk gräsklippare

Utveckling och styrning av en linjemålningsmekanism för autonom
målning av linjerna på en fotbollsplan

Noel Andersson

Adam Gunnarsson

Elmer Janmark

Anton Mark

Lisa Rapp

Viktor Walldén



CHALMERS

Institutionen för Elektroteknik
Avdelningen för System- och Reglerteknik
Projekt EENX16-24-04
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2024

Automatisk gräsklippare
Utveckling och styrning av en linjemålningsmekanism för autonom målning av lin-
jerna på en fotbollsplan

Noel Andersson

Adam Gunnarsson

Elmer Janmark

Anton Mark

Lisa Rapp

Viktor Walldén

© Noel Andersson

Adam Gunnarsson

Elmer Janmark

Anton Mark

Lisa Rapp

Viktor Walldén, 2024.

Handledare: Jonas Fredriksson, Institutionen för Elektroteknik

Examinator: Karinne Ramirez-Amaro, Institutionen för Elektroteknik

Kandidatarbete 2024

Institutionen för Elektroteknik

Avdelningen för System- och Reglerteknik

Chalmers Tekniska Högskola

SE-412 96 Göteborg

Telefon +46 31 772 1000

Omslagsbild: Husqvarna EPOS 550 tillsammans med den utvecklade kritmekanis-
men.

Skriven i L^AT_EX

Göteborg, Sverige 2024

Sammanfattning

De senaste åren har det skett ett alltmer övergående skifte från naturgräsplaner till konstgräsplaner inom bland annat fotboll. Anledningen är att konstgräsplaner kräver mindre manuellt underhåll och minskar därmed kostnaderna för kommuner. Däremot medför skiftet även negativa konsekvenser på exempelvis miljön, då mikroplaster som granulat sprids i naturen. För att minska underhållskostnaderna och därmed motverka skiftet, är syftet med det här arbetet att utveckla och styra en kritmekanism, som kan integreras med en autonom gräsklippare, för autonom kritning av linjerna på en fotbollsplan. För att uppnå autonom kritning krävs att gräsklipparen kan styras så att linjerna inte blir krokiga eller sneda samt att en kritmekanism, som kan krita linjerna på rätt ställe och med rätt bredd, behöver utvecklas.

För att möjliggöra detta, delades arbetet upp i två huvudmål, linjeföljning och kritmekanism. För linjeföljningen har en modellbaserad metodik applicerats där bland annat modellering, simulering och implementering har behandlats. Utvecklingen av kritmekanismen följer en produktutvecklingsmetodik där delar som idégenerering, beslutsmatriser och prototyp tillverkning har genomförts. Från linjeföljningens metodik blev resultatet att via kombinerad odometrins höga uppdateringsfrekvens med RTK-mottagarens höga precision genom ett Extended Kalmanfilter lyckades ett system tas fram som möjliggjorde för gräsklipparen att följa referenslinjer. Detta både i simulering och i verkligheten, med en maximal avvikelse på 7 centimeter över en rak sträcka på 50 meter. Däremot med mer varierande precision för mer komplexa geometrier som cirklar och geometrier med skarpa svängar. Resultatet av produktutvecklingen blev en kritmekanism som kunde applicera färg på rätt ställe och med rätt bredd. Vidare resulterade metodiken i ett förslag på hur en tänkt slutprodukt skulle kunna se ut.

Slutsatserna av arbetet är att många av de väsentliga delar som krävs för att möjliggöra autonom kritning av linjer fungerar, men på grund av för låg hastighet på gräsklipparen i kombination med ett för högt flöde av färg från kritmekanismen uppfylls inte huvudmålet med att krita linjerna till en hel fotbollsplan. Vidare arbete med att förfina styrningen av gräsklipparen samt minska flödet av färg från kritmekanismen behövs för att uppfylla projektets mål.

Nyckelord: RTK, EPOS, Kalmanfilter, Raspberry Pi, Husqvarna, ROS2, HRP2, Produktutveckling, CAD.

Abstract

In recent years, there has been an increasingly prevalent transition from natural grass fields to artificial turf fields in various sports, including football. The reason is that artificial turf fields require less manual maintenance and thereby reduces the costs for municipalities. However, the transition also has negative consequences, such as environmental impact due to microplastic granules spreading in nature. To reduce the maintenance costs and counter the transition, the purpose of this paper is to develop and control a line chalking mechanism, that can be integrated with an autonomous lawnmower, for autonomous chalking of the lines on a football field. Achieving autonomous chalking requires precise control of the lawnmower to ensure straight and precise lines, as well as the development of a chalking mechanism able to chalk the lines on the correct position and in the correct width.

To solve the problem, the work was divided into two main goals, line following and the chalking mechanism. For the line following, a model-based methodology has been applied, including modeling, simulation, and implementation. The development of the chalking mechanism follows a product-development process, incorporating among other things, idea generation, decision matrices, and prototype manufacturing. The result of the line following methodology was that by combining the high update frequency of the lawnmowers odometry with the high precision of the RTK-receiver, through an Extended Kalman Filter, a system was developed allowing the lawnmower to follow reference lines. This in both simulation and reality, with a maximum deviation of 7 centimeters over a straight distance of 50 meters. However, for more complex geometries, the precision varied. The result of the product-development was a chalking mechanism capable of chalking the lines at the correct position and in the correct width.

The conclusions of this paper are that most of the essential components required for autonomous chalking of lines are functional, but due to the lawnmower's low speed relative to the high flow of paint from the chalking mechanism, the main goal of chalking the entire football field is not fulfilled. Further work is needed to refine the lawnmower's control as well as reduce the flow of paint from the chalking mechanism in order to fulfill the project's objectives.

Keywords: RTK, EPOS, Extended Kalman Filter, Raspberry Pi, Husqvarna, ROS2, HRP2, Product development, CAD.

Förord

Vi vill börja med att tacka vår handledare, Jonas Fredriksson, som har varit till stor hjälp under vårt kandidatarbete. Tack för all feedback och all vägledning du gett oss under projektets gång. Ett stort tack riktas också till deltagarna som arbetat med utvecklingen av den autonoma gräsklipparen i förra årets kandidatarbete. Ett extra tack riktas till Gustav Malmström som ställt upp på möten och bidragit med användbar information för att kunna driva projektet framåt. Vi vill också tacka Jakob Roos, som har ställt upp på intervjuer och försett oss med material om hur kritmekanismen kan utformas. Slutligen vill vi dessutom tacka Chalmers bibliotek och fackspråk för era tjänster och handledningar gällande rapportskrivande, samt personalen på prototypplabbet och CASE som varit behjälpliga under projektet.

Noel Andersson
Adam Gunnarsson
Elmer Janmark
Anton Mark
Lisa Rapp
Viktor Walldén
Göteborg, 2024

Akronymer

Listan nedan innehåller akronymer som används i rapporten. Akronymerna förekommer i alfabetisk ordning:

CAD	Computer Aided Design
CAN	Controller Area Network
EPOS	Exact Positioning Operating System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPIO	General Purpose Input/Output
GPS	Global Positioning System
HRP	Husqvarna Research Platform
HTML	HyperText Markup Language
IMU	Inertial Measurement Unit
PID	Proportional Integral Derivative
ROS2	Robot Operating System 2
RPI	Raspberry Pi
RTK	Real Time Kinematic
SSH	Secure Shell Protocol

Innehåll

Akronymer	x
1 Introduktion	1
1.1 Syfte	2
1.2 Precisering av mål och delmål	2
1.2.1 Mål för linjeföljning	3
1.2.1.1 Implementering av koordinatsystem	3
1.2.1.2 Ruttplanering	3
1.2.1.3 Estimering av position	4
1.2.1.4 Reglering	4
1.2.2 Mål för kritmekanismen	4
1.2.2.1 Konstruktion	4
1.2.2.2 Styrning	4
1.3 Avgränsningar och begränsningar	5
1.3.1 Avgränsningar för genomförbarhet	5
1.3.2 Begränsningar	5
1.4 Tidigare arbete	6
1.5 Samhälleliga- och etiska aspekter	6
1.6 Rapportens utformning	7
2 Linjeföljning	8
2.1 Teori Linjeföljning	8
2.1.1 Dimensioner på en fotbollsplan	8
2.1.2 Husqvarna 550 EPOS	9
2.1.3 Sensorer	10
2.1.3.1 Real Time Kinematic	10
2.1.3.2 Inertial Measurement Unit	11
2.1.3.3 Inkrementell pulsgivare	11
2.1.4 Differentialstyrning	11
2.1.5 Extended Kalmanfilter	11
2.1.5.1 Initiera tillståndet	12
2.1.5.2 Prediktera tillståndet	12
2.1.5.3 Korrigera tillståndet	13
2.1.6 Kommunikation	13
2.1.6.1 ROS2	13
2.1.6.2 HRP2 & CAN	13

2.1.6.3	Secure Shell Protocol	13
2.1.7	Raspberry Pi	14
2.1.8	Reglering	14
2.1.8.1	PID-regulator	14
2.2	Metoder Linjeföljning	16
2.2.1	Regulatordesign	16
2.2.1.1	Modellering	16
2.2.1.2	Simulering	21
2.2.2	Koordinatsystem	21
2.2.3	Ruttplanering	23
2.2.4	Tillståndsestimering	25
2.2.4.1	Extended Kalmanfilter	27
2.2.5	Förändring av regleringsmodell	28
2.2.6	Implementering	29
2.2.6.1	Mikrodator	29
2.2.6.2	Styrning	29
2.2.6.3	Tillägg till ruttplanering	30
2.2.6.4	Implementering av koordinatsystem	32
2.2.6.5	Justering av Kalmanfiltret	33
2.2.6.6	Justering av regulatorparametrar	33
2.2.6.7	Kommunikation	33
2.2.6.8	Fullständigt system	34
2.2.6.9	Programmeringskod	35
2.3	Resultat Linjeföljning	37
2.3.1	Simulering	37
2.3.2	EPOS 550	37
2.3.2.1	Raka linjer	38
2.3.2.2	Rektangelkörning	39
2.3.2.3	Cirkelkörning	40
2.3.3	Måluppfyllnad linjeföljning	41
2.4	Diskussion av linjeföljning	42
2.4.1	Simuleringsresultat	42
2.4.2	Skillnader mellan simulerad- och verklig körning	42
2.4.3	Val av antal referenspunkter	43
2.4.4	Inställning av Kalmanfilter	44
2.4.5	Måluppfyllnad linjeföljning	45
3	Kritmekanism	47
3.1	Teori Kritmekanism	47
3.2	Metoder Kritmekanism	47
3.2.1	Analys av kritmekanismens funktioner	47
3.2.2	Analys av alternativa lösningar för kritmekanismer	48
3.2.3	Idégenerering till kritmekanismens delfunktioner	48
3.2.4	Konceptval för utveckling genom beslutsmatriser	49
3.2.4.1	Morfologisk matris för generering av koncept	49
3.2.4.2	Elimineringsmatris för snabb uteslutning av koncept	50

3.2.4.3	Pughmatris för jämförelse mellan kvarvarande koncept	51
3.2.4.4	Realisering av koncept	51
3.2.4.5	Kesselringmatris för framtagning av slutgiltigt koncept	52
3.2.5	Kravspecifikation för måttsättning av kraven på mekanismen .	52
3.2.6	Komponentval till kritmekanism	53
3.2.7	Prototyp tillverkning av kritmekanism	53
3.3	Resultat Kritmekanism	54
3.3.1	Kritmekanismens funktioner	54
3.3.1.1	Funktionslista	54
3.3.1.2	Funktionsmodell	55
3.3.2	Alternativa lösningar	56
3.3.2.1	Linjemärkningsrobot	56
3.3.2.2	Kritmekanism med hjul	56
3.3.2.3	Kritmekanism med elektrisk pump	57
3.3.3	Konceptval	57
3.3.3.1	Idégenerering	57
3.3.3.2	Morfologisk matris	59
3.3.4	Elimineringsmatris	59
3.3.4.1	Kriterier	59
3.3.4.2	Kvarstående koncept efter eliminering	60
3.3.5	Pughmatris	61
3.3.5.1	Pughmatris 1	61
3.3.5.2	Pughmatris 2	62
3.3.5.3	Kvarstående koncept efter Pughmatriserna	63
3.3.6	Skisser	64
3.3.6.1	Koncept A	64
3.3.6.2	Koncept B och Koncept D	64
3.3.6.3	Koncept C och Koncept E	65
3.3.7	Kesselringmatris	65
3.3.7.1	Koncept A: <i>Hjulet</i>	66
3.3.7.2	Koncept C: <i>Fristående mekanisk pump,</i>	66
3.3.7.3	Koncept E: <i>Fristående elektrisk pump</i>	66
3.3.7.4	Koncept B: <i>Integrerad mekanisk pump</i>	67
3.3.7.5	Koncept D: <i>Integrerad elektrisk pump</i>	67
3.3.8	Det vinnande konceptet	67
3.3.9	Kravspecifikation	67
3.3.10	Prototyp	68
3.3.10.1	Inköpta komponenter	69
3.3.10.2	Tillverkning av komponenter	72
3.3.10.3	Montering	75
3.3.11	Funktionella tester	76
3.3.11.1	Färgflöde	76
3.3.11.2	Vikt	76
3.3.11.3	Kritar i rätt storlek	77
3.3.11.4	Precision	77
3.3.12	Slutmodell	78

3.3.12.1	Strömkälla och relä	79
3.3.12.2	Behållare	79
3.3.12.3	Pump och externt pumphus	80
3.3.12.4	Filter och rör i färgbehållaren	80
3.3.12.5	Fästanordning, slanganslutningar och munstycke	81
3.3.13	Utvärdering mot kravspecifikationen	81
3.3.13.1	Funktioner	81
3.3.13.2	Prestanda	82
3.3.13.3	Utvecklingskostnad	82
3.3.13.4	Massa	82
3.4	Diskussion av kritmekanismen	84
3.4.1	Produktutvecklingsmetodikens applicering	84
3.4.2	Valet av komponenter till kritmekanismen	85
3.4.3	Flödet genom munstycket är högre än förväntat	86
3.4.4	Måluppfyllnad kritmekanism	86
4	Slutsats och framtida arbeten	87
Bibliography		I
Referenser		I
A Appendix		V
A.1	Måltabell	V
A.2	Fullständig elimineringsmatris	VI
A.3	Sprängskiss på slutmodell	VIII
A.4	Pumpmanual	X

1

Introduktion

Fotboll är Sveriges största sport och svarar för cirka 40% av all idrottsaktivitet i landet [1]. Fotbollsöreningarna i Sverige hade år 2022 över 1,3 miljoner medlemmar, varav 600 000 aktiva spelare i alla åldrar [1].

För att de aktiva ska kunna spela under goda förutsättningar krävs fotbollsplaner av hög kvalitet, planskötsel är därför viktigt. Fotbollsplaner behöver många gånger kritas och klippas upp till tre gånger i veckan om önskad kvalitet på linjer och gräshöjd ska kunna bibehållas [2]. Skötseln av planerna är således ett tidskrävande arbete för vaktmästare och därmed också en stor kostnad för fotbollsklubbarna eller kommunerna som ansvarar för planerna. Höga underhållskostnader för naturgräsplaner är en av anledningarna till den stora tillväxten av antalet konstgräsplaner. Konstgräsplaner kräver betydligt mindre underhåll och kan användas i de flesta väderförhållanden, vilket möjliggör fotbollsspel året runt [3]. År 2022 fanns det 830 stycken 11-manna konstgräsplaner vilket är en markant ökning sedan år 2012 då det fanns 475 stycken [1],[4].

Konstgräsplaner ersätter i många fall naturgräsplaner och även om det finns många fördelar med konstgräsplaner medför de en del negativa konsekvenser. Fotbollsspel på konstgräsplaner har visat sig öka risken för skador, både lättare skador och överbelastningsskador [5]. Skador medför att de aktiva tvingas sluta med idrott vilket inte är bra, i synnerhet inte för unga människor då fysisk aktivitet främjar hälsan genom att bidra till bättre inlärningsförmåga, sömnkvalitet och koncentration [6]. Vidare har också konstgräsplaner en viss negativ påverkan på miljön på grund av dess material. Granulat är det vanligaste fyllnadsmaterialet i konstgräsplaner, vars bitar är så små att de räknas som mikroplast när de sprids i naturen [7]. Kontinuerlig påfyllnad av granulat är nödvändigt, eftersom det hela tiden sprids och försvinner granulat från planen vilket försämrar kvaliteten. Mikroplaster bryts inte ner naturligt utan ansamlas i naturen, vilket är problematiskt sett ur ett miljöperspektiv [7]. De nämnda negativa konsekvenserna är anledningar till att sträva efter att skapa bättre möjligheter att behålla naturgräsplaner.

Ett sett att minska kostnaderna för skötsel av naturgräsplaner är att ersätta delar av det tidskrävande arbetet med att klippa och krita linjer på planerna med autonoma robotar. Svenska fotbollsförbundet har tillsammans med Husqvarna tagit fram förslag på vilka av Husqvarnas Automowers som kan passa föreningar beroende på antalet planer som ska underhållas [8]. De har i samband med detta genomfört en besparingsanalys, där de jämfört Automowers med vanliga klippare, både ur ett

kostnads- och miljöperspektiv. Analysen visar att en förening som använder en robot från Husqvarna med EPOS-tekniken (Exact Positioning Operating System) kan göra besparingar på upp till 100 000 kronor jämfört med en fossildriven klippare över en tidshorisont på åtta år. Den visar också att koldioxidutsläppen minskar med upp till 99% under användningsfasen om byte från en fossildriven till en eldriven klippare görs.

Målning av fotbollslinjer ingår också som en del i planskötseln, därför hade en integrering av automatisk klippning och målning effektiviserat skötseln ytterligare. Detta då samma maskin kan användas till flera olika ändamål. För att särskilja begreppet linjemålning relaterat till målning av fotbollplanslinjer med andra typer av linjemålning kommer begreppet kritning användas i rapporten istället. Begreppet kritning är också det vanligaste namnet för linjemålning av fotbollslinjer bland personer som arbetar inom branschen.

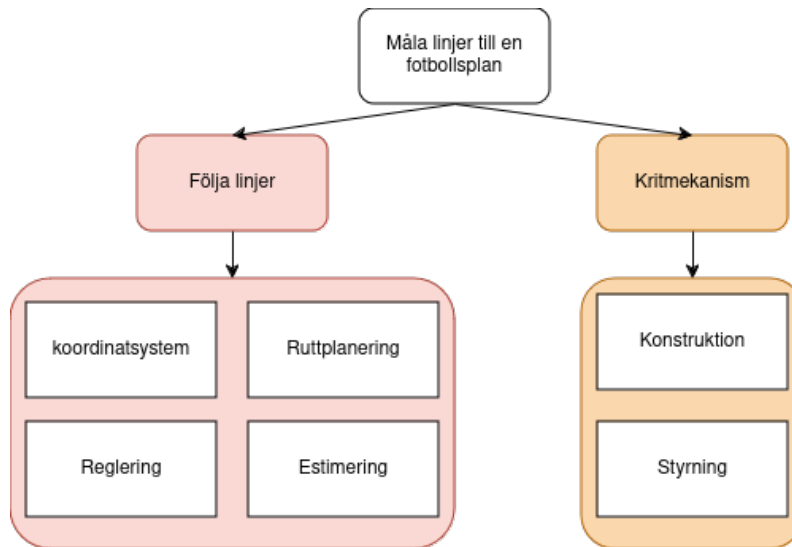
För att gräsklipparen ska kunna användas till att krita linjer ställs kravet att den måste veta sin position med hög noggrannhet för att kunna krita linjerna på rätt ställe och sätt. Det är även nödvändigt att färgen till linjerna inte behöver fyllas på manuellt under en plankritning.

1.1 Syfte

Projektets syfte är att utveckla och styra en kritmekanism, som kan integreras med en autonom gräsklippare, för autonom kritning av linjerna på en fotbollsplan.

1.2 Precisering av mål och delmål

För att uppnå projektets syfte bryts detta ner till delmål som ska reflektera projektets mest kritiska delar. Projektet bryts därför ned i två huvuddelmål, *följa linjer* och *kritmekanism*. Varje huvuddelmål har sedan brutits ner i mindre delmål, vilket visas i figur 1.1. En tabell för målsättning har upprättats i syfte att kunna mäta och verifiera de mål och delmål som presenteras i kommande stycken, se appendix A.1 för kravspecifikation.



Figur 1.1: Mål och delmål.

1.2.1 Mål för linjeföljning

För att kunna krita linjer måste gräsklipparen kunna följa referenslinjer. Geometrierna som behöver kritas på en fotbollsplan är raka linjer och cirklar och därav ska gräsklipparen kunna följa en rak linje samt cirklar utifrån en referens. Projektgruppen har bestämt att målet är att gräsklipparens position inte ska avvika mer än 1 centimeter per meter över en rak linje på 50 meter.

Vidare bestämdes det att målet för cirkelkörningen var att skillnaden i radie, från cirkelns mittpunkt, mellan gräsklipparens position och den önskade positionen inte skulle vara större än 1 centimeter per meter radie. Målvärdena sattes med utgångspunkt i att det bedömdes att en större avvikelse skulle resultera i linjer som gör planen orättvis eller omöjlig att spela fotboll på.

1.2.1.1 Implementering av koordinatsystem

För att gräsklipparen ska kunna följa referenslinjer och planera rutter måste ett koordinatsystem implementeras som gräsklipparen kan utgå från vid positionering. Gräsklipparen använder sig av ett lokalt koordinatsystem för att beskriva gräsklipparens förflyttning. Då referenslinjerna som önskas följas är relativt ett globalt koordinatsystem på en fotbollsplan, krävs att gräsklipparens lokala koordinater relateras till de globala koordinaterna på fotbollsplanen.

1.2.1.2 Ruttplanering

Gräsklipparen ska kunna följa en förutbestämd rutt som beskriver hur gräsklipparen ska förflyttas för att kunna måla samtliga linjer på en fotbollsplan. För att åstadkomma detta behöver ruten planeras utifrån de dimensioner av fotbollsplanen som användaren anger, vilket i sin tur kräver en kommunikation mellan användaren och

gräsklipparen.

1.2.1.3 Estimering av position

När gräsklipparen följer den planerade rutten behöver dess position relativt det globala koordinatsystemet estimeras. Estimeringen görs baserat på mätningar från olika sensorer som sitter monterade på gräsklipparen. Mätdata som exempelvis hjulens rotationshastigheter och gräsklipparens position enligt Real Time Kinematic (RTK) behöver samlas in och appliceras i systemet genom olika algoritmer för att därigenom estimeras gräsklipparens position och riktning.

1.2.1.4 Reglering

Reglering är nödvändigt för att gräsklipparen ska kunna följa referenslinjer eftersom det via reglering av systemet går att påverka gräsklipparens rörelse för att uppnå önskat beteende. Skulle exempelvis gräsklipparen vid något tillfälle avvika från den planerade rutten krävs reglering av systemet för att få tillbaka gräsklipparen till rätt position. Regleringen grundar sig på gräsklipparens estimerade position eftersom det är relativt den som gräsklipparens rörelser via algoritmer behöver bestämmas för att följa de referenslinjer som önskas. Målet med regleringen är att få ett system som kan följa de rutter och linjer som önskas.

1.2.2 Mål för kritmekanismen

Målet för kritmekanismen kan brytas ner i två mindre delmål, konstruktion och styrning. För att kunna krita linjerna krävs att en anordning konstrueras som möjliggör att färg appliceras på gräsmattan. För att krita linjerna ska ske på rätt ställe krävs även styrning av när mekanismen ska krita. De två delmålen förklaras i ytterligare detalj nedan.

1.2.2.1 Konstruktion

Systemet ska kunna krita linjerna till en 11-manna plan utan bemanning. Färg ska därmed inte behöva fyllas på manuellt under en krita och styrningen av krita ska vara automatiserad. Mekanismens behållare behöver rymma färg som räcker till krita av en hel 11-manna plan. Dessutom behöver en konstruktion tas fram som säkerställer att linjerna har en korrekt bredd på 11 centimeter, se appendix A.1 för verifieringsmetod av kravuppfyllnad.

1.2.2.2 Styrning

För att kunna krita linjerna på en fotbollsplan krävs det att krita sker på rätt ställe. Därav behövs en form av styrning som bestämmer när kritmekanismen ska krita och när den ska sluta krita. Styrningen av kritmekanismen grundar sig i vart gräsklipparen befinner sig, vilket innebär att det måste upprättas en kommunikation

mellan kritmekanismen och gräsklipparen samt mellan gräsklipparen och användaren för att linjemålning ska ske på korrekt position. Målet är att kritmekanismen ska kunna applicera linjer med en felmarginal på ± 2 cm från det tänkta läget.

1.3 Avgränsningar och begränsningar

I arbetet finns både avgränsningar och begränsningar att ta hänsyn till. Avgränsningarna har gjorts för att göra arbetet mer genomförbart, medan begränsningarna är faktorer som inte har varit möjliga att påverka.

1.3.1 Avgränsningar för genomförbarhet

Syftet med de valda avgränsningarna är att kunna möjliggöra ett betydande resultat. För att det ska vara möjligt kommer arbetet fokusera på det som bedöms som de mest kritiska delarna. De kritiska delarna för arbetet handlar om att få gräsklipparen att köra rakt och krita färg efter den rutt som förutbestämts. Fotbollsplanen antas därför vara hinderfri och utan lutningar, större gropar eller lera som kan få den att stanna. Vidare kommer väderförhållandena antas vara goda för kritning. Det innebär till exempel att det inte regnar, snöar eller blåser för mycket. Vindhastigheter över 8 m/s innebär frisk vind, och kritningen antas därför kunna skötas i vindhastigheter lägre än 8 m/s, vilket innebär under svaga och måttliga vindhastigheter [9]. Kraftiga vindar kan påverka gräsklipparens förmåga att köra rakt och leda till att färgen inte appliceras på gräsmattan på rätt ställe. Goda väderförhållanden är också viktigt eftersom färgen inte fastnar om gräset är blött. Slutligen kommer inte heller gräsklipparen att testas för klippning av gräs då den funktionen redan fungerar och inte antas påverkas av resterande delar av projektets utveckling.

Tanken med kritmekanismen är att den ska integreras med klipparen. Eftersom projekttiden är 4 månader bedöms att tid kommer att finnas till att ta fram en prototyp för att testa kritmekanismens funktioner och hur den ska samverka med den autonoma gräsklipparen. En slutgiltig lösning kommer att göras i Computer Aided Design (CAD).

1.3.2 Begränsningar

Begränsningarna innefattar att arbetet har en tidshorisont på 4 månader, som sträcker sig från mitten av januari till slutet av maj. Vidare gäller det att inköp till projektet maximalt får uppstiga till 5000 kronor. En ytterligare begränsning är att den autonoma gräsklippare som används är en Husqvarna Automower 550 EPOS. Arbetet är således begränsat till den specifika modellen och dess specifikationer.

Gräsklipparen är utrustad med Husqvarna Research Platform 2 (HRP2), vilket är en kommunikationsplattform som möjliggör styrning och kommunikation med gräsklipparen. HRP2-plattformen använder sig av Robot Operating System 2 (ROS2) Galactic, [10]. ROS2-gränssnittet består av Husqvarnas Hqv public interface [11] som baseras på en rad olika ROS-topics som kan prenumereras på och publiceras till.

Dessa ROS-topics innehåller data relaterat till gräsklipparen vilket kan användas för exempelvis styrning och positionering.

1.4 Tidigare arbete

Ett tidigare kandidatarbete har genomfört den ovan nämnda integreringen med automatisk kritning och klippning [12]. I kandidatarbetet användes till en början Husqvarnas Automower 450x vid implementeringen. Arbetet visade att den använda gräsklipparens Global Positioning System (GPS) inte var tillräckligt bra eftersom resultatet vid körning efter en rak linje varierade med 0,1–0,5 meter i felmarginal över en sträcka på 40 meter. I och med att det inte är ett tillräckligt noggrant resultat för att möjliggöra kritning av en fotbollsplan gjordes i stället implementeringen på Husqvarnas Automower 550 EPOS, vilket är samma modell som används i detta projekt.

Modellen har potential att lösa navigering med enbart några centimeters felmarginal, men på grund av att modellen erhöles sent i det tidigare kandidatarbetet lyckades inte det önskade målet uppnås [12]. Det största problemet var robotens förmåga att följa en specifik rutt utan att avvika från den. Enligt det tidigare kandidatarbetet berodde det på att positionen från basstationen inte lyckades extraheras på ett korrekt sätt, vilket de trodde kunde bero på flera olika anledningar som de tar upp i sin diskussion.

Det tidigare kandidatarbetet tog även fram en kritmekanism i form av en inköpt färgspruta [12]. En ställning konstruerades och tillverkades så att färgsprutan kunde fästas bak på gräsklipparen och ett munstycke inhandlades så att bredden på kritningen blev korrekt. För att kritningen skulle kunna styras och därmed ske på rätt ställe användes en servomotor som med hjälp av ett snöre kopplades till avtryckaren på färgsprutan. Problemet med den föregående kritmekanismen var att servomotorn som var tänkt att användas inte var kompatibel med den hårdvara som användes till kommunikationen med Husqvarna 450x. Hårdvaran på den nyare modellen 550 EPOS var däremot kompatibel vilket gjorde att servomotorn fungerade på den modellen, men då navigationen inte fungerade lyckades inte det önskade målet av helt autonom kritning uppfyllas. Volymen på kritmekanismen var även begränsad till 0,9 liter vilket gjorde att tiden för kritning ungefär var 30 sekunder och därmed för kort för kritning av en hel fotbollsplan.

1.5 Samhälleliga- och etiska aspekter

Syftet med implementeringen av den autonoma gräsklipparen med en integrerad kritmekanism är att underlätta planskötseln av naturgräsplaner så att fler naturgräsplaner kan behållas. Genom att behålla naturgräsplaner minskas övergången till konstgräsplaner, vilket innebär att framtagningen av produkten kan bidra med nytta för både miljön och de människor som spelar fotboll. Det relaterar till att konstgräsplanernas fyllnadsmaterial har en negativ påverkan på miljön, samt att

skaderisken har visat sig vara högre vid spel på konstgräsplaner jämfört med naturgräsplaner [7], [5].

Vaktmästare ansvarar idag för en stor del av planskötseln av fotbollsplaner runt om i landet. Implementeringen av den autonoma gräsklipparen med integrerad kritmekanism skulle således kunna medföra att människor inom branschen förlorar sina arbeten. Det anses inte vara ett problem i dagsläget då produkten inte kommer vara helt autonom, vilket betyder att ett visst underhåll fortfarande är nödvändigt. Vaktmästare har också generellt fler arbetsuppgifter vilket innebär att implementeringen av produkten möjliggör att mer tid kan läggas på något annat arbetsområde. Utvecklingen mot ett autonomt samhälle kommer dessutom medföra att nya arbeten skapas.

Autonoma gräsklippare är utrustade med roterande knivar vilket gör att det förekommer en risk att människor och djur kan komma att skadas. Enligt Råd och Rön [13] har en studie visat att igelkottar är särskilt utsatta och att antalet har minskat när användandet av autonoma gräsklippare har ökat. Husqvarna, som utvecklar och säljer autonoma gräsklippare, visar att de är medvetna om problemet då de bland annat har publicerat en lista med tio råd om hur trädgården kan göras mer igelkottsvänlig [14]. Husqvarna har även uppdaterat gräsklipparnas programvaror med ett naturskyddsläge som innebär att roboten är inaktiv under nätterna eftersom det är då igelkottarna är som mest aktiva [15].

För att gräsklipparen ska kunna navigera på fotbollsplanen kommer någon form av GPS användas. Om GPS-data insamlas och sparas på felaktigt sätt finns det en viss risk att intrång kan göras på användarens integritet. Det följer därav ett ansvar på produktutvecklaren att undvika att detta inträffar.

1.6 Rapportens utformning

Då arbetet behandlar två huvuddelmål vars innehåll skiljer sig väsentligt från varandra är det naturligt att dela upp dem i olika delar i rapporten. De två huvuddelmålen tilldelas därför varsitt eget kapitel. Varje kapitel läses med fördel som två separata rapporter på grund av att det varierande innehållet bidrar till att uppbyggnaden av språket ser olika ut för varje del. Det innebär att huvuddelmålet som rör linjeföljning har ett eget kapitel med teori, metod, resultat och diskussion och detsamma gäller för kritmekanismen. Slutligen sammanfattas hurvida resultaten från de två huvuddelmålen kan kopplas till projektets syfte i en gemensam slutsats.

Syftet med utformningen är att göra rapporten mer sammanhängande genom att information som tillhör de olika huvuddelmålen sammanställs på samma ställe. Förhoppningen är att det kommer underlätta för läsaren och att rapporten därmed blir enklare att granska och förstå.

2

Linjeföljning

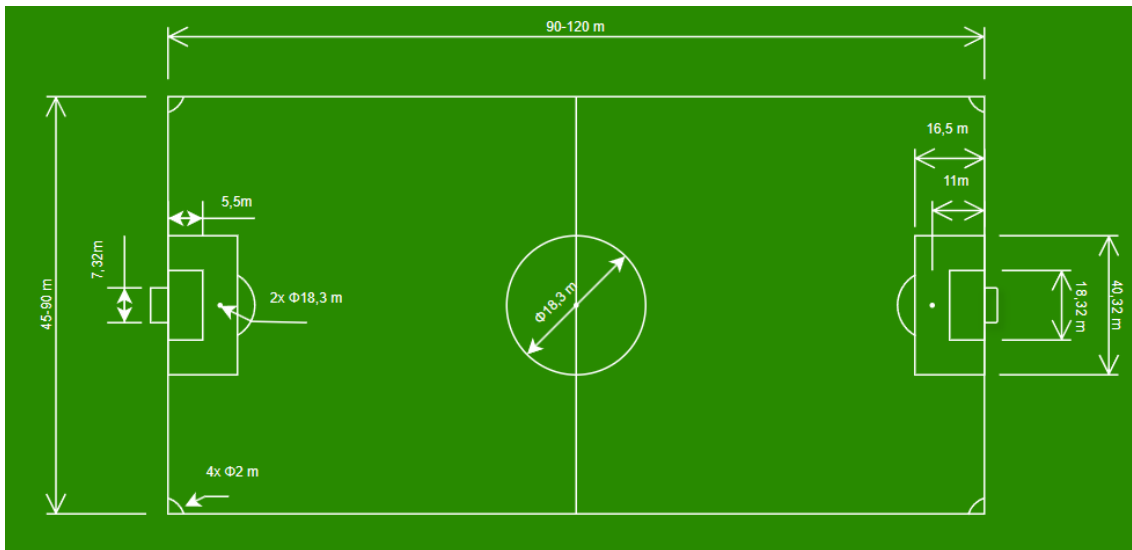
För att uppnå autonom kritning av en fotbollsplan krävs att gräsklipparen kan navigera utefter en förutbestämd rutt med bra precision. Kapitlet behandlar utmaningarna med att möjliggöra för gräsklipparen att följa linjer. I teoriavsnittet presenteras den teoretiska bakgrund och relevanta information som ligger till grund för att möjliggöra linjeföljning. Den metodik som har tillämpats för att lösa linjeföljningsproblemet beskrivs i metodavsnittet. Resultatavsnittet presenterar utfallen av linjeföljningsförsöken både i form av simuleringar och från tester på den fysiska gräsklipparen. Slutligen diskuteras resultaten som erhöles, val av parametrar och hur väl de uppsatta målen uppfyllts i diskussionsavsnittet.

2.1 Teori Linjeföljning

Teoriavsnittet sammanfattar den relevanta bakgrundsinformation som har inhämtats för att möjliggöra för en robotgräsklippare att följa en förutbestämd rutt. Först avhandlas en kort del om fotbollsplanens dimensioner som senare behövs till ruttplaneringen. Inkluderat i kapitlet är även information om den använda gräsklipparen och vilka av dess sensorer som används i projektet. Därtill förklaras även hur de olika sensorerna fungerar. Vidare behandlas teori om styrning av roboten, vilket tillsammans med ett Kalmanfilter behövs för tillståndsestimeringen. För att kunna styra roboten behövs en fungerande kommunikation, där de viktigaste koncepten förklaras. Slutligen avhandlas teori om reglerteknik där stort fokus läggs på Proportional Integral Derivative (PID) regulatoren, eftersom den är en viktig del för att gräsklipparen ska kunna följa linjer.

2.1.1 Dimensioner på en fotbollsplan

Dimensionerna på en fotbollsplan i Sverige bestäms och regleras av Svenska fotbollsförbundets bestämmelser och består av både unikt bestämda mått samt mått som får variera inom särskilda intervall [16]. De unikt bestämda dimensionerna innefattar målområdet, straffområdet, mittlinjen inklusive mittcirkeln samt hörnombåden. För sidlinjerna gäller att dimensionerna får variera mellan 90 - 120 meter och för mållinjen gäller intervallet 45 - 90 meter. Linjestorleken på samtliga linjer på planen behöver vara gemensam och får maximalt uppgå till 12 centimeter. Figur 2.1 visar en sammanställning av samtliga dimensioner.



Figur 2.1: Sammanställning av samtliga dimensioner på en fotbollsplan.

2.1.2 Husqvarna 550 EPOS

Husqvarna 550 EPOS, vilken visas i figur 2.2, är en av Husqvarnas modeller i deras serie av robotgräsklippare. Modellen är framtagen för kommersiellt bruk och är avsedd att användas i maskinparker och grönområden upp till 10 000 m² [17]. Gräsklipparen har en vikt på 13,8 kg och dimensionerna 72x56x32 cm (längd, bredd, höjd). Batteriet har en kapacitet på 10 Ah och ger en normal klipptid på 210 minuter. Klipphöjden är justerbar mellan 20-60 mm.

Gräsklipparen använder sig av EPOS-teknologi, vilket innebär att ingen fysisk begränsningskabel behövs; istället sätts områdesgränser virtuellt i Husqvarnas app [18]. Husqvarnas EPOS-teknik är baserad på RTK-teknik, vilket möjliggör att gräsklipparens position kan bestämmas med en precision på 2-3 cm [17].



Figur 2.2: Husqvarna 550 EPOS.

2.1.3 Sensorer

Husqvarna 550 EPOS har flera inbyggda sensorer och de som kommer nyttjas i detta arbete listas i tabell 2.1.

Tabell 2.1: Tillgängliga sensorer i Husqvarna 550 EPOS.

Sensor	Mätning av
GNSS	position
GNSS RTK	position
IMU	orientering
Inkrementell pulsgivare	vinkelskillnad (hjul)

2.1.3.1 Real Time Kinematic

För att minimera osäkerheter relaterade till mätningar av ett objekts position genom satellitsignaler används relativ positionering. Relativ positionering innebär att ett objekts position bestäms i förhållande till en eller flera punkter som mäter mot samma satelliter som objektet, och vars koordinater är kända [19]. Real Time Kinematic (RTK) är en metod som använder sig av två satellitmottagare, en på objektet i rörelse och en på en referensstation med kända koordinater [20]. Referensstationen mäter positionsavvikelser och skickar korrektionsdata till det mobila objektet, vilket medför en mer precis positionsmätning [20].

2.1.3.2 Inertial Measurement Unit

Inertial Measurement Unit (IMU) är en elektronisk enhet utrustad med gyroskop, accelerometrar och ibland magnetometrar, en av varje per huvudaxel [21]. Med en IMU placerad på ett objekt fås vinkelhastighet, acceleration och ibland information om magnetfältet. Ett objekts orientering fås genom att integrera vinkelhastigheten och dess position fås genom att dubbelintegrera accelerationen. IMU:n på Husqvarna 550 EPOS är inte utrustad med en magnetometer och därför erhålls inte gräsklipparens vinkel relativt ett geografiskt koordinatsystem.

2.1.3.3 Inkrementell pulsgivare

En inkrementell pulsgivare är en enhet som omvandlar rörelse till sekvenser av digitala pulser [22]. När hjulaxeln på gräsklipparen roterar, uppstår pulser med en frekvens som är proportionerlig mot hjulaxelns vinkelhastighet [22]. Genom att beräkna antalet pulser och kombinera det med pulsgivarens upplösning går det beräkna hjulens vinkelförändringar [22]. Från hjulens vinkelförändringar går det sedan att estimeras gräsklipparens odometri, vilket innebär att robotens positionsförändring över tid, relativt en startposition, estimeras med hjälp av sensormätningar [23].

Upplösningen av en inkrementell pulsgivare definieras som antalet pulser som räknas under ett varv [22]. Husqvarna 550 EPOS har en upplösning på 349 pulser per varv [11], vilket innebär att vinkelförändringen mellan varje puls ges som

$$\Delta\theta = \frac{2 \cdot \pi \cdot N}{349} [\text{rad}] \quad (2.1)$$

där $\Delta\theta$ är hjulens vinkelförändring mätt i radianer och N är antalet pulser som räknats.

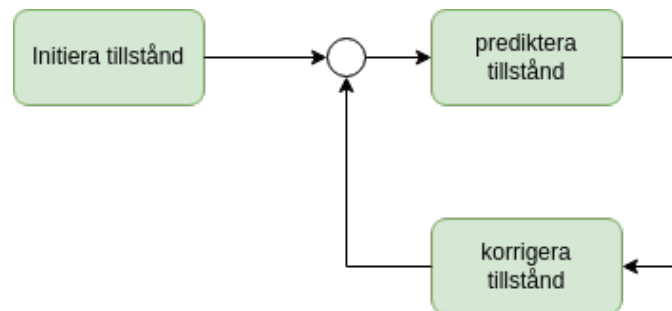
2.1.4 Differentialstyrning

Husqvarna 550 EPOS styrs med differentialstyrning, vilket innebär att robotens hjul drivs av två separata motorer [24]. Styrning åstadkoms således genom att variera vinkelhastigheten på hjulen [25]. Då hjulen roterar med samma hastighet och riktning åker roboten framåt eller bakåt beroende på hjulens rotationsriktning. Vid samma rotationshastighet på båda hjulen, men i olika riktningar roterar den runt sin centrumaxel och när ena hjulet roterar med en annan hastighet än det andra kommer roboten att svänga.

2.1.5 Extended Kalmanfilter

Kalmanfilter kan användas för att estimeras tillståndet av ett objekt i rörelse baserat på en matematisk modell. Då objektets rörelse följer olinjära tillståndsekvationer så ska ett Extended Kalmanfilter användas [26].

Processen att estimeras ett objekts tillstånd med hjälp av ett Kalmanfilter görs i tre steg, se figur 2.3 för en illustration av de tre stegen. Först initieras tillståndet, sedan predikteras tillståndet, och därefter korrigeras tillståndet baserat på mätningar [26]. Tillståndet kan bestå av objektets position, hastighet, acceleration med mera.



Figur 2.3: Kalmanfiltrering process.

Algoritmen är baserad på [27] där målet är att estimeras tillståndet $x = f(x_{k-1}, u)$ givet det uppmätta tillståndet $z = h(x_{k-1}, u)$.

2.1.5.1 Initiera tillståndet

Första steget är att initiera tillståndet x i det första tillståndet som ska utgåas ifrån enligt:

$$x_{k-1} = \begin{bmatrix} x_{1,k-1} \\ \dots \\ x_{n,k-1} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

2.1.5.2 Prediktera tillståndet

Därefter predikteras tillståndet där funktionen $f()$ representerar den olinjära tillståndsövergången, u är styr signaler och ξ är processbruset enligt:

$$\hat{x}_k = f(x_{k-1}, u_{k-1}) + \xi_{k-1} \quad (2.3)$$

Sedan predikteras kovariansmatrisen P där F är Jakobianen av $f()$ och Q är kovariansen av processbruset och ges av:

$$\hat{P}_k = F P_{k-1} F^T + Q \quad (2.4)$$

I det sista steget av predikteringen mäts tillståndet via

$$z_k = h(x_k) + w_k \quad (2.5)$$

där $h()$ är en funktion för den olinjära tillståndsövergången hos sensorerna och w_k är mätbruset från sensorerna.

2.1.5.3 Korrigera tillståndet

Sista steget är att korrigera tillståndet som börjar med att beräkna kalmanförstärkningen K

$$K_k = \hat{P}_k H^T (H \hat{P}_k H^T + R)^{-1} \quad (2.6)$$

där H är en sensormätningssmatris, R är mätningsskovariansen och P_k den tidigare predikterade kovariansmatrisen. Sedan korrigeras tillståndet där den beräknade Kalmanförstärkningen används tillsammans med det predikterade tillståndet samt uppmätta tillståndet z :

$$x_k = \hat{x}_k + K_k(z_k - H\hat{x}_k) \quad (2.7)$$

Slutligen uppdateras kovariansmatrisen enligt:

$$P_k = (I - K_k H) \hat{P}_k (I - K_k H)^T + K_k R K_k^T \quad (2.8)$$

2.1.6 Kommunikation

Kommunikationen i gräsklipparen består i huvudsak av gränssnitten ROS2, HRP2 och CAN (Controller Area Network).

2.1.6.1 ROS2

ROS2 är ett kommunikationsgränssnitt med öppen källkod som används till utveckling av olika typer av robotapplikationer [28]. ROS2 baseras på ett publicera/prenumerera protokoll som möjliggör meddelandehantering mellan olika processer i ett system [28]. Ett ROS-system byggs upp av en graf där noder i grafen publicerar och prenumererar på olika ämnen som innehåller meddelanden med data [28].

2.1.6.2 HRP2 & CAN

HRP2 är ett ROS-nätverk utvecklat av Husqvarna för användning inom olika forsknings- eller undervisningsapplikationer [29]. Det består av flertalet ROS-noder som sköter kommunikationen mellan det system som utvecklas och gräsklipparen. Detta sker genom att gräsklipparen skickar sensordata över CAN som HRP2-nätverket läser in, och sedan publicerar datan på ROS-nätverket. CAN är ett meddelandebaserat protokoll som har blivit en fordonsbusstandard för kommunikation mellan olika moduler inom olika regleringsapplikationer [30]. HRP2-nätverket möjliggör att externa applikationer kan skrivas med tillgång till ett användarvänligt gränssnitt för att hämta in data från gräsklipparen och i sin tur styra gräsklipparen.

2.1.6.3 Secure Shell Protocol

Secure Shell Protocol (SSH) är en mjukvara som möjliggör systemadministration och filöverföring över nätverk [31]. SSH använder kryptering för att säkerställa en säker uppkoppling mellan klienten och servern där all dataöverföring är krypterad mellan sändaren och mottagaren [31].

2.1.7 Raspberry Pi

En Raspberry Pi (RPI) är en mikrokontroller som i ett tidigt stadiet av sin utveckling användes för att möjliggöra kostnadseffektiva datorutbildningar, men har på senare tid utvecklats till att användas inom ett flertal områden där robotik är ett av dem [32]. Applikationer som linjeföljningsrobotar, övervakningsrobotar och robotar inom räddningsarbeten är bara några exempel där en RPI kan användas [33]. Det som skiljer en RPI mot en vanlig dator är framförallt dess storlek och pris. I kontrast till en vanlig dator är samtliga komponenter, som utgör grunden för datorernas funktionalitet, monterade på ett enda kretskort vilket möjliggör den mindre storleken hos RPI:n [32].

2.1.8 Reglering

Reglering syftar till att få det uppmätta värdet $y(t)$ att följa referensvärdet $r(t)$, vilket innebär att reglerfelet

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (2.9)$$

ska minimeras. En regulator är en styrenhet som tar in en insignal och genererar en utsignal $u(t)$ med syftet att få reglerfelet $e(t)$ att gå mot 0. Det är därför vanligt att reglerfelet $e(t)$ är insignal till regulatorn [34].

2.1.8.1 PID-regulator

En PID-regulator är en typ av regulator som kombinerar proportionerlig, integrerande samt deriverande verkan och beskrivs enligt

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(t) + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (2.10)$$

där K_p är den proportionerliga förstärkningen, K_i är den integrerande förstärkningen och K_d är den deriverande förstärkningen [34].

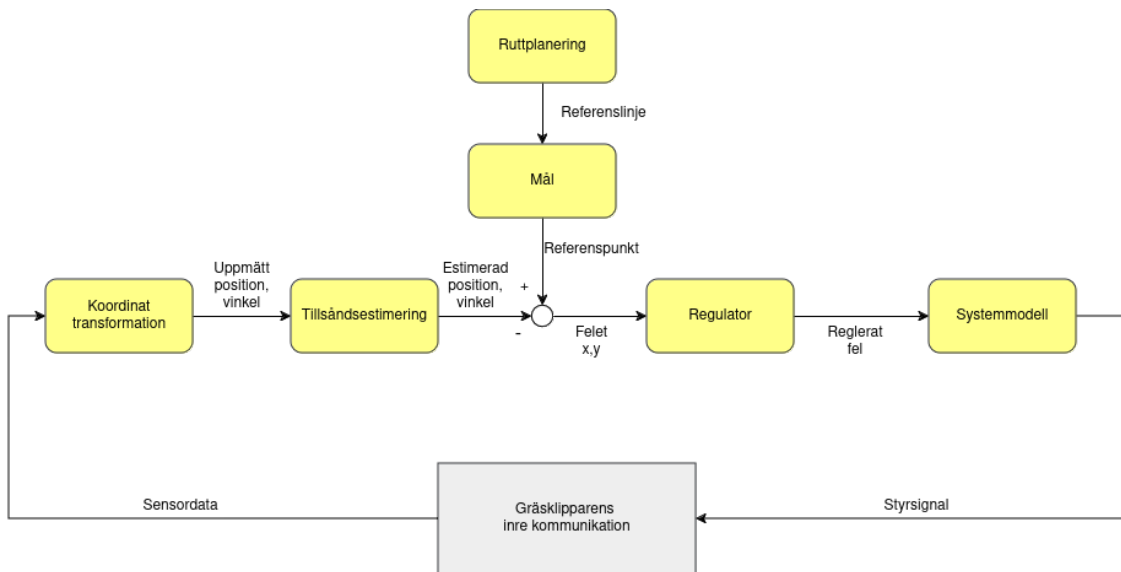
Syftet med den proportionerliga verkan är att förstärka reglerfelet $e(t)$, med en proportionerlig förstärkning K_p , för att få en snabbare respons på det återkopplade systemet [34]. En allt för stor förstärkning kan däremot leda till översläng, vilket innebär att det uppmätta värdet $y(t)$ överskrider referensvärdet $r(t)$ [34]. Det kan dessutom leda till instabilitet. För att minska överslängen används deriverande verkan, med en deriverande förstärkning K_d [35]. Den deriverande verkan används för att förutspå hur processen kommer att förändras för att därigenom motverka att styrsignalen och därmed överslängen blir för stor.

Med enbart proportionerlig- och deriverande verkan finns risken att det blir ett kvarstående fel mellan referensvärdet $r(t)$ och det uppmätta värdet $y(t)$ [36]. För att åtgärda det används integrerande verkan, med en integrerande förstärkning K_i , som summerar felet över tid [36]. Det innebär att det uppmätta värdet $y(t)$ fortsätter att öka tills det kvarstående felet $e(t)$ drivs mot 0. Genom att kombinera proportionerlig, integrerande samt deriverande verkan går det åstadkomma stabil styrning

[36]. De regulatorparametrar som går att justera är den proportionerliga förstärkningen K_p , den integrerande förstärkningen K_i , samt den deriverande förstärkningen K_d .

2.2 Metoder Linjeföljning

Linjeföljningen är utvecklad genom en modellbaserad metod, där gräsklipparen i första skedet modellerades matematiskt. Baserat på modellen utvecklades en regulator för att få gräsklipparen att kunna köra enligt fördefinierade rutter. Systemet testades sedan genom simuleringar för att slutligen implementeras på den verkliga gräsklipparen. Parallellt med det gjordes ruttplaneringsalgoritmen, upprättandet av koordinatsystemet samt tillståndsestimeringen. Strukturen av hela styrsystemet för linjeföljningen lyder enligt figur 2.4, där de gula rutorna representerar de delar som kommer förklaras i metoden.



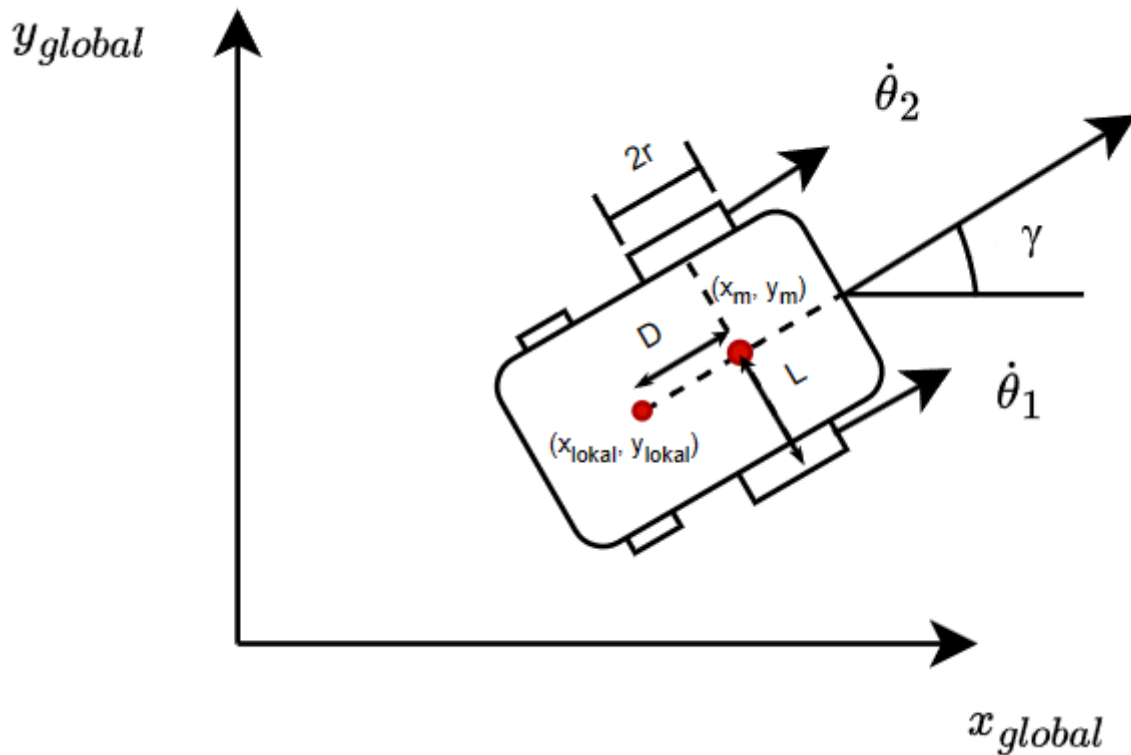
Figur 2.4: Blockschema av styrsystemet. De gula rutorna visar de delar som kommer förklaras i metoden.

2.2.1 Regulatordesign

Reglering används i systemet för att få gräsklipparen att följa de referenslinjer som önskas. Regleringen av gräsklipparen modellerades i ett första skede via simulering och översattes därefter till styrning av den verkliga gräsklipparen.

2.2.1.1 Modellering

Modellen för styrning och reglering av gräsklipparen är baserad på en kinematisk modell av en autonom robot framtagen i [37]. Figur 2.5 visar friläggningen av den autonoma roboten i ett x-y plan.



Figur 2.5: Friläggning av roboten i ett x-y plan i ett globalt koordinatsystem. Återskapad med inspiration från [37].

Låt hjulens vinkelhastigheter representeras av $(\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2)$, r är hjulens radie, D är avståndet mellan hjulaxeln och en punkt (x_{lokal}, y_{lokal}) på kroppen, samt L är halva avståndet mellan hjulen. (x_m, y_m) definierar koordinaterna på hjulaxelns mittpunkt. Om en linje dras mellan punkterna (x_m, y_m) och (x_{lokal}, y_{lokal}) så definierar γ robotens girvinkel relativt x-axeln i en global referensram. För att underlätta för ekvationerna som följer kommer hädanefter (x_{lokal}, y_{lokal}) hänvisas som (x, y) .

Robotens linjära hastighet samt girhastighet representeras av v , respektive ω . Hastighetskomponenterna i x- och y riktningarna ges av (v_x, v_y) . Då hastigheten är derivatan av positionen ges komponenterna av

$$\dot{x}_m = v_x \quad (2.11)$$

$$\dot{y}_m = v_y \quad (2.12)$$

$$\dot{\gamma} = \omega \quad (2.13)$$

vilket i det globala koordinatsystemet ger:

$$\dot{x}_m = v \cdot \cos(\gamma) \quad (2.14)$$

$$\dot{y}_m = v \cdot \sin(\gamma) \quad (2.15)$$

$$\dot{\gamma} = \omega \quad (2.16)$$

På matrisform blir det:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_m \\ \dot{y}_m \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & 0 \\ \sin(\gamma) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Hastigheten, v , och girhastigheten, ω , kan beräknas utifrån hjulhastigheterna såsom

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} & \frac{r}{2} \\ \frac{r}{2L} & \frac{-r}{2L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Mellan hjulaxelns mittpunkt (x_m, y_m) samt koordinaterna (x, y) råder sambanden:

$$x = x_m - D \cdot \cos(\gamma) \quad (2.19)$$

$$y = y_m - D \cdot \sin(\gamma) \quad (2.20)$$

Derivering av (2.19)-(2.20) ger

$$\dot{x} = \dot{x}_m + D \cdot \dot{\gamma} \cdot \sin(\gamma) \quad (2.21)$$

$$\dot{y} = \dot{y}_m - D \cdot \dot{\gamma} \cdot \cos(\gamma) \quad (2.22)$$

vilket tillsammans med (2.14)-(2.18) resulterar i följande systemmodell:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & D \cdot \sin(\gamma) \\ \sin(\gamma) & -D \cdot \cos(\gamma) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & D \cdot \sin(\gamma) \\ \sin(\gamma) & -D \cdot \cos(\gamma) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{r}{2L} & \frac{r}{2L} \\ \frac{r}{2L} & \frac{-r}{2L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) \cdot \frac{r}{2} + D \cdot \sin(\gamma) \cdot \frac{r}{2L} & \cos(\gamma) \cdot \frac{r}{2} - D \cdot \sin(\gamma) \cdot \frac{r}{2L} \\ \sin(\gamma) \cdot \frac{r}{2} - D \cdot \cos(\gamma) \cdot \frac{r}{2L} & \sin(\gamma) \cdot \frac{r}{2} + D \cdot \cos(\gamma) \cdot \frac{r}{2L} \\ \frac{r}{2L} & \frac{-r}{2L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Genom att låta kvoten $\frac{D}{L}$ representeras av ρ samt bryta ut kvoten $\frac{r}{2}$ fås:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \frac{r}{2} \begin{bmatrix} \cos(\gamma) + \rho \cdot \sin(\gamma) & \cos(\gamma) - \rho \cdot \sin(\gamma) \\ \sin(\gamma) - \rho \cdot \cos(\gamma) & \sin(\gamma) + \rho \cdot \cos(\gamma) \\ \frac{1}{L} & \frac{-1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

För att kunna bestämma vilka rotationshastigheter gräsklipparen ska ha för att nå en önskad position krävs det även att den inverterade kinematiken modelleras. Ekvationerna som följer uttrycks i diskret tid via bakåt Euler metoden. Detta för att beskriva hur modellen i ett senare skede kan implementeras i programmeringskod.

Låt (x_r, y_r) representera koordinaterna för den position systemet ska följa, samt $\Delta\Omega(k)$ vara gräsklipparens önskade vinkelförändring och $\Delta S(k)$ den önskade translationen. Det önskade målet är att gräsklipparens koordinater (x, y) ska följa referenskoordinaterna (x_r, y_r) , vilket innebär att målet med regulatorn är att felet

$$\begin{bmatrix} x_e(k) \\ y_e(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_r(k) \\ y_r(k) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x(k-1) \\ y(k-1) \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

ska gå mot noll, vilket innebär:

$$\begin{bmatrix} x(k-1) \\ y(k-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_r(k) \\ y_r(k) \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Felet återkopplas med hjälp av två PID-regulatorer enligt:

$$\begin{bmatrix} \Delta x(k) \\ \Delta y(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_p \cdot x_e(k) + K_i \cdot I_x(k) + K_d \cdot \frac{x_e(k) - x_e(k-1)}{T_s} \\ K_p \cdot y_e(k) + K_i \cdot I_y(k) + K_d \cdot \frac{y_e(k) - y_e(k-1)}{T_s} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

där T_s är systemets uppdateringsfrekvens och K_p, K_i, K_d är regulatorernas parametrar. $I_x(k)$ och $I_y(k)$ beskriver regulatorernas integraldel och beräknas enligt:

$$I_x(k) = I_x(k-1) + x_e(k) \cdot T_s \quad (2.30)$$

$$I_y(k) = I_y(k-1) + y_e(k) \cdot T_s \quad (2.31)$$

Genom inverskinematik av modellen, (2.26), kan sedan gräsklipparens vinkelförändring $\Delta\Omega(k)$ och translation $\Delta S(k)$ beräknas utifrån önskad förändring i position:

$$\Delta\Omega(k) = \sin^{-1} \left(\frac{\Delta x(k) \sin(\gamma(k-1)) - \Delta y(k) \cos(\gamma(k-1))}{D} \right) \quad (2.32)$$

$$\Delta S(k) = D \cos \Delta\Omega(k) - D + \Delta x(k) \cos(\gamma(k-1)) + \Delta y(k) \sin(\gamma(k-1)) \quad (2.33)$$

Gräsklipparens önskade positionsförändring $\Delta S(k)$ och vinkelförändring $\Delta\Omega(k)$ används till att beräkna hjulens önskade rotationsförändringar, $\Delta\Theta_1(k)$ och $\Delta\Theta_2(k)$, enligt:

$$\begin{bmatrix} \Delta\Theta_1(k) \\ \Delta\Theta_2(k) \end{bmatrix} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} \Delta S(k) + L\Delta\Omega(k) \\ \Delta S(k) - L\Delta\Omega(k) \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

De önskade rotationsförändringarna summeras och skickas därefter in till motorerna på gräsklipparen. Slutligen behöver även robotens odometri uppdateras vilket sker genom att mäta hur mycket hjulen har roterat enligt

$$\begin{bmatrix} \Delta s(k) \\ \Delta \gamma(k) \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} \frac{\Delta \theta_1(k) + \Delta \theta_2(k)}{2} \\ \frac{\Delta \theta_1(k) - \Delta \theta_2(k)}{2L} \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

där $\Delta s(k)$ är robotens positionsförändring och $\Delta \gamma(k)$ är robotens vinkelförändring. $\Delta \theta_1(k)$ och $\Delta \theta_2(k)$ beskriver hjulens rotationsförändringar och ges av sambandet

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta_1(k) \\ \Delta \theta_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_1(k) - \theta_1(k-1) \\ \theta_2(k) - \theta_2(k-1) \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

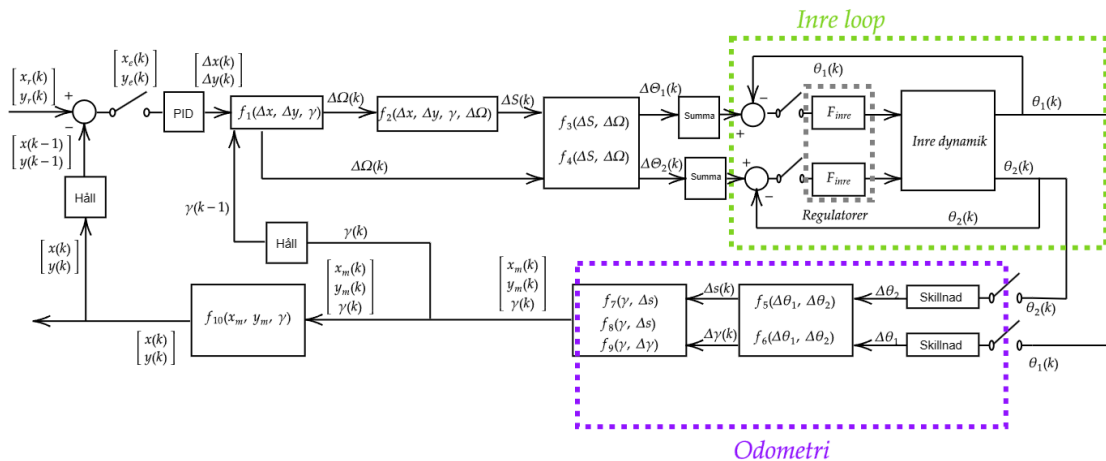
där $\theta_1(k)$ och $\theta_2(k)$ är hjulens uppmätta vinkelförändring vid nuvarande sampling och $\theta_1(k-1)$, $\theta_2(k-1)$ är hjulens uppmätta vinkelförändring vid föregående sampling. Robotens nya position och riktning utifrån odometrin beräknas enligt

$$\begin{bmatrix} x_m(k) \\ y_m(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_m(k-1) \\ y_m(k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\gamma(k-1)) \\ \sin(\gamma(k-1)) \end{bmatrix} \Delta s(k) \quad (2.37)$$

samt

$$\gamma(k) = \gamma(k-1) + \Delta \gamma(k) \quad (2.38)$$

På blockschemaform representeras det återkopplade systemet enligt figur 2.6 med skillnaden att den inre loopen, som i [37] beskriver motorernas inre dynamik, inte har modellerats. Anledningen varför den inre loopen inte har modellerats är för att det på gräsklipparen inte är möjligt att påverka det inre systemets dynamik, då den inre styrningen redan finns implementerad i HRP2-plattformen som tillhandahållits. Funktionerna som visas i de olika blocken i figur 2.6 är enbart provisoriska för att visa på vilka variabler som blocken behandlar. Tanken med detta är att figuren ska bli enklare att tolka.



Figur 2.6: Modellen representerad på blockschemaform. Den inre loopen beskriver motorernas inre dynamik på gräsklipparen, som inte gick att påverka. Återskapad med inspiration från [37].

2.2.1.2 Simulering

Den framtagna modellen för robotens kinematik implementerades som programmeringskod i Python, med modifikationen att den inre loopen ersattes av ett första ordningens system med en tidskonstant T . Anledningen till det var att den inre loopen redan fanns implementerad i HRP2-plattformen på den fysiska gräsklipparen. Relationen mellan hjulens rotationshastigheter $\dot{\theta}_i$ och referensrotationshastigheter $\dot{\theta}_{i,r}$, där $i=1,2$, beskrevs då enligt

$$\dot{\theta}_i(k) = \frac{T_s}{T_s + T} \cdot \dot{\theta}_{i,r}(k) + \frac{T}{T_s + T} \cdot \dot{\theta}_i(k-1) + w_i \quad (2.39)$$

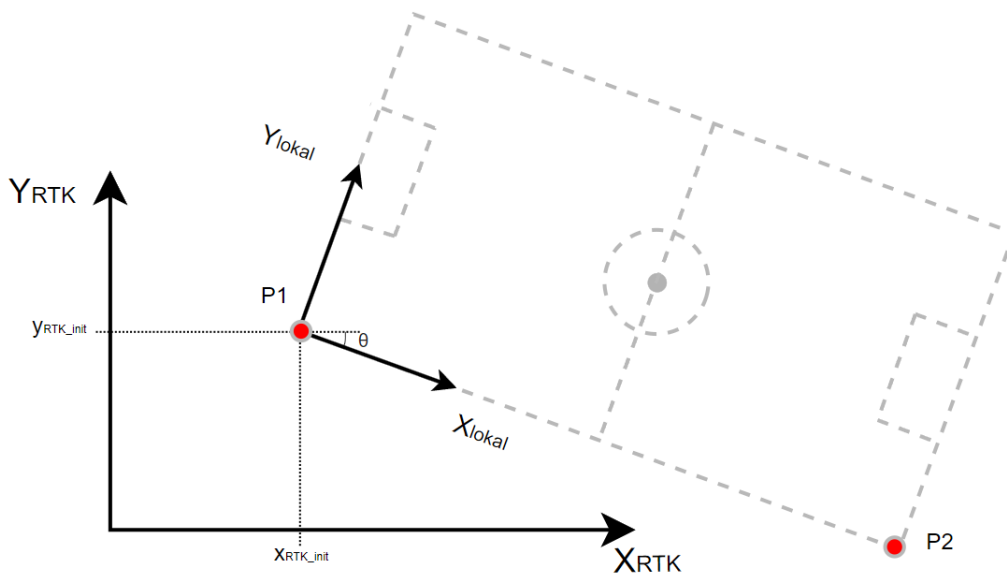
där T_s är samplingstiden och w_i är det pålagda sensorbruset. Samplingstiden T_s valdes till 100 millisekunder med motiveringen att det är den uppdateringsfrekvens som gräsklipparen har.

Genom att representera det inre systemet som ett första ordningens system med en tidskonstant, samt addera brus på de mätningar av hjulens rotationshastigheter som roboten i verkligheten använder sig av för navigering via odometri, skapades därmed en mer representativ simuleringsmodell av den aktuella gräsklipparen.

2.2.2 Koordinatsystem

För att skicka målpunkter till gräsklipparen krävdes ett koordinatsystem. För att kunna använda RTK-positioneringen tillsammans med odometri-positioneringen var första steget att få informationen presenterad i samma koordinatsystem. Positioneringsdatan från RTK-stationen presenterades som avståndet i norr respektive öst

relativt referensstationen till gräsklipparens position. Därav ansågs det lämpligt att placera ett globalt koordinatsystem med origo på referensstationens position där y-axeln representerade nordlig riktning och x-axeln östlig riktning. Vidare initierades ett lokalt koordinatsystem med origo i ett hörn på fotbollsplanen enligt figur 2.7, där ena långsidan representerade x-axeln och ena kortsidan representerade y-axeln. Gräsklipparens startposition tillika origo valdes till detta hörn och därmed utgick odometrin från den punkten. Anledningen var att det blev mer intuitivt att förstå hur de angivna målpunkterna förhöll sig till planen i verkligheten, och att styra gräsklipparen längs med axlarnas riktning blev enklare.



Figur 2.7: Förhållande mellan lokalt och globalt koordinatsystem.

För att få de globala RTK-positionerna omvandlade till positioner i det lokala koordinatsystemet krävdes en koordinattransformations. Transformationen genomfördes för varje nytt värde som mottogs från RTK-stationen, och bestod av en translations- och en rotationsdel. Först genomfördes en translation av koordinaterna enligt

$$x_{translaterad} = x_{RTK} - x_{RTK_init} \quad (2.40)$$

$$y_{translaterad} = y_{RTK} - y_{RTK_init} \quad (2.41)$$

där $(x_{RTK_init}, y_{RTK_init})$ är den punkt som valdes till origo i det lokala koordinatsystemet på fotbollsplanen enligt figur 2.7. x_{RTK} och y_{RTK} beskriver den aktuella positionen hos gräsklipparen. $x_{translaterad}$ och $y_{translaterad}$ är de translaterade RTK-koordinaterna som används för att rotera koordinatsystemet. Rotation kring z-axeln från det globala till det lokala koordinatsystemet i två dimensioner bestäms av

$$\begin{bmatrix} x_{lokal} \\ y_{lokal} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{translaterad} \\ y_{translaterad} \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

där θ är vinkeln mellan x-axlarna i de två olika koordinatsystemen, vilket visualiserar i figur 2.7.

Då gräsklipparens IMU inte angav en vinkel relativt norr, krävdes en kalibrering för att få fram vinkeln θ . Det gjordes genom att först ställa gräsklipparen i samma hörn som valdes till origo i det lokala koordinatsystemet. Därefter lyftes gräsklipparen till valfri punkt längs med den positiva x-axeln i det lokala koordinatsystemet. På båda dessa positioner hämtades minst fem datapunkter med positionering från RTK-stationen. Medelvärden av de fem datapunkterna räknades ut för respektive position och namngavs $P1$ och $P2$ enligt figur 2.7. Lutningen på linjen mellan $P1$ och $P2$, k_1 , bestämdes med räta linjens ekvation enligt:

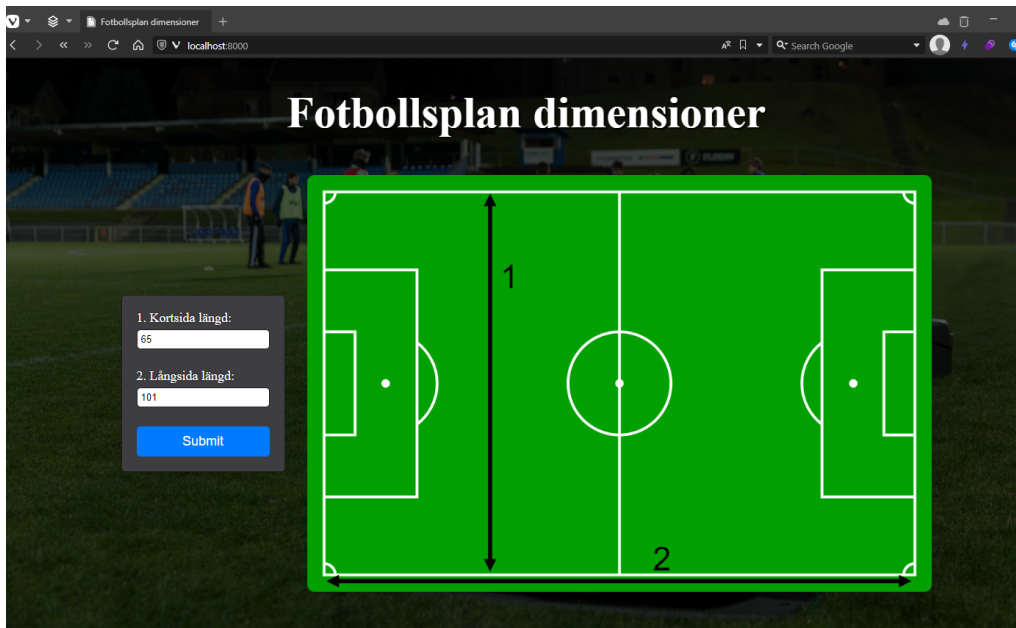
$$k_1 = \frac{y_{P2} - y_{P1}}{x_{P2} - x_{P1}} \quad (2.43)$$

$$\theta = \arctan \left(\frac{k_2 - k_1}{k_1 \cdot k_2 + 1} \right) \quad (2.44)$$

θ , vinkeln mellan de två koordinatsystemen, kunde då bestämmas utifrån den inhämtade kalibreringsdatan. k_2 representerade lutningen på den globala x-axeln och k_1 var lutningen på den lokala x-axeln, båda i relation till det globala koordinatsystemet vilket innebar att k_2 alltid var lika med noll. Ytterligare åtgärder genomfördes i programkoden för att undvika singulariteter, samt för att säkerhetsställa att rätt vinkel erhöles då flera vinklar är möjliga mellan två linjer.

2.2.3 Ruttplanering

En lokal, HyperText Markup Language (HTML), hemsida utvecklades för att skapa ett användarvänligt gränssnitt, där användaren kunde ange dimensionerna av fotbollsplanens längd och bredd. Genom hemsidan kunde användaren skriva in längden och bredden på planen, se figur 2.8, som sedan skrevs över till en JSON-fil. Resterande dimensioner på fotbollsplanen är konstanta och togs därmed inte med i användargränssnittet.



Figur 2.8: Hemsida där användaren kan skriva in dimensionerna på en fotbollsplan.

Från JSON-filen hämtades all data om fotbollsplanens dimensioner och användes som indata till ruttplaneringsalgoritmen. Ruttplaneringsalgoritmen skapades genom att kombinera olika sekvenser av rutter som beskrev robotens rörelse över fotbollsplanen. Dessa rutter var exempelvis sidlinjerna, mållinjerna, mittlinjen, mittcirkeln och så vidare. Vidare delades dessa delsträckor upp i en lista med referenspunkter. Val av antal referenspunkter per meter var en iterativ process där intensiteten med punkter varierades tills att ett resultat, som låg inom ramarna för de uppsatta målen, erhöles.

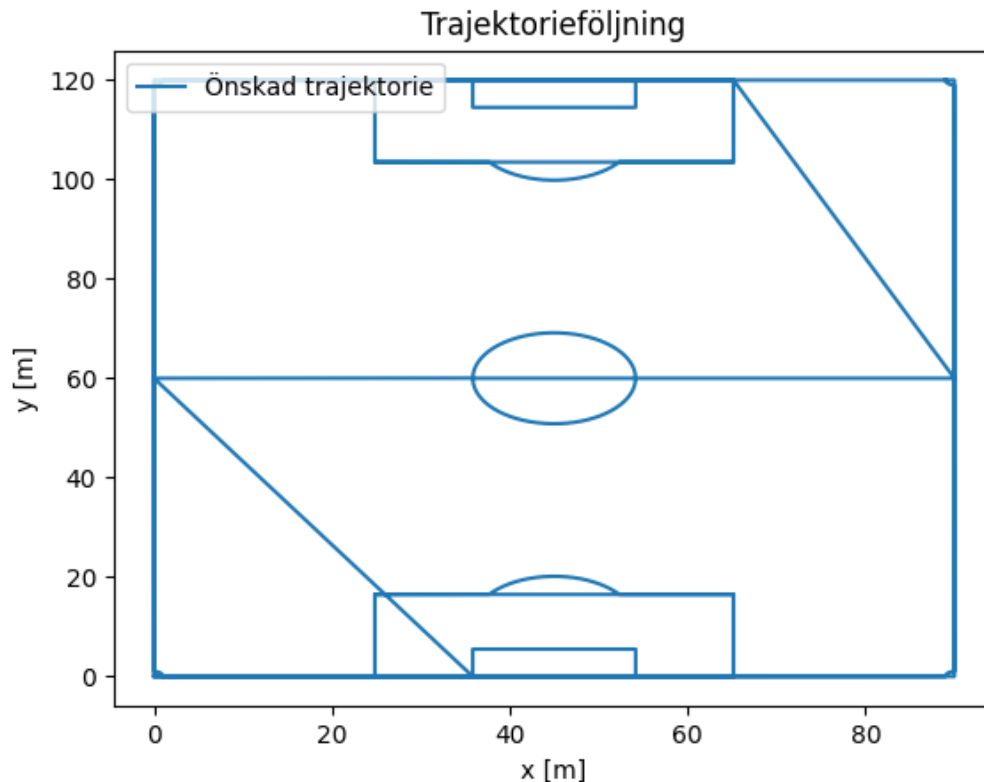
Beroende på i vilken riktning som gräsklipparen åkte, uppdaterades referenspunkten till nästa punkt i listan när gräsklipparen hade kommit inom 30 centimeter från nästa punkt. Vid körning i raka linjer längs med axlarna innebar det att gräsklipparen skulle vara 30 cm från den koordinat hos punkten som var i färdriktningen. Vid körning i cirklar uppdaterades nästa punkt i listan när det totala felet i både x och y var mindre än 30 centimeter enligt

$$\sqrt{(x_r - x)^2 + (y_r - y)^2} < 0,3 \quad (2.45)$$

där x_r och y_r var referenspunktens koordinater. Anledningen till varför inte referenspunkten uppdaterades när gräsklipparen kommit fram till punkten var för att inte gräsklipparen skulle mäta att den åkt förbi en punkt och därmed börja backa innan nästa mätning. Detta för att åstadkomma en mer stabil, och mindre ryckig körning.

I ruttplaneringen bestämdes att gräsklipparen först skulle måla de yttre linjerna, följt av det nedre straffområdet och därefter det nedre målområdet. Från det nedre

målområdet upp till mittlinjens vänstra ändpunkt lades en transportsträcka till för att minska körsträckan för gräsklipparen mellan punkter där linjemålning inte ägde rum. Efter transportsträckan målade gräsklipparen mittlinjen och mittcirkeln, för att därefter åka ännu en transportsträcka upp till det övre straffområdet. Följt av det målades det övre straffområdet, det övre målområdet och slutligen hörnramarna. Den sammansatta rutten visas i figur 2.9 nedan.

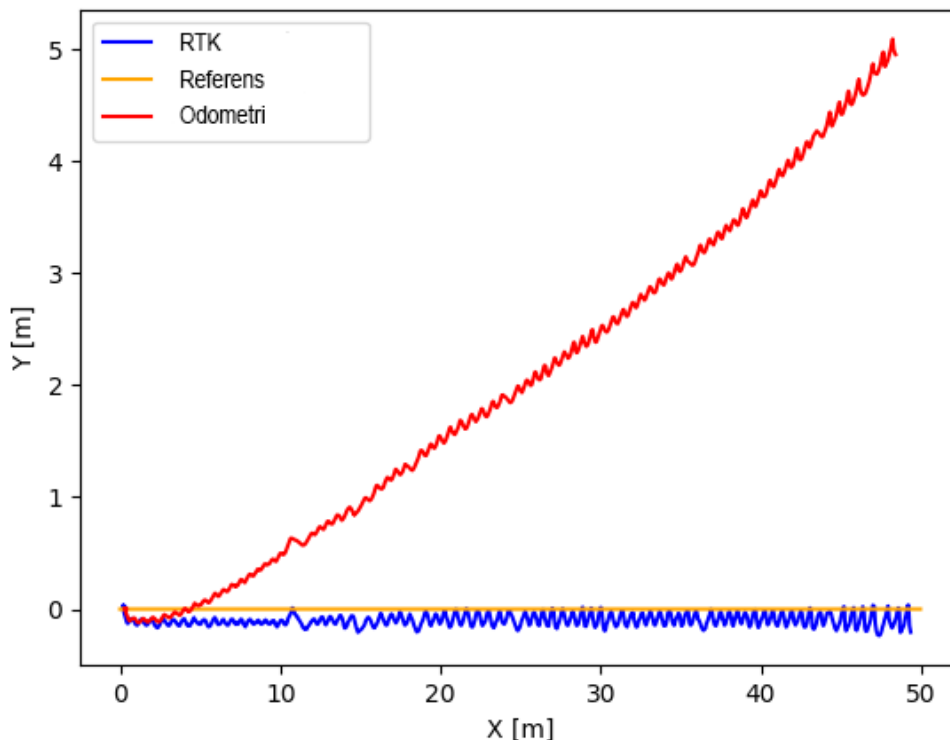


Figur 2.9: Fullständig rutt för att måla samtliga linjer. De diagonala linjerna representerar transportsträckor där gräsklipparen inte målar.

2.2.4 Tillståndsestimering

För att kunna följa raka linjer och cirklar på en fotbollsplan var det viktigt att göra en korrekt estimering av gräsklipparens position och riktning. Gräsklipparens faktiska position, och riktning, var inte känd utan kunde endast uppskattas med hjälp av tillgängliga sensorer. Till en början gjordes estimeringar av robotens position, och riktning, enbart baserat på odometrin. Odometrin baserades på vinkelförändringarna från två inkrementella pulsgivare i vardera drivande hjul på gräsklipparen. Dessa pulsgivare gav en mätning av hur mycket vardera hjul hade roterat sedan den senaste mätningen, vilket kunde användas för att estimeras gräsklipparens linjära hastighet, v , samt girhastighet, ω , enligt (2.18).

Precisionen av gräsklipparens sensorer testades genom att låta gräsklipparen följa en rak linje på 50 meter enligt figur 2.10.



Figur 2.10: Testning av körning efter en 50m rak referenslinje. I figur ses position baserat på RTK jämfört med odometri, samt referens.

Figur 2.10 visar att odometrin ger bra precision på estimeringar av gräsklipparens position under korta sträckor men börjar avvika över tid. GPS-mätningar av gräsklipparens position ger till skillnad från odometrin stabilare resultat av positionen över tid men erbjuder sämre precision längs korta sträckor trots att GPS-datan kommer från en närvarande RTK-station som ger bättre precision än direkt GPS-data. En annan nackdel är att GPS-datan inte uppdateras med lika hög uppdateringsfrekvens som odometrin, samt inte ger riktning.

För att nå den önskade precisionen vid kritning av linjer kombinerades därför odometri-mätningarna med GPS-mätningar från RTK-stationen via ett Extended Kalmanfilter. Detta för att erhålla hög precision av mätningar för både korta och långa sträckor. Här valdes även att skala ner den beräknade hastigheten av gräsklipparen för att reducera påverkan av RTK-stationens lägre uppdateringsfrekvens eftersom gräsklipparen annars vid vissa tillfällen började backa då RTK-mätningarna inte hunnit uppdateras.

2.2.4.1 Extended Kalmanfilter

Eftersom kinematiken för gräsklipparen beskrevs med hjälp av en olinjär modell användes ett Extended Kalmanfilter i arbetet, men kommer för enkelhetens skull refereras till ett Kalmanfilter i fortsättningen. Tillståndet för gräsklipparen definierades som positionen i x- och y-led samt girvinkeln γ . Det första steget var att initiera tillståndet enligt

$$x_0 = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ \gamma_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

Nästa steg blev att prediktera tillståndet enligt

$$\hat{x}_k = f(X_{k-1}, u_{k-1}) + \xi_{k-1} \quad (2.47)$$

$$= \begin{bmatrix} x_{k-1} \\ y_{k-1} \\ \gamma_{k-1} \end{bmatrix} + T_s \begin{bmatrix} \cos \gamma_{k-1} & 0 \\ \sin \gamma_{k-1} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{k-1} \\ \omega_{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \xi_{1,k-1} \\ \xi_{2,k-1} \\ \xi_{3,k-1} \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

Styrsignalerna till gräsklipparen bestod av den linjära hastigheten, v , och girhastigheten, ω , enligt (2.18). Kovariansmatrisen predikterades enligt

$$\hat{P}_K = FP_{k-1}F^T + Q \quad (2.49)$$

där:

$$P_0 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix} \quad F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Kovariansmatrisen av processbruset Q sattes till enhetsmatrisen fram tills dess att tester gjorts för att justera och ställa in Kalmanfiltret för denna applikation.

Mätningen av tillståndet resulterade i

$$z = h(x_k) + w_k = Hx_k + w_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ \gamma_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_{x,k} \\ w_{y,k} \\ w_{\gamma,k} \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

där vektorn x_k var mätvärden av positionen från RTK-datan samt girvinkeln som estimerats från odometridatan. RTK-datan innehöll även felmarginalen på mätningarna vilket användes till vektorn w_k .

Slutligen korrigerades tillståndet, där Kalmanförstärkningen som skulle appliceras beräknades enligt

$$K_k = \hat{P}_k H^T (H \hat{P}_k H^T + R)^{-1} \quad (2.51)$$

där

$$H_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Matrisen R sattes initialt som enhetsmatrisen men justerades senare efter behov. Sedan lades förstärkningen K_k på som beräknats enligt (2.51) med z som innehöll det uppmätta tillståndet enligt:

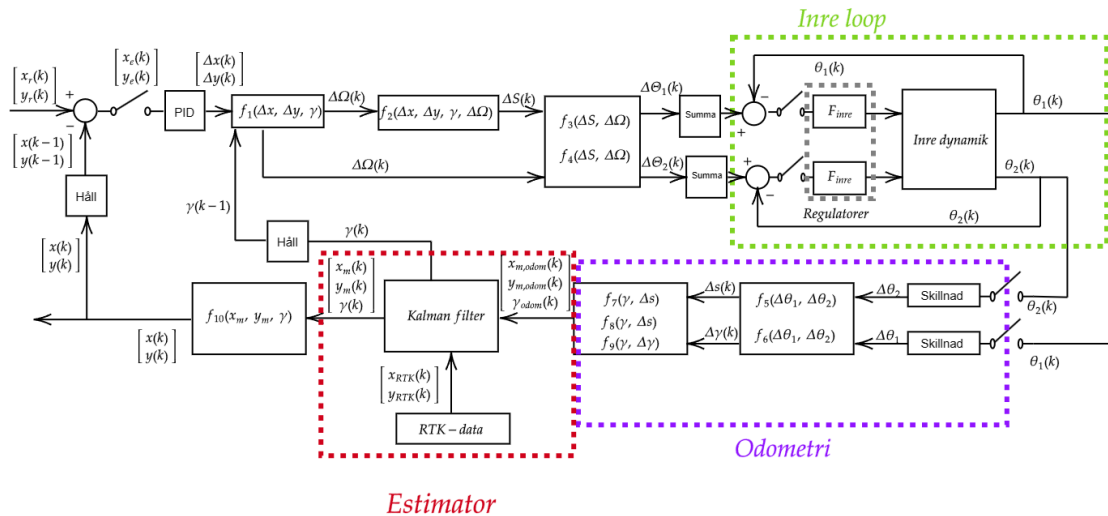
$$x_k = \hat{x}_k + K_k(z - H\hat{x}_k) \quad (2.52)$$

Till sist uppdaterades kovariansmatrisen inför nästa tidssteg med de tidigare beräknade värdena

$$P_k = (I - KH)\hat{P}_K(I - KH)^T + KRK^T \quad (2.53)$$

2.2.5 Förändring av regleringsmodell

Genom integration av tillståndsestimeringen förändrades den ursprungliga regleringsmodellen, figur 2.6, till att se ut enligt figur 2.11.



Figur 2.11: Ny regleringsmodell med tillståndsestimering. Återskapad med inspiration från [37].

Additionen av tillståndsestimeringen gjorde att regleringsmodellen gick från att enbart baseras på gräsklipparens odometri till att baseras på en kombination av odometri- och RTK-mätningar.

2.2.6 Implementering

För styrning av den verkliga gräsklipparen implementerades metodiken, som förklarades i avsnitt 2.2, på gräsklipparen. Det gjordes genom att upprätta en extern kommunikation mellan Raspberry Pi:n och en värddator, varefter gräsklipparens inre kommunikation upprättades. Samtliga delar översattes även till programmeringskod, vilket resulterade i ett fullständigt styrsystem för gräsklipparen.

2.2.6.1 Mikrodator

Den mikrodator som användes för styrningen av gräsklipparen var en Raspberry Pi 4 som fanns tillgänglig från föregående års kandidatarbete [12].

Eftersom HRP2- och ROS2-nätverket användes till arbetet för att styra gräsklipparen, behövdes den kod som utvecklades vara skriven för samma ROS2-utgåva vilket var ROS2-Galactic [10]. Raspberry Pi:n förbereddes enligt de interna dokumenten [10], [38] och [39] försedda av Husqvarna för att göra Raspberry Pi:n kompatibel med gräsklipparen.

2.2.6.2 Styrning

För att kunna reglera gräsklipparen behövde även den framtagna modellen, se 2.2.1.1, anpassas genom att konvertera hjulens rotationshastigheter till signaler som hanterade styrningen av gräsklipparen. Anpassningen var nödvändig då det på gräsklipparen inte var möjligt att reglera vinkelhastigheterna på de två hjulen separat, utan styrningen baserades på två signaler som bestämde gräsklipparens linjära hastighet och girvinkelförändring. Styrkan på signalerna varierade mellan $[-1, 1]$ för hastigheten och $[-2, 2]$ för girvinkelförändringen och gick att variera för att åstadkomma önskad styrning. Från en början var inte sambandet mellan de två signalerna och hjulens linjärhastigheter, $v_{höger}$, $v_{vänster}$, känt och därför gjordes olika tester med varierande styrka på de två signalerna.

Från mätningarna upptäcktes att då styrsignalen var lika med ett stod det vänstra hjulet stilla. Det upptäcktes även att då styrningen antog sitt maximala värde på två roterade gräsklipparen på plats. Det ledde till följande samband:

$$v_{vänster} = v_{höger} \cdot (1 - \text{Styrsignal}) \quad (2.54)$$

Genom att isolera styrsignalen från (2.54) erhöles följande samband:

$$\text{Styrsignal} = \frac{v_{höger} - v_{vänster}}{v_{höger}} \quad (2.55)$$

Sambandet visas tillsammans med hjulens linjära hastigheter och styrsignalerna i tabell 2.2.

Tabell 2.2: Sammanställning av mätdata från tester för olika insignaler. Till höger i tabellen är sambandet som hittades.

Test	Hastighet	Styrsignal	$v_{höger}$	$v_{vänster}$	$\frac{v_{höger} - v_{vänster}}{v_{höger}}$
1	-0.2	0.2	-0.11	-0.07	0.358
2	1	0	0.65	0.65	0
3	0.5	0	0.32	0.32	0
4	0.1	0.5	0.075	0.036	0.52
5	1	2	0.23	-0.22	1.96
6	1	1	0.42	0	1

Det upptäcktes vid testning att den funna relationen, mellan styrsignalen och hjulens vinkelhastigheter, gjorde att gräsklipparen reagerade kraftigt på små positionsförändringar. För att göra körningen mindre ryckig valdes därför att skala om styrningen till att baseras på en procentuell skillnad mellan hjulens vinkelhastigheter. Styrsignalen kunde då beräknas enligt:

$$\text{Styrsignal} = \frac{v_{höger}}{v_{höger} + v_{vänster}} - \frac{v_{vänster}}{v_{höger} + v_{vänster}} \quad (2.56)$$

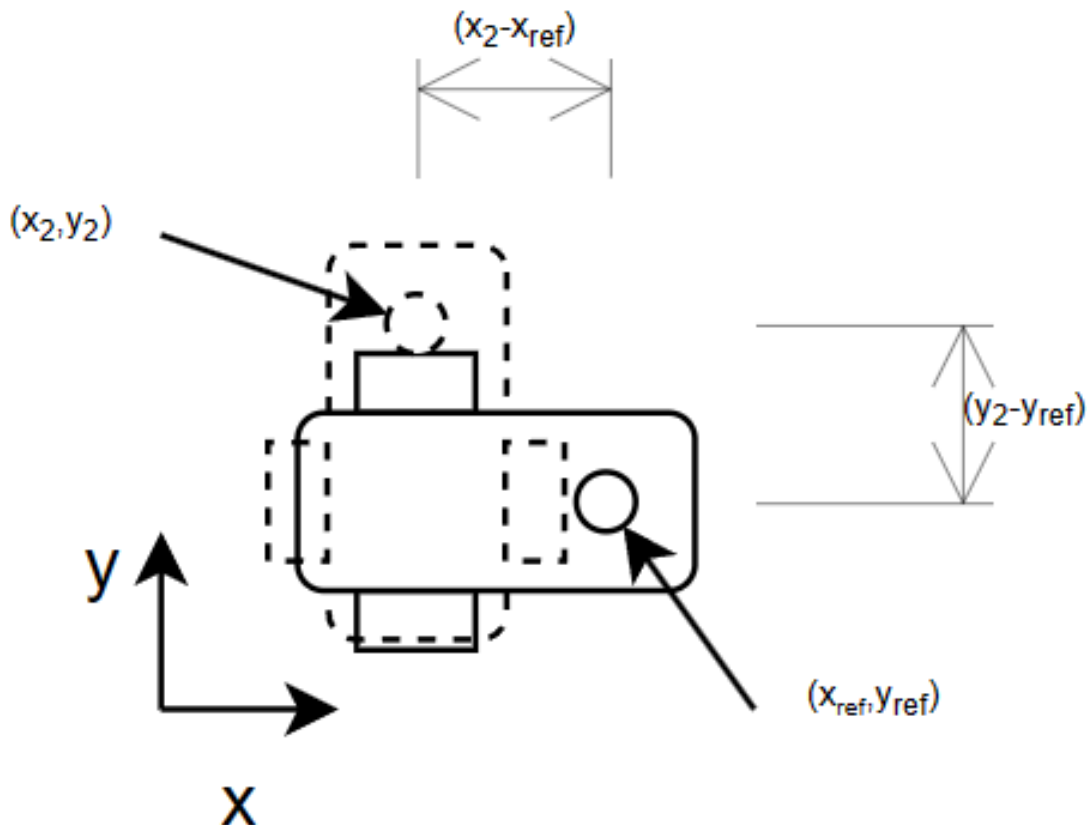
2.2.6.3 Tillägg till ruttplanering

Vid testning av rutten upptäcktes att gräsklipparen hade problem med att köra väldigt skarpa kurvor och för att lösa det problemet implementerades rotation på plats. När gräsklipparen anlät till en ändpunkt av fotbollsplanen roterade den 90 grader innan den körde vidare för att undvika stora svängar och därmed minska avvikelserna från rutten. Ändpunkterna definierades som de punkter där gräsklipparen bytte riktning, vilket bestod av samtliga hörnpunkter på fotbollsplanens linjer. Det upptäcktes även att det kunde uppstå problem med att gräsklipparens position blev förskjuten i relation till rutten. Anledningen till det var att RTK-mottagaren på gräsklipparen var placerad en bit framför hjulaxeln, enligt figur 2.12.



Figur 2.12: RTK-mottagarens position relativt hjulaxeln.

Förskjutningen gjorde att gräsklipparens position efter rotering inte stämde helt överens med den förväntade positionen, vilket förklaras i figur 2.13.



Figur 2.13: RTK-mottagarens position efter rotering.

För att därmed få gräsklipparen att starta i rätt position, valdes att förskjuta RTK-mätningarna till hjulaxeln via relationen

$$x_{RTK,bas} = x_{RTK} + 0,2 \cdot \cos(\gamma) \quad (2.57)$$

$$y_{RTK,bas} = y_{RTK} + 0,2 \cdot \sin(\gamma) \quad (2.58)$$

där 0,2 meter var avståndet från RTK-mätaren till hjulaxeln. Additionen i (2.57) och (2.58) kommer från att girvinkeln γ definieras som π radianer vid körning i positivt x-led enligt den modell som presenterades i avsnitt 2.2.1.1.

2.2.6.4 Implementering av koordinatsystem

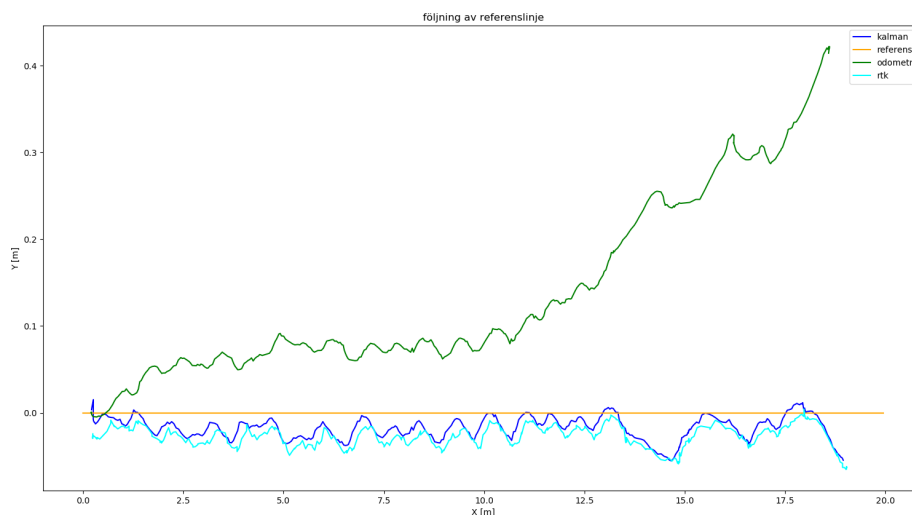
Hela kalibreringsprocessen av vinkeln θ automatiserades med en ROS-nod och programmeringskod. Vid varje start av gräsklipparen gavs möjligheten att använda ett gammalt sparad koordinatsystem eller att initiera ett nytt. Denna funktion gav en hög flexibilitet under testningsprocessen då kalibrering inte krävdes inför varje ny start, utan endast vid testning på en ny plats. En ny ROS-nod, Coord Node som prenumererade på RTK-positioner skapades för att möjliggöra en initiering av ett nytt koordinatsystem. Noden användes till att samla in datapunkter till $P1$ respektive $P2$, enligt figur 2.7. Därefter startade noden en programfil som räknade ut offset-vinkeln θ utifrån de två punkterna som sedan kunde användas i den övriga programkoden.

2.2.6.5 Justering av Kalmanfiltret

För att få den önskade precisionen av tillståndsestimeringen sattes R - och Q matriserna enligt:

$$R = \begin{bmatrix} 0.9 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9 & 0 \\ 0 & 0 & 0.9 \end{bmatrix} \quad Q = \begin{bmatrix} 0.05 & 0 & 0 \\ 0 & 0.05 & 0 \\ 0 & 0 & 0.05 \end{bmatrix} \quad (2.59)$$

Värdena testades fram genom att köra gräsklipparen rakt 30 meter längs en referenslinje och jämföra resultaten genom att plotta RTK-mätningarna, odometri-mätningarna och sedan Kalmanestimeringen. Eftersom RTK-mätningarna hade hög precision över tid var det önskat att Kalmanestimeringen följde de mätningarna i huvudsak. Sedan kombinerades det med odometrins precision på korta avstånd och höga uppdateringsfrekvens. Efter justeringarna resulterade tillståndsestimeringen enligt figur 2.14.



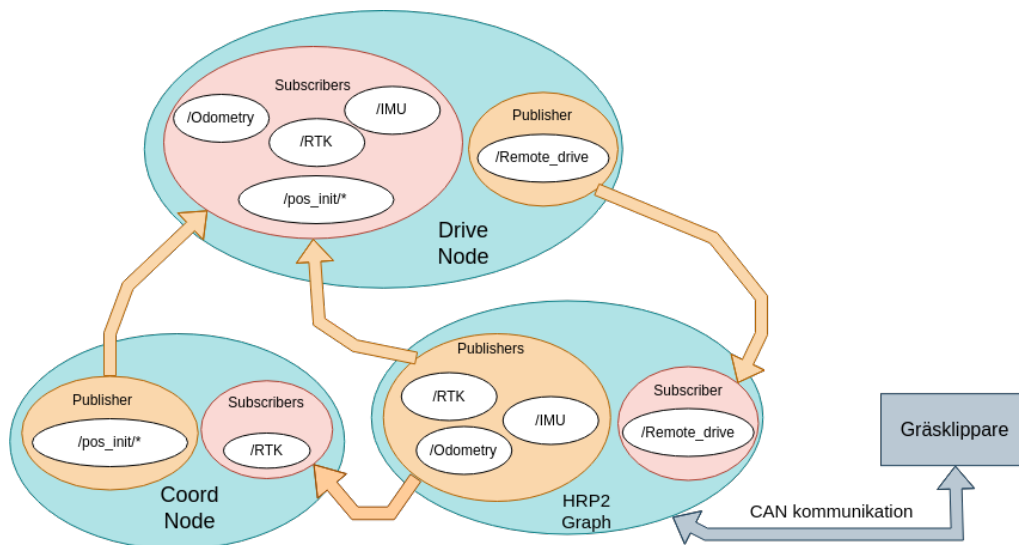
Figur 2.14: Inställt Kalmanfilter.

2.2.6.6 Justering av regulatorparametrar

På liknande sätt som vid justeringen av Kalmanfiltret, var justeringen av regulatorparametrarna, K_p , K_i , K_d , en iterativ process där samma sträcka kördes med varierande värden på parametrarna tills dess att önskat resultat hade erhållits. Resultatet från körningarna jämfördes där fokus låg på att jämföra avvikelser från en referenslinje.

2.2.6.7 Kommunikation

Kommunikationen i systemet baseras på ett ROS-nätverk som kommunicerar med gräsklipparen via CAN, enligt figur 2.15.



Figur 2.15: Gräsklipparens interna kommunikation med de ROS-noder som kommunikationen består av.

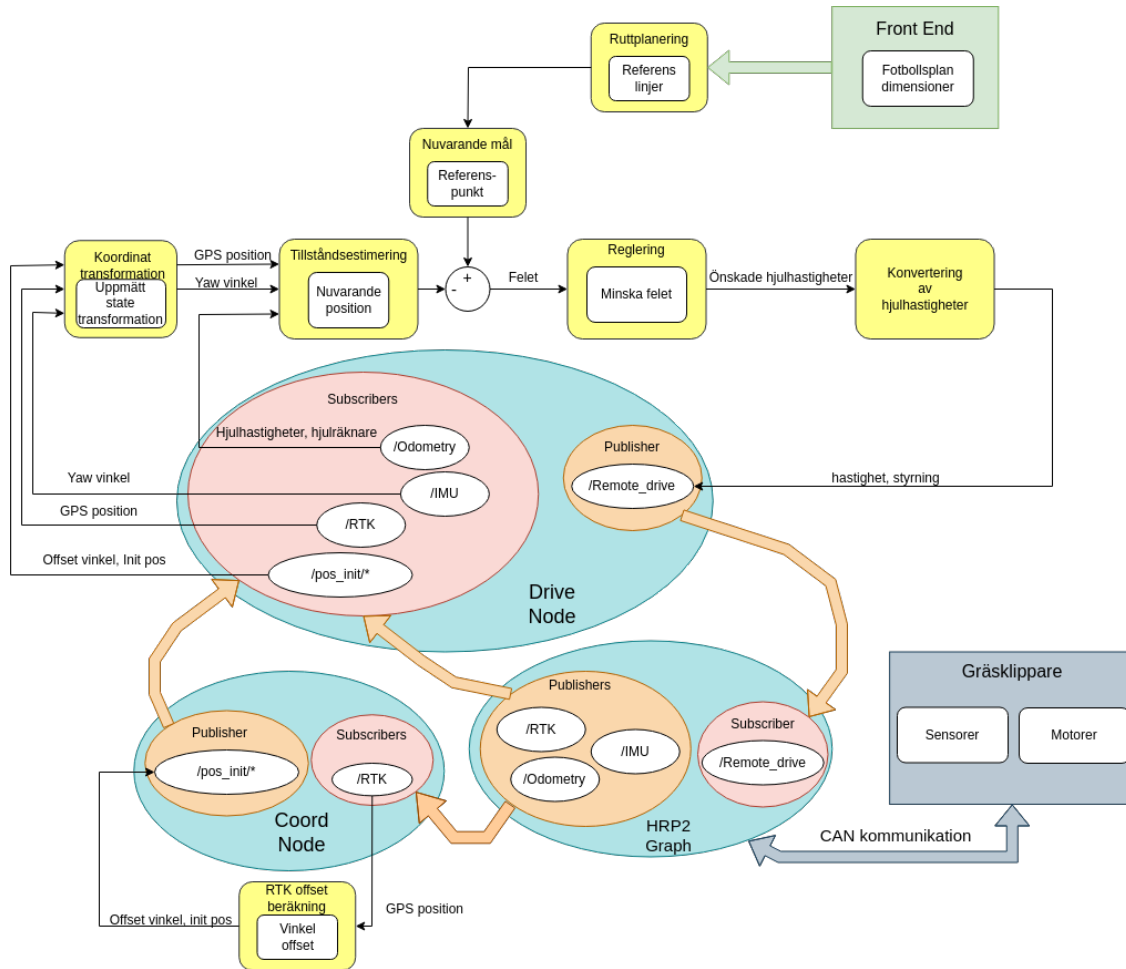
HRP2-grafen är den del av ROS-nätverket som har försetts av Husqvarna. Grafen tar in sensordata från gräsklipparen via CAN, som den sedan publicerar på ROS-nätverket. HRP2-nätverket har byggts ut med flertalet ROS-noder som skrivits i arbetet, vilka står för styrningen av gräsklipparen. Styrning av gräsklipparen kräver många delsystem med funktioner och delades därför upp i mindre system som körs på egna ROS-noder, vilket medför modularitet i ett stort system.

Drive noden sköter styrningen av gräsklipparen genom att utföra en tillstånds estimering, reglera, och utföra konverteringar. Sedan publicerar drive noden de beräknade styrsignalerna på ett `/remote_drive` topic som HRP2-noden lyssnar på.

Coord noden sköter initiering av gräsklipparens positioneringssystem. Det görs genom att jämföra gräsklipparens lokala koordinatsystem och RTK-stationens koordinatsystem, där förhållandet mellan dem kan användas för att transformera RTK-koordinater till lokala koordinater. Fördelen med att utföra transformationen i en egen ROS-nod var att noden kunde stängas ner när processen var klar.

2.2.6.8 Fullständigt system

De tidigare nämnda delsystemen, under avsnitt 2.2, kombinerades till det fullständiga styrsystemet för gräsklipparen enligt figur 2.16.

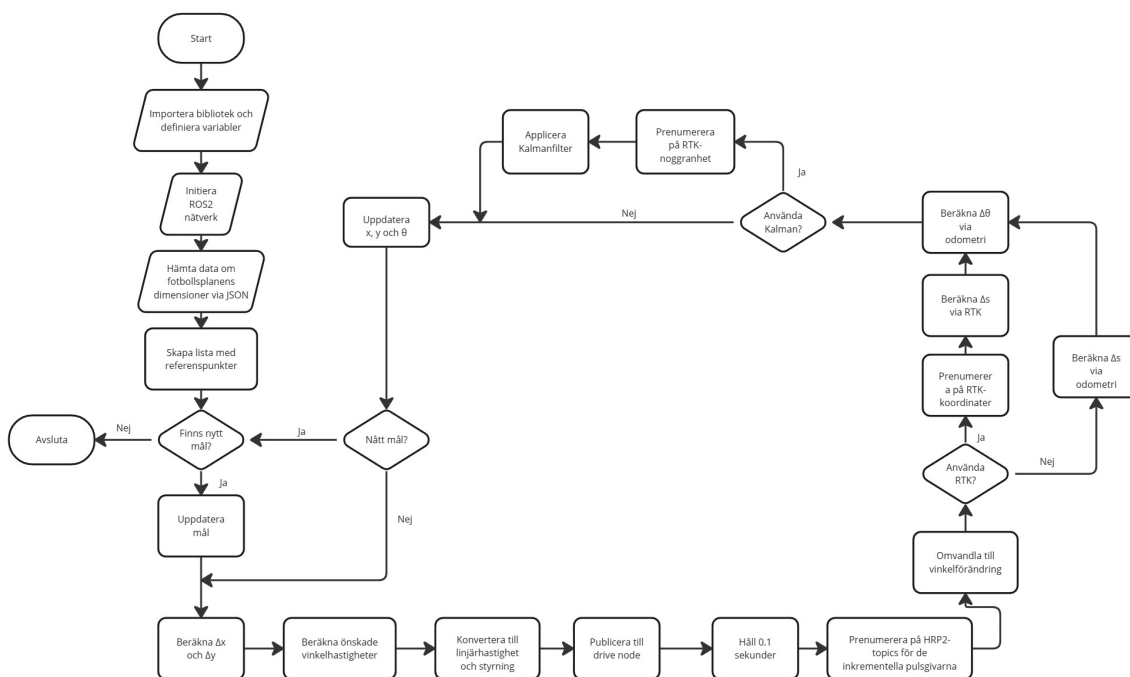


Figur 2.16: Fullständigt styrsystem.

Det fullständiga systemet visar hur alla delsystem är kopplade till varandra, vilka signaler de beror på och i vilken ordning de utför sina uppgifter. De individuella ROS2-noderna jobbar med olika uppgifter parallellt och skickar data mellan varandra.

2.2.6.9 Programmeringskod

Samtliga delområden som förklarats i tidigare avsnitt kombinerades via programmering till en fullständig Python-fil som hanterar styrningen av gräsklipparen. För att tydliggöra hur programmet fungerar från start till slut presenterades koden som pseudokod och går att finna i figur 2.17. Ett fullständigt GitHub repository som innehåller all programmeringskod går även att se i [40].



Figur 2.17: Pseudokod för det programmeringscript som styr gräsklipparen.

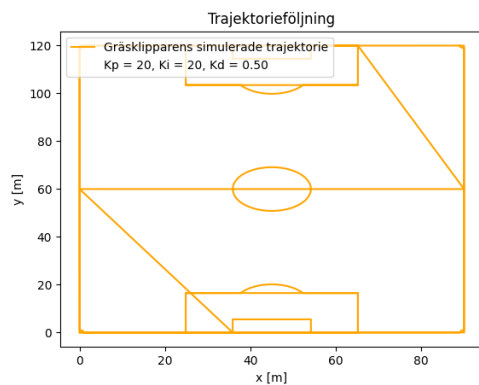
En övergripelig förklaring angående hur pseudokoden i figur 2.17 är tänkt att tolkas är att från det att programmeringskoden börjar kollar programmet om det finns ett nytt mål. Om målet existerar beräknas den inverterade kinematiken för gräsklipparen, vilken används till att bestämma hur hjulens vinkelhastigheter ska förändras för att nå det önskade målet. Vinkelhastigheterna konverteras därefter till styrsignal och linjärhastighet, vilka i sin tur publiceras till `/remote_drive`-topicet som styr gräsklipparens beteende. När styrsignalen och linjärhastigheten har publicerats, görs valet om RTK ska användas eller inte samt om Kalmanfiltret ska appliceras eller inte. Slutligen uppdateras gräsklipparens position varpå det kollas om gräsklipparen nått det önskade målet. I det fall då gräsklipparen inte har nått målet upprepas samma procedur som tidigare, annars kollar programmet om det finns ett nytt mål. Finns det ett nytt mål upprepas processen, men om det inte finns något nytt mål innebär det att gräsklipparen har nått det önskade målet och programmet avslutas. För att möjliggöra trådlös styrning av gräsklipparen laddades dessutom all programmeringskod upp på RPI:n.

2.3 Resultat Linjeföljning

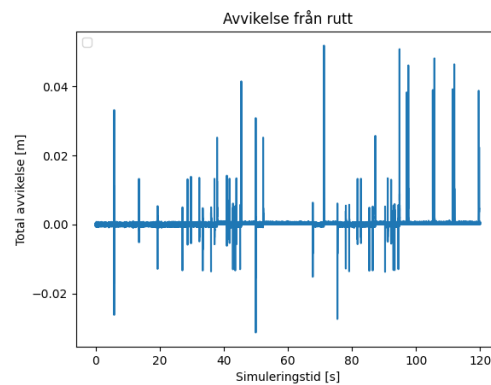
Resultaten för linjeföljning består av både simulerade och verkliga resultat. Vid simuleringen simulerades gräsklipparens körning över hela planen, medan resultaten för den verkliga körningen var på raka linjer, rektanglar och cirklar.

2.3.1 Simulering

Gräsklipparens förmåga att följa linjer simulerades genom att låta den följa samtliga linjer på en fotbollsplan enligt den rutt som presenterades i avsnitt 2.2.3. Storleken på sido- respektive mållinjerna valdes till 90x120 meter. För att göra simuleringarna mer verklighetstrogna användes även pålagt brus på sensorerna som mäter hjulens vinkelhastigheter. Magnituden på bruset varierade inom intervallet $[-0,03; 0,03]$ radianer och baserades på att de inkrementella pulsgivarna kan missa en puls samt att det finns lite extra bakomliggande brus. Tidskonstanten T för den inre loopen sattes till 400 millisekunder. Antalet referenspunkter som användes var 50 punkter per meter vid raka linjer och 140 punkter per meter längs med cirkelbågarna. Detta val av punkter gav det bästa resultatet efter upprepade tester och ansågs därmed lämpligt. Värdena på regulatorparametrarna som användes var $K_p = 20$, $K_i = 20$ och $K_d = 0,5$. Gräsklipparens simulerade körning tillsammans med avvikelser från ruten visas i figur 2.18 och figur 2.19.



Figur 2.18: Simulering av gräsklipparens följning av ruten över fotbollsplanen.



Figur 2.19: Total avvikelse mellan den önskade ruten och den simulerade ruten.

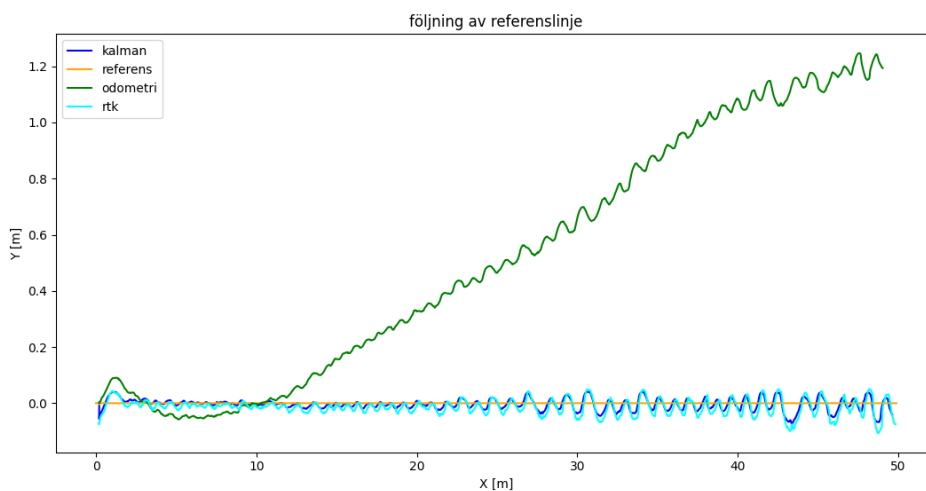
Resultatet från simuleringen visar att avvikelserna vid körning av raka linjer låg inom intervallet $[-0,033; 0,034]$ meter och för cirkelkörning var det totala felet inom intervallet $[0; 0,05]$ meter.

2.3.2 EPOS 550

Resultaten för den verkliga gräsklipparen framställdes genom att låta gräsklipparen följa raka linjer, köra efter en rektangel, samt köra i en cirkel.

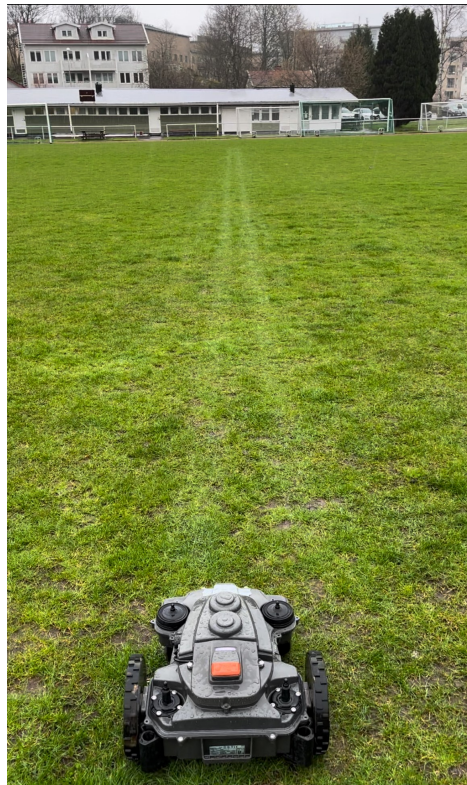
2.3.2.1 Raka linjer

Testet av körning efter en rak referenslinje med den verkliga gräsklipparen genomfördes genom att låta gräsklipparen köra en sträcka på 50 meter över mittlinjen på fotbollsplanen. I testet så var antalet referenspunkter 25 punkter per meter och körningen baserades på gräsklipparens position med Kalmanfiltret aktiverat. Regulatorparametrarna som användes var $K_p = 20$, $K_i = 20$, $K_d = 0,5$. Resultatet av körningen som visas i figur 2.20 var att den maximalt absoluta avvikelsen från ruten var 0,073 meter och slutpositionen var 0,1445 meter från den önskade positionen.



Figur 2.20: Testning av körning efter en 50m rak linje. I figur ses gräsklipparens position baserat på Kalmanfiltret tillsammans med odometri, RTK och referens.

Figur 2.21 visar gräsklipparen tillsammans med spåren på planen efter att den har kört 50 meter.



Figur 2.21: Spåren på planen efter att gräsklipparen har kört rakt över mittlinjen.

2.3.2.2 Rektangelkörning

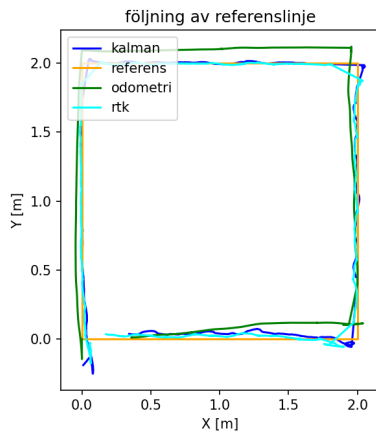
Gräsklipparens förmåga att kunna köra i en rektangel testades. Testet genomfördes på en rektangel med sidorna 2x2 meter och upprepades flera gånger där antalet referenspunkter varierades mellan varje körning. Regulatorparametrarna sattes till samma som vid test av linjeföljning, och Kalmanfiltret var vid tillfället då resultatet framställdes avaktiverat, men Kalmanestimeringen spelades upp i efterhand. Anledningen tas upp i diskussionsavsnittet. I tabell 2.3 syns antalet punkter, tid från mål till start och avvikelsen. Avvikelsen som anges är medelvärdet av den absoluta avvikelsen från referenslinjen under ett helt varv.

Tabell 2.3: Resultat av rektangelkörning.

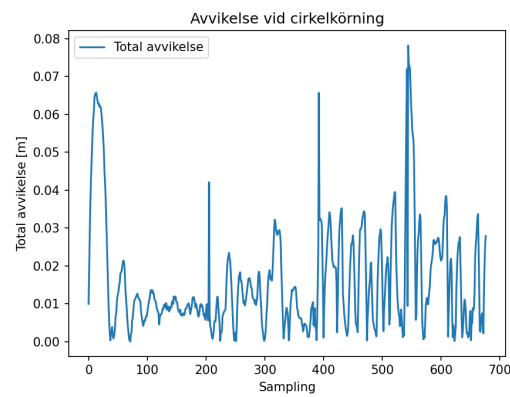
Antal [punkter/m]	Avvikelse [m]	Tid [min]
20	0,139	2:37
40	0,022	2:51
60	0,016	3:37
80	0,018	5:11

Resultatet av rektangelkörningen var att vid användning av 60 punkter per meter blev den absoluta medelavvikelsen 0,016 meter och slutpositionen hamnade 0,179 meter från önskad position, med en tid på 3 minuter och 37 sekunder. Figur 2.22 visar gräsklipparens rutt över rektangeln och figur 2.23 visar den absoluta avvikelsen från ruten.

2. Linjeföljning



Figur 2.22: Gräsklipparens rutt över rektangeln.



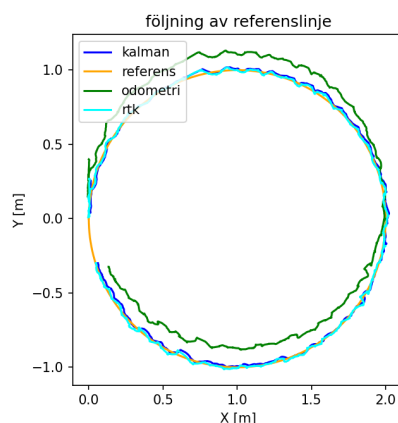
Figur 2.23: Absoluta avvikelsen från ruten vid varje sampling.

2.3.2.3 Cirkelkörning

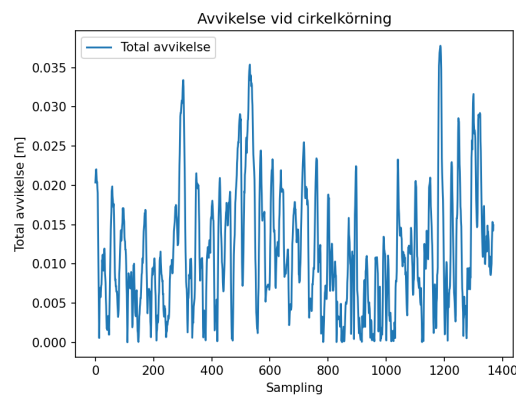
En ytterligare geometri som testades var cirkelkörning på gräs med Kalmanfiltret avaktiverat, men där Kalmanestimeringen även här spelades upp i efterhand. Referenscirkeln som användes hade en diameter på 2 meter och antalet referenspunkter var 1000 stycken totalt. Resultatet från körningen visas i figur 2.24, där gräsklipparens estimerade position baserat på odometri, RTK och Kalman visas tillsammans med referenslinjen. Figur 2.25 visar den totala avvikelsen från ruten, vilket beräknades som det absoluta avståndet mellan cirkelbågen och gräsklipparens position. Avståndet beräknades genom att ta gräsklipparens avstånd från mittpunkten på cirkeln och subtrahera cirkelns radie enligt

$$\text{Avvikelse} = \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2} - R \quad (2.60)$$

där x_c och y_c representerar koordinaterna av cirkelns mittpunkt, och R cirkelns radie.



Figur 2.24: Resultat från cirkelkörningen, baserat på RTK, Kalman och odometri tillsammans med referens.



Figur 2.25: Total avvikelse mellan den önskade cirkeln och den verkliga cirkeln.

Resultatet från cirkelkörningen var att den absoluta totala avvikelsen varierade inom intervallet $[2,53 \cdot 10^{-5}; 0,038]$ meter, med en medelavvikelse på 0,011 meter. Slutpositionen hamnade 0,297 meter från den önskade positionen.

2.3.3 Måluppfyllnad linjeföljning

Målen som sattes upp för linjeföljning i projektets inledande fas visas tillsammans med måluppfyllnaden i tabell 2.4 nedan.

Tabell 2.4: Måluppfyllnad linjeföljning.

Kriterium	Målvärde	Felmarginal	Simulering	Verklig körning
Trådlös styrning			Uppfyllt	Uppfyllt
Köra rakt	50 m	1 cm / m	Uppfyllt	Uppfyllt
Köra i en cirkel	Kritad radie = Önskad radie	1cm / m radie	Uppfyllt	Ej uppfyllt
Positionering	Ta sig till ombedd position	30 cm	Uppfyllt	Uppfyllt

2.4 Diskussion av linjeföljning

Diskussionen för linjeföljning består av simuleringsresultat, en mer djupgående diskussion kring de viktigaste skillnaderna mellan simulering och verklig körning, en diskussion kring hur valet av antalet referenspunkter i ruttplaneringen påverkar resultatet samt hur valet av parametrar för PID-regulatorn och Kalmanfiltret påverkar resultaten. Diskussionen avslutas med hur väl målen för linjeföljning har uppfyllts och om målen kan anses tillräckliga för att uppnå huvudsyftet med arbetet.

2.4.1 Simuleringsresultat

Resultaten vid simulering, enligt figur 2.18, är att gräsklipparen kan följa de linjer som önskas, inom den felmarginal som specificerades i tabellen för målsättning, se appendix A.1. Det intressanta med resultaten är att det inre systemets uppdateringsfrekvens i kombination med pålagt yttre brus på de inkrementella pulsgivarna inte har någon väsentlig påverkan på resultatet, vilket gör att den simulerade modellen till en högre grad representerar det verkliga utfallet. Hade å andra sidan tidskonstanten på det inre systemet haft en direkt påverkan på resultatet i simuleringen hade osäkerheterna, kring hurvida den framtagna modellen av gräsklipparens kinematik skulle gå att implementera på den verkliga gräsklipparen eller inte, ökat. Anledningen till det är att om det inre systemets hastighet haft en direkt påverkan på gräsklipparen, så hade den framtagna modellen förmodligen inte fungerat lika bra, eftersom det inre systemet inte gick att påverka. Det hade i sin tur inneburit att utfallet av gräsklipparens rörelse inte hade blivit som önskat, då det inre systemet inte hunnit uppdateras i den frekvens som skulle behövas.

2.4.2 Skillnader mellan simulerad- och verklig körning

Den simulerade modellen är något förenklad relativt den verkliga modellen, då den simulerade modellen enbart använder sig av robotens odometri med pålagt brus på de inkrementella pulsgivarna vid navigation. Det innebär att den simulerade modellen inte påverkas av de olika uppdateringsfrekvenserna på gräsklipparens sensorer, vilket jämförelsevis den verkliga modellen gör. Därmed var användningen av Kalmanfiltret för den verkliga modellen nödvändigt, men inte i lika hög grad för den simulerade modellen.

Ytterligare en faktor som ligger till grund för resultatet i figur 2.18 är magnituden på det slumpmässiga bruset, som ansattes till att efterlikna att de inkrementella pulsgivarna kan missa en puls samt att det finns lite extra bakomliggande brus. Precisionen på gräsklipparens inkrementella pulsgivare påverkas till stor del av underlaget som gräsklipparen kör på, vilket rimligtvis förklarar odometrins avvikande positionsmätning enligt figur 2.20. Resultatet som figur 2.20 tyder på, ses som väntat då gräsklipparen vid körning på gräs relativt enkelt slirar. Hjulspinnen bidrar till att de inkrementella pulsgivarna mäter digitala pulser, vilket enligt (2.1) omvandlas till vinkelförändringar, som vidare används till att estimerar gräsklipparens uppdaterade position. Detta trots att gräsklipparen i verkligheten inte har rört sig någon sträcka.

Genom repeterade felmätningar ackumuleras positionsförändringen över tid, vilket förklarar odometrins avvikande mätning i relation till RTK- och Kalmanmätningarna i figur 2.20, där både RTK-mätningarna och Kalmanmätningarna ligger inom det önskade intervallet på ± 1 cm per meter körning.

Det som skiljer mellan simulering och verklig körning är storleken på bruset, då det är svårt att representera hur mycket gräsklipparen kommer att slira eftersom det är väldigt beroende av vädret och planens skick. Med det sagt hade förmodligen avvikelserna från rutten enligt figur 2.19 ökat om det slumpmässiga bruset ökat, men eftersom den verkliga modellen använder sig av andra sensorer som inte den simulerade modellen har tillgång till, så ansågs det rimligt att skala ner det simulerade bruset för att totalt sett få en så lik navigering mellan den simulerade- och verkliga modellen som möjligt.

En annan faktor som har en direkt påverkan på resultaten är konverteringen av styrsignalen enligt (2.56). Det som går att se från tabell 2.2 är att den funna relationen inte alltid är exakt, vilket rimligtvis beror på att det finns brus på de inkrementella pulsgivarna som mäter hjulens rotation. Konverteringen av hjulens vinkelhastigheter till en styrsignal gör således att gräsklipparen inte styrs helt enligt den modell som presenterades i avsnitt 2.2.1.1, vilket i sin tur gör att styrningen på den verkliga gräsklipparen och simuleringen är lite annorlunda. Teoretiskt sett borde inte konverteringen av rotationshastigheterna till en styrsignal göra någon skillnad, så länge som konverteringen representerar det verkliga förhållandet mellan styrsignalen och rotationshastigheterna. Däremot så valdes att normalisera styrsignalen för att göra gräsklipparen mindre ryckig, vilket var nödvändigt för att kunna måla raka linjer. Å andra sidan gör det samtidigt att osäkerheterna, kring hurvida konverteringen till styrsignalen representerar det verkliga förhållandet mellan hjulens rotationshastigheter och gräsklipparens interna styrning eller inte, ökar. Samtidigt visar både simuleringen och den verkliga körningen på liknande resultat, vilket gör att konverteringen kan anses vara representativ för systemet.

2.4.3 Val av antal referenspunkter

I tabell 2.3 syns tendenser på att avvikelserna från referenslinjen vid linjeföljning minskar när både antalet referenspunkter per meter, och därmed tiden det tar att genomföra körningen, ökar. Resultatet beror troligtvis på att kortare avstånd mellan punkterna gör att gräsklipparen inte hinner komma upp i hög fart innan nästa punkt nås där vinkeln eventuellt behöver korrigeras för att följa rutten. Vid lägre intensitet med referenspunkter hinner gräsklipparen komma upp i högre fart mellan punkterna, men den ges också större möjlighet att avvika från rutten innan nästa punkt nås. Resultatet visar på förbättrad precision vid körning med upp till 60 punkter per meter för att sedan avta marginellt vid 80 punkter per meter. Resultatet är intressant och skulle kunna bero på en tillfällighet då endast ett test genomfördes för de olika antalet punkter. En annan teori är att det finns en gräns när upplösningen på RTK-positioneringen inte är tillräckligt hög relativt avståndet mellan punkterna.

I tabell 2.3 syns att vid 60 punkter per meter tar det 3 minuter och 37 sekunder att köra en rektangel med sidorna 2x2 meter. Tiden det tar för gräsklipparen att köra denna relativt korta sträcka är inte hållbart om en hel plan ska kritas. Detta eftersom batteristorlek och storlek på färgbehållaren är två begränsande faktorer. Vid 20 punkter per meter kortades tiden ner till 2 minuter och 37 sekunder, däremot med avsevärd försämrad precision. Med nuvarande förutsättningar bör därför en avvägning mellan precision och genomförandetid göras beroende på önskat resultat.

2.4.4 Inställning av Kalmanfilter

Som tidigare nämnts, ställdes Kalmanfiltret in på att i huvudsak följa RTK-mätningarna. En tillkommande fördel med Kalmanfiltret blev då även uppdateringsfrekvensen av tillståndsestimeringen, då GPS-mätningarna med lägre uppdateringsfrekvens kombinerades med odometrin som hade högre uppdateringsfrekvens. Med det blev då resten av beräkningarna i systemet mer exakta, då de kunde baseras på mer aktuella mätningar av tillståndet. Utan Kalmanfiltret kunde gräsklipparen annars estimeras att den var stillastående under några samplingar, då den endast hade tillgång till RTK-mätningar med lägre uppdateringsfrekvens.

Vid framställning av resultaten som visas i figur 2.22 och figur 2.24 var Kalmanfiltret avaktiverat. Anledningen till det var att det vid tillfället när resultaten framställdes uppstod ett problem vid körning i negativ x- och y-riktning. Problemet var att girvinkeln som definierade gräsklipparens riktning hade blivit spegelvänd, i programmeringskoden, vid predikteringen av tillståndet enligt (2.48). Det gjorde att Kalmanestimeringarna tolkade körning i negativ riktning som positiv. När väl problemet hade upptäckts fanns det inte mycket tid kvar till praktiska tester och därav så valdes att enbart spela upp sensormätningarna, från RTK:n och odometrin, i efterhand och ta fram Kalmanestimeringarna baserat på dem. Med det sagt är det inte garanterat att Kalmanfiltret hade fungerat vid ytterligare tester eftersom inte några sådana tester genomfördes. Däremot användes samma sensormätningar från RTK:n och odometrin, vid uppspelning av Kalmanestimeringarna i efterhand, som användes då testet utan Kalmanfilter genomfördes. Då resultaten såg rimliga ut går det att argumentera för att det förmodligen hade fungerat även vid ytterligare tester.

Något som också testades var att till Kalmanfiltret använda IMU-mätningar av girvinkeln istället för den beräknade girvinkeln från odometrin. Det visade sig snabbt vid testning, att IMU:n hade en väldigt brusig signal och gav sämre mätningar av girvinkeln än den estimerade från odometrin. Därav användes inte mätningar från IMU:n efter det. Inköp och användning av en bättre IMU hade möjligen kunnat förbättra resultatet jämfört med odometrin men på grund av tidsbrist och att det upptäcktes sent i projektet gjordes inte detta.

2.4.5 Måluppfyllnad linjeföljning

Av samtliga mål som sattes upp för linjeföljningen så var det bara ett av målen som inte nådde upp till kriterierna enligt tabell 2.4. En möjlig anledning till varför inte målet uppfylldes är att referenscirkeln som användes hade en radie på 1 meter, vilket innebar att den totala avvikelsen inte fick variera mer än 1 cm. Det ställer i sin tur väldigt stora krav på positioneringen, vilket bland annat är en yttre begränsning på de sensorer som använts, där exempelvis RTK-mätningarna ger en precision på 2-3 centimeter, vilket både kan vara en fördel och en nackdel. Detta då RTK-mätningarna kan ge indikationer på att gräsklipparen antingen befinner sig närmre punkten och därmed är en fördel, eller längre bort från den önskade punkten och därmed är en nackdel.

Med det sagt hade det varit relevant att göra liknande tester på cirklar med större radie, vilket det även gjordes fast på ett annorlunda underlag. Underlaget som användes var grus, då inte tillgång fanns till en gräsplan med RTK-station vid tillfället när testerna genomfördes. Resultaten från testerna var därmed inte jämförbara med resultatet från testningen på gräs eftersom vid körning på grus så fick inte gräsklipparens framhjul kontakt med marken på grund av stora ojämnheter i underlaget. Det gjorde att det blev mycket svårare för gräsklipparen att följa referenslinjerna och därmed togs beslutet att inte ta med resultaten. Om avvikelserna däremot beror på underlaget eller på andra faktorer är inte känt, men då det fungerade på gräs drogs slutsatsen att underlaget högst sannolikt har en stor påverkan på utfallet.

Det är även relevant att diskutera hurvida de uppsatta målen är tillräckliga för att nå upp till huvudmålet att kunna krita linjerna på en fotbollsplan. De mål som sattes upp var relativt hårt begränsade i det hänseendet att den totala avvikelsen från rutten inte tilläts variera mer än 1 cm per meter körning. Det innebär teoretiskt sett att vid körning på en 120 meter lång rak linje skulle gräsklipparen kunna avvika 1,2 meter och ändå nå upp till målet, vilket gör att målet kanske skulle ha begränsats ytterligare. Däremot så visar resultaten i figur 2.20 att avvikelsen från rutten är mindre än 1 cm per meter vilket gör att målet hade kunnat begränsats ytterligare, utan att påverka utfallet.

En avvikelse på 7 cm från rutten skulle på en fotbollsplan, där de exakta dimensionerna är väldigt viktiga, förmodligen anses som otillräckligt. Om däremot inte de exakta dimensionerna är av yttersta vikt så skulle det möjligtvis kunna ses som en tillräckligt liten avvikelse för att anses acceptabelt. Med det sagt så är det svårt att sätta en gräns på vilken avvikelse som kan anses acceptabel baserat på vilken precision som anses tillräcklig. Det är antagligen även så att de vaktmästare som målar linjerna, på planer där det inte sköts automatiskt, har en avvikelse på några centimeter. Det gör att en mindre avvikelse på några centimeter förmodligen inte kommer vara särskilt synligt i det stora hela. Samtidigt så innehar samtliga sensorer på gräsklipparen några sorters felkällor. Felkällorna kan bero både på brus, men även på naturliga fenomen som att GNSS-signalerna förändras över tid vilket gör att även RTK-mätningarna kommer visa fel. Därmed är det väldigt svårt att nå en precision på centimeternivå, vilket bidrar till att avvikelserna på 7 centimeter vid

2. Linjeföljning

körning av en 50 meter lång rak linje anses acceptabla för att uppfylla målet.

3

Kritmekanism

För att uppfylla projektets syfte behövde en kritmekanism utvecklas som möjliggör autonom kritning av en fotbollsplan. Vidare behövde kritmekanismen uppfylla de uppsatta målen för projektet som handlade om att mekanismen skulle kunna krita en 11-mannaplan med den färg som fanns att tillgå i mekanismens behållare. Mekanismen behövde dessutom möjliggöra att linjerna hamnade på önskad plats och med rätt linjebredd.

3.1 Teori Kritmekanism

Teorin bakom utvecklingen av kritmekanismen grundar sig till stora delar på metoder från verket: "Produktutveckling: Konstruktion och design" av Karl T. Ulrich och Steven D. Eppinger [41]. Dessutom har verket: "The Value Model: How to Master Product Development and Create Unrivalled Customer Value" av Per Lindstedt och Jan Burenius, [42] haft en betydande roll i den använda metodiken. I [41] beskrivs att boken riktar sig mot produktutveckling av ingenjörsmässigt framtagna produkter. Vidare nämns att målet med boken är att på ett tydligt och detaljerat sätt presentera en uppsättning metoder för produktutveckling. Eftersom många av de metoder som används kan anses som enkla gjordes bedömningen att teorin kring metoderna bäst förklaras i samband med hur de har använts i metodavsnittet.

3.2 Metoder Kritmekanism

Vid utvecklingen av kritmekanismen applicerades metoder inom produktutveckling för att säkerställa att den framtagna mekanismen utvecklades på ett ingenjörsmässigt sätt. Enligt [41] är en väldefinierad utvecklingsprocess användbar inom produktutveckling, då den garanterar produktkvalitet och bidrar till ett välplanerat utvecklingsprojekt. Genom att följa de metoder som anges i [41] kan således detta uppnås. Eftersom [41] hävdar att verket beskriver metoder för att utföra produktutveckling på ett ingenjörsmässigt sätt är metodiken för produktutvecklingen väl motiverad. Notera att metoderna som beskrivs nedan följer projektets kronologiska ordning.

3.2.1 Analys av kritmekanismens funktioner

Eftersom syftet med arbetet var att utveckla en funktionell kritmekanism snarare än en kommersiell produkt, togs inte potentiella kunders åsikter i beaktning vid

produktutvecklingen. Istället analyserades vilka funktioner som var nödvändiga för att kritmekanismen skulle kunna utföra sin huvudfunktion, att autonomt fördela färg på en fotbollsplan.

Enligt [42] är ordet funktion ett begrepp som används för att beskriva en produkts interaktion mellan sig själv och sin omgivning. Vidare förklaras att en funktion skrivs på formen ”substantiv, verb, substantiv”. Författarnas åsikt i [42] är att en produkts prestation beror på hur väl en produkt utför och uppfyller sina funktioner. Därtill förklaras även att det finns olika typer av funktioner. En huvudfunktion är en funktion som den framtida produkten måste ha för att kunna utföra sitt ändamål. En stödfunktion är en funktion som inte höjer kundvärdet men som är nödvändig för att produkten ska fungera. En önskad funktion är en funktion som försämrar produkten.

För att identifiera kritmekanismens olika funktioner gick ett kritningsförlopp metodiskt igenom. På det sättet kunde funktionerna identifieras och skrivas ner i en funktionslista, som helt enkelt är en lista med funktioner. Funktionerna kategoriserades enligt de ovan nämnda typerna av funktioner och skrevs ner i funktionslistan. Enligt [41] bör en specifikation för produkten upprättas både i början av produktutvecklingen och när en slutgiltig lösning har valts. I [42] beskrivs att kravspecifikationer till nya produkter görs bäst från funktioner uttryckta i mätbara enheter. Genom att utföra den ovan nämnda metodiken mättsattes funktionerna genom att tilldelas ett målvärde och en enhet. I den sista delen av funktionsanalysen upprättades en funktionsmodell med hjälp av ett flödesschema. Funktionsmodellen används för att tydliggöra hur de olika funktionerna samverkar när mekanismen är i bruk. Modellen var användbar när olika lösningar skulle genereras till problemet.

3.2.2 Analys av alternativa lösningar för kritmekanismer

Enligt [41] är en analys av alternativa lösningar viktig, eftersom det vanligtvis är snabbare och billigare att implementera en befintlig lösning än att utveckla en helt ny. Vidare beskrivs att produkten under utveckling kan kombineras med redan befintliga lösningar för att få en övergripande bättre lösning.

Då kundvärdet var mindre viktigt för produkten i arbetet utgjordes analysen i form av benchmarking. Enligt [41] innebär benchmarking att produkter som har samma eller liknande funktioner, som produkten som utvecklas, undersöks. Informations-sökningen bestod av sökningar på internet.

3.2.3 Idégenerering till kritmekanismens delfunktioner

När den externa sökningen var gjord genomfördes en intern sökning. Enligt [41] kallas ofta den interna sökningen för idégenerering. Där beskrivs också fyra riktlinjer som är användbara för att förbättra sökningen. Dessa är: skjut fram beslutet, generera många idéer, välkomna idéer som verkar omöjliga och använd grafisk och fysisk media.

Idégenereringen verkställdes genom att gruppmedlemmarna turades om att driva diskussionen för genereringen av idéer. Enligt [41] kan dessa idéer eller dellösningar också benämnas konceptfragment. Anledningen var att göra alla personer delaktiga i idégenereringen. Tanken med ett mer aktivt deltagande var att möjliggöra fler genererade konceptfragment. Genom att generera idéer till varje funktion för sig, en åt gången, istället för att hitta idéer till alla funktioner samtidigt möjliggjordes också generering av ett stort antal konceptfragment. Den drivande personen valde alltså en av funktionerna från den tidigare skapade funktionslistan och en mängd konceptfragment genererades innan en ny funktion valdes och en ny drivande person tog över.

Vid sökningen användes grafisk media i form av en gemensam whiteboard där konceptfragment skrevs ner för dokumentering. Whiteboarden användes också för att snabbt illustrera svårförklarade idéer. På grund av projektets tidsbegränsning fanns inte möjlighet att skjuta upp beslutet. I [41] förklaras inte hur idéer som verkar omöjliga ska välkomnas och det var därför inget som aktivt tillämpades under idégenereringen.

3.2.4 Konceptval för utveckling genom beslutsmatriser

Ett centralt begrepp inom produktutveckling är begreppet koncept. Enligt [41] är ett koncept en ungefärlig beskrivning av en produkts utformning, teknik och verkningsätt. Vidare nämns att ett koncept vanligtvis beskrivs med hjälp av en skiss eller en ungefärlig tredimensionell modell. För att på ett systematiskt och ingenjörsmässigt sätt ta fram ett slutgiltigt koncept för vidareutveckling bestod metoderna för konceptvalet till stor del av att utvärdera koncepten i så kallade beslutsmatriser. Enligt [41] finns många sätt att utvärdera koncept, men i det litterära verket är användandet av beslutsmatriser den metod som beskrivs. En matris är i detta sammanhang ett sätt att systematiskt jämföra ett koncept mot kriterier som tagits fram från den första versionen av kravspecifikationen.

3.2.4.1 Morfologisk matris för generering av koncept

När alla konceptfragment genererats sattes de ihop till koncept. I [41] görs detta genom ett konceptklassifikationsträd och en konceptkombinationstabell. Konceptklassifikationsträdet delar upp alla koncept i olika klasser för att underlätta gallring av koncepten, och konceptkombinationstabellen används för att manuellt para ihop konceptfragment till koncept.

Metoden som har använts i projektet baserades på båda dessa metoder men utnyttjade ett digitalt verkningsätt som kombinerade dem till en metod. Genom att använda en så kallad Morfologisk matris kunde gallringen och kombineringen ske på ett effektivt sätt. Mjukvaran som användes för att genomföra en morfologisk matris var Morpheus.

Den morfologiska matrisen bygger på konceptklassifikationsträdet och konceptkom-

binationstabellen och gör det möjligt att hantera stora mängder lösningar, samtidigt som konceptkombineringen inte behöver göras manuellt. Gallringen görs på så sätt att konceptfragment, som inte är kompatibla med varandra, kan göras ej kombinerbara genom så kallade "constrains". Detta reducerar antalet koncept som genereras.

I projektet upprättades den morfologiska matrisen i applikationen Morpheus där alla funktioner från funktionslistan till produkten skrevs in i matrisens första kolumn. Därefter kunde konceptfragmenten till varje delfunktion skrivas in på samma rad som delfunktionen. Vidare placerades constrains ut. Valet av constrains gjordes med utgångspunkt i om konceptfragmenten var fysiskt kompatibla eller inte. Med det menas hurvida lösningarna kunde kombineras för att bilda koncept som ur en fysikalisk och praktisk synvinkel skulle fungera. Då konceptfragmenten vid det här stadiet i produktutvecklingen saknade komplexitet gjordes bedömningen att beräkningar och fysikaliska resonemang kunde ersättas med diskussioner och logiskt tänkande för att placera dessa constrains. Med ovanstående steg i processen avklarade, kunde till sist koncepten från den morfologiska matrisen upprättas.

3.2.4.2 Elimineringssmatris för snabb uteslutning av koncept

Enligt [43] används en elimineringsmatris, eller "Selection Chart" som den kallas i referensen, för att effektivt kunna utesluta koncept som inte klarar av att utföra produktens delfunktioner. För att avgöra om funktionerna kan uppfyllas används kriterier som baseras på dessa funktioner. Genom att utvärdera varje koncept mot dessa kriterier kan man avgöra om konceptet ska fortsätta analyseras, eller om det ska elimineras. Ett koncept tilldelas ett plus om det kan utföra kriteriet och ett minus om det inte kan det. Om ett koncept tilldelas ett minus kan det elimineras direkt och processen fortsätter med nästa koncept. Metoden möjliggör att stora mängder koncept kan utvärderas på ett effektivt sätt med låg risk för att högpresterande koncept elimineras.

I projektet kunde olika kriterium skapas från kritmekanismens delfunktioner för att möjliggöra en utvärdering av koncepten och deras förmåga att utföra dessa delfunktioner. Eftersom de konstruerade koncepten, från den morfologiska matrisen, endast skapades med hänsyn till om de var fysiskt kompatibla eller inte, innebar inte det att koncepten nödvändigtvis tillgodosåg kritmekanismens funktioner.

När kriterierna var satta kunde de föras in i den översta raden av matrisen. När det var gjort fördes de kvarvarande koncepten in på matrisens första kolumn. Slutligen genomfördes matrisen genom att för varje koncept avgöra om konceptet hade kapacitet att klara kriterierna eller inte. Eftersom koncepten vid detta tillfälle inte var så utvecklade handlade uppfyllnaden av kriterierna till stor del om att identifiera koncept som uppenbart inte skulle klara kriterierna. Elimineringssprocessen fungerade på så sätt, att ett koncept eliminerades så fort det tilldelades ett minus på något av kriterierna. Detta eftersom en slutgiltig lösning behövde tillgodoses alla de uppsatta kriterierna för att vara den bästa möjliga. På så sätt kunde en stor del av koncepten elimineras och koncepten kunde sedan analyseras vidare i Pughmatriserna.

3.2.4.3 Pughmatris för jämförelse mellan kvarvarande koncept

När antalet koncept begränsats till en mer överskådlig mängd påbörjades en mer noggrann analys av koncepten. Enligt [41] kan en metod som kallas för Pughs konceptvalsmatris användas för att snabbt kunna sälla och förbättra koncepten. Matrisen ställs upp med koncepten på matrisens översta rad och kriterier på matrisens första kolumn. Kriterierna som används har lika stor betydelse i matrisen, vilket innebär att kriterierna hålls väldigt generella och mest är till för att särskilja koncepten. Vidare ska en referenslösning användas för att relatera koncepten till varandra.

Betygssystemet fungerar på så sätt att om en lösning tillgodoser ett kriterium bättre än en annan, tilldelas den ett plus. Om lösningen tillgodoser kriteriet lika bra tilldelas den en nolla och om den är sämre tilldelas den ett minus. Genom att summera antalet plus och subtrahera antalet minus tilldelas koncepten ett värde som visar hur väl de tillgodoser kriterierna jämfört med referenslösningen. Genom att jämföra konceptens värden kan de rangordnas utefter högst värde, för att göra en utslutning av de sämre koncepten möjlig. För att referenslösningen ska kunna jämföras med de andra koncepten, samt för att undersöka om resultaten från den första matrisen konvergerar, genomförs ofta Pughmatriser upprepade gånger.

I arbetet genomfördes två stycken Pughmatriser så att referenskonceptet kunde alterneras. På detta sätt kunde resultatet utvärderas två gånger för att säkerställa konvergens av resultatet. Från elimineringsmatrisen ändrades kriterierna något för att få en mer noggrann och specifik bedömningsgrund. Kriterierna som användes kom även för denna matris från den tidiga versionen av kravspecifikationen. Likt elimineringsmatrisen kunde de kvarvarande koncepten placeras i matrisens första kolumn medan kriterierna placerades i matrisens översta rad. Genom att välja ett av koncepten som referens kunde de övriga konceptens förmåga att utföra kriterierna relativt referensen analyseras. Genom att sedan summera alla plus och minus kunde ett värde på konceptets förmåga att utföra kriterierna jämfört med referensen beräknas. Analysen ledde sedan till att de koncept med högst värde behölls för vidareutveckling.

3.2.4.4 Realisering av koncept

För att göra det tydligt hur de kvarvarande koncepten efter utförandet av Pughmatriserna skulle kunna se ut utformades 3D modeller av dem i Computer Aided Design (CAD). CAD är ett mjukvaruverktyg som används till att skapa digitala 3D modeller och som kan användas som underlag för tillverkning och beräkningar. Eftersom modeller av den autonoma gräsklipparen fanns tillgängliga från [12] i programmet Inventor, användes Inventor även i detta projekt. Genom modelleringen blev det tydligt vika komponenter som krävdes till respektive lösning för att den skulle fungera och det gav också en bra bild om hur lösningen skulle kunna tänkas prestera i verkligheten.

3.2.4.5 Kesselringmatris för framtagning av slutgiltigt koncept

Kesselringmatrisen användes för att bestämma det slutgiltiga konceptet som skulle fortsätta att vidareutvecklas. I [41] kallas denna metod för konceptpoängsättning. Det innebär att mer specifika och viktade kriterier används vid utvärderingen av koncepten. På så sätt går det att säkerhetsställa att det vinnande konceptet är det bästa. Enligt [41] finns olika sätt att bestämma vikterna, i projektet användes en procentsats.

För framtagningen av vikterna till kriterierna jämfördes de med varandra för att för varje kriterium få fram en vikt i form av en procentsats. Varje kriterium jämfördes med alla de andra kriterierna och tilldelades en nolla om det var mindre viktigt än det kriteriet det jämfördes med. Om kriteriet var lika viktigt tilldelades det 0,5 och en etta om det var viktigare. Från Pughmatrisen ändrades kriterierna något för att få en mer noggrann och specifik bedömningsgrund. Kriterierna utgick däremot fortfarande från den första versionen av kravspecifikationen. Ändringarna tydliggörs och beskrivs i rapportens resultatdel.

När detta var gjort placerades kriterier och koncept i Kesselringmatrisen, liksom de andra matriserna. Under genomförandet av matrisen tilldelades koncepten ett värde från 1 (lägst) till 5 (högst). Genom att multiplicera värdet med kriteriets vikt erhöles ett nytt viktat värde. Genom att lägga ihop alla viktade värden för samtliga kriterier hos ett koncept kunde ett totalt viktat värde erhållas. Konsekvensen av viktningen blev att ett koncept som uppfyllde de mest viktiga kriterierna på ett bra sätt, rangordnades högre än ett som uppfyllde mindre viktiga kriterier. Genom att sedan analysera alla koncept och deras totala viktade värde kunde ett slutgiltigt koncept väljas ut för vidareutveckling.

3.2.5 Kravspecifikation för måttsättning av kraven på mekanismen

När konceptvalet är gjort rekommenderar [41] att granska den tidigare gjorda kravspecifikationen för att göra den mer specifik och anpassad för det slutgiltiga konceptet. Författarna menar att de tidigare satta måtten ska brytas ner, och genom att utvärdera de faktiska tekniska begränsningarna kan krav på produkten formuleras. När en prototyp, eller en slutgiltig lösning, senare i produktutvecklingsprocessen tagits fram kan kravspecifikationen användas för att verifiera om produkten klarar av att uppfylla de mål och krav som ställts på den.

I projektet upprättades kravspecifikationen till kritmekanismen med utgångspunkt från den tidigare framtagna kravspecifikationen. I den nya kravspecifikationen listades de mer specifika kraven för att sedan måttsättas. Som komplement till krav upprättades önskemål. De baserades på önskvärda egenskaper hos mekanismen som skulle kunna medföra ett bättre utförande av mekanismens funktioner. För att göra kravspecifikationen överskådlig kategoriserades kraven under olika kategorier. Vidare specificerades vilken verifieringsmetod som skulle användas för att avgöra om kraven hade uppfyllts. Kravspecifikationen utgjorde sedan underlag för de tester som

gjordes för att utvärdera kritmekanismen. Slutligen specificerades vem som avgör om kravet, eller önskemålet, uppfyllts eller inte.

3.2.6 Komponentval till kritmekanism

Efter konceptvalet, inleddes en informationssökning kring valet av komponenter till kritmekanismen. En del av informationssökningen genomfördes i form av en intervju med en person med kunskap och erfarenheter kring kritmekanismer. Intervjun kan betraktas som en ostrukturerad expertintervju där frågorna baserades på den intervjuade personens svar. Personen som intervjuades har godkänt sitt omnämnande i rapporten.

Vidare bestod informationssökningen till stor del av litteraturanalys och information från internet. Då det fanns riktlinjer om hur inköp skulle genomföras beställdes delarna genom en utomstående person som granskade komponenterna och lade beställningen. Eftersom den totala projektbudgeten var begränsad till 5000kr behövde vissa billigare och enklare delar införskaffas, eller tillverkas, på egen hand.

3.2.7 Prototyp tillverkning av kritmekanism

Enligt [41] finns fyra olika anledningar till varför en prototyp används. Syftet med prototypen till detta projekt uppfyller 3 av dessa syften. Prototypen byggdes med syfte på inläring och integration. Tanken med prototypen var att den skulle kunna svara på om konceptet kommer att fungera och om alla komponenter och delsystem kommer att kunna samverka. Frågorna gick att svara på genom att utvärdera kraven och målen på produkten från den tidigare upprättade kravspecifikationen.

Den sista anledningen har att göra med kommunikation. Även om prototypen byggdes för att samla in information om konceptets potential till vidareutveckling, byggdes den också för att kunna kommunicera dess utseende med de involverade personerna i projektet. Tillverkningen av prototypen skedde till största delen i elektronikverkstaden CASE på Chalmers Tekniska Högskola och i en lokal verkstad som en av gruppmedlemmarna hade tillgång till.

3.3 Resultat Kritmekanism

I kapitlet följer resultaten för utvecklingen av kritmekanismen. Det slutgiltiga valet av koncept blev en mekanism som kan fästas på gräsklipparen och som möjliggör kritning genom att en pump transporterar färgen från en behållare till ett munstycke som styr flödet av färg.

3.3.1 Kritmekanismens funktioner

För att säkerställa att kritmekanismen skulle uppfylla de funktioner som är nödvändiga för att utföra kritningen utformades en funktionsanalys som resulterade i en funktionslista och en funktionsmodell.

3.3.1.1 Funktionslista

Funktionslistan som genererades när kritprocessen genomgicks steg för steg presenteras i tabell 3.1.

Tabell 3.1: Kritmekanismens funktioner.

Funktion	Substantiv + Verb + Substantiv
Huvudfunktion	Mekanismen kritar fotbollslinjer autonomt
Stödfunktion	Mekanism möjliggör kritning
Stödfunktion	Mekanism samverkar med gräsklippare
Stödfunktion	Mekanism kritar i rätt storlek
Stödfunktion	Användare fyller färgbehållare
Stödfunktion	Användare rengör färgbehållare och mekanism

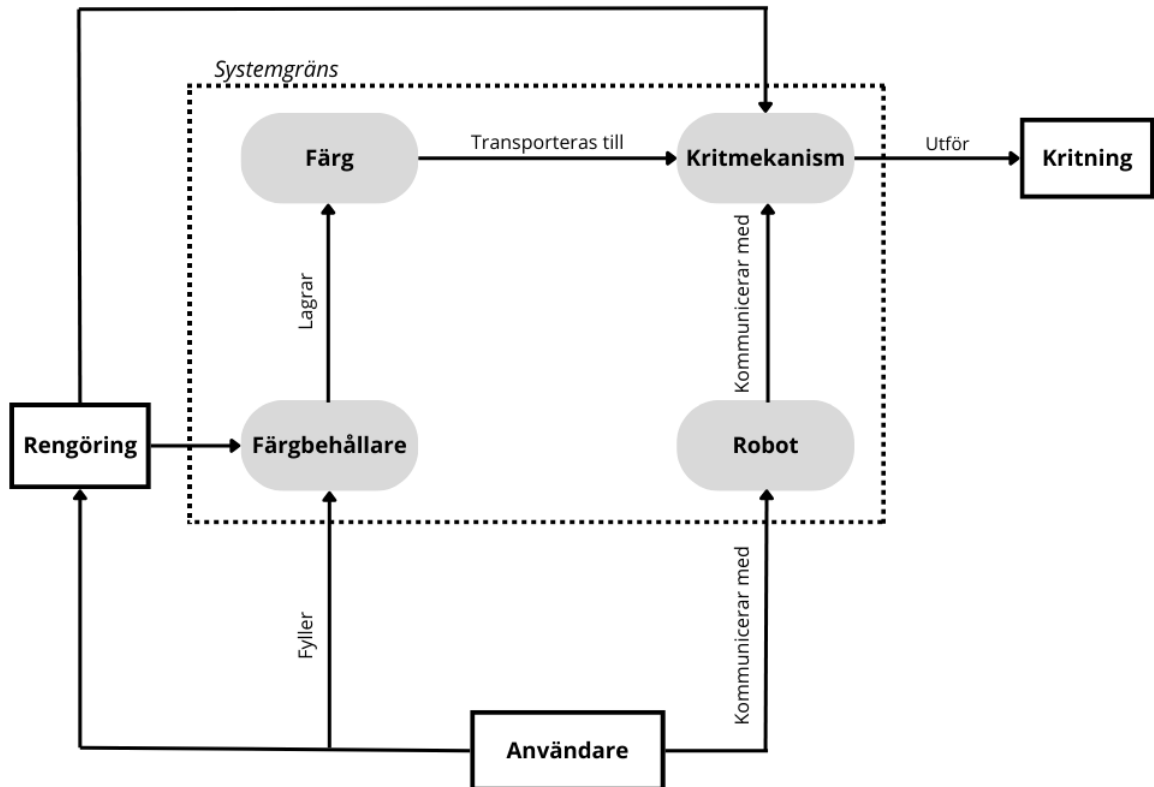
Som en komplettering till funktionslistan gjordes funktionerna mätbara, med syftet att fungera som en första kravspecifikation och kunna användas för att enklare jämföra koncept i processen. För varje funktion i tabell 3.1 formulerades mått, se tabell 3.2, för vad som ska mätas och ett preliminärt målvärde som önskas uppfyllas. För vissa funktioner ansågs det nödvändigt att formulera flera mätbara mått, vilket är anledningen till att det finns fler mått än funktioner.

Tabell 3.2: Identifiering av funktioner.

Funktion	Mått	Sort	Preliminärt målvärde
Huvudfunktion	Kritning av 11-manna plan	minuter	120
Stödfunktion	Mekanism öppnas/stängs på rätt plats	centimeter	2
Stödfunktion	Mekanism kommunicerar med robot	Ja / Nej	Ja
Stödfunktion	Bredd på linje	centimeter	11
Stödfunktion	Tidsåtgång påfyllnad färgbehållare	minuter	10
Stödfunktion	Volym färgbehållare	liter	5
Stödfunktion	Tidsåtgång rengöring av färgbehållare	minuter	10
Stödfunktion	Tidsåtgång övrig rengöring	minuter	10

3.3.1.2 Funktionsmodell

I figur 3.1 redovisas funktionsmodellen som tagits fram som ett flödesschema. Modellen tydliggör hur de olika delfunktionerna samverkar med varandra.



Figur 3.1: Funktionsmodell för kritmekanismen.

Den streckade linjen i figur 3.1 symboliserar kritmekanismens systemgräns och de grå rutorna innanför gränsen visar kritmekanismens olika delar. Rutorna utanför systemgränsen visar vad kritmekanismen interagerar med för att skapa konceptets helhetslösning. Pilarna visar hur de olika rutorna samverkar med varandra.

Figur 3.1 illustrerar också de steg som krävs för att möjliggöra kritning samt efterarbetet efter en utförd kritning. Användaren börjar med att fylla färgbehållaren som lagrar färgen innan den transporteras till mekanismen som utför kritningen. Parallellt kommunicerar användaren med roboten som i sin tur kommunicerar med mekanismen. Det görs för att kritningen ska utföras på rätt ställe. Efter utförd kritning rengör användaren behållaren och mekanismen, därefter är en ny kritning redo att utföras.

3.3.2 Alternativa lösningar

För att öka kunskapen och finna inspiration till lösningar på flera eller enstaka funktioner genomfördes en analys av sedan tidigare kända koncept. Lösningarna som analyserades var en linjemärkningsrobot, en kritmekanism baserad på mekaniska hjul samt en kritmekanism med elektrisk pump.

3.3.2.1 Linjemärkningsrobot

Flertalet olika modeller av linjemärkningsrobotar har de senaste åren utvecklats i syfte att effektivisera linjemärkning av planer inom olika idrotter. Turf Tank [44] har tagit fram en robot som kritar linjer utifrån användarens önskemål. Det innebär att användaren modifierar avsedd planritning genom en användarvänlig programvara, som roboten sedan utför. Användaren ansvarar sedan enbart för färgpåfyllnad samt rengöring. Turf Tanks modell Turf Tank Two [45] använder två lokaliserings tekniker för att uppnå centimeterprecision: GNSS och RTK. Robotens munstycke som kritar linjerna är placerad på sidan av roboten och sprutmodulen styrs automatiskt baserat på vald planritning.

Efter analysen av linjemärkningsroboten noterades att det är en lösning som automatiserat sköter kritningen av planer på ett effektivt sätt och använder liknande lokaliserings tekniker som gräsklipparen i detta projekt.

3.3.2.2 Kritmekanism med hjul

Kritmekanism med hjul är en manuell kritmekanism där färg appliceras på gräsmattan genom ett roterade hjul med samma bredd som de linjer som ska kritas. En version av kritmekanismen med hjul utvecklades senare i projektet och finns illustrerad i figur 3.5.

Kritmekanismen består av tre sammankopplade hjul som genom rotation överför färg från en färgbehållare till gräsmattan. Det första hjulet sitter på en axel i färgbehållaren och är sedan sammankopplat med ett andra, mindre, hjul som är omgivet av gummi. Detta för att öka friktion och möjliggöra överföring av färg till det sista hjulet på ett bra sätt. Det sista hjulet är i kontakt med marken vilket gör att färgen kan appliceras på gräsmattan. Behållaren och hjulanordningen är monterade på en vagn. Det innebär att när användaren börjar framföra vagnen kommer hjulet som är i kontakt med marken starta rotationen på alla hjul och färgen kommer appliceras på gräsmattan.

Efter analysen av kritmekanismen med hjul gjordes ett antal noteringar som var användbara i produktutvecklingsprocessen. Den första noteringen som gjordes var att det är en lösning som uppfyller funktionerna på ett enkelt sätt och som är lätt att implementera. Den andra noteringen som gjordes var att lösningen var otymplig, och därmed får användaren anstränga sig för att uppnå önskat resultat. Vidare konstaterades också att färgutläggningen inte är optimerad utan bör kunna effektiviseras ytterligare för att minska färgåtgången.

3.3.2.3 Kritmekanism med elektrisk pump

Kritmekanism med elektrisk pump är en elektrisk kritmekanism där färg appliceras på gräsmattan genom ett munstycke som öppnas och stängs med hjälp av en ventil som användaren styr. En version av en kritmekanism med elektrisk pump finns illustrerad i figur 3.7.

Kritmekanismen består av ett antal olika komponenter som är integrerade med varandra. Komponenterna till kritmekanismen är monterade på en vagn som användaren kör för att krita linjerna. Färgen transporteras från en färgbehållare på vagnen via en slang och en elektrisk pump som drivs av ett batteri. Pumpen kan också drivas mekaniskt genom att fästa kolven till pumpen på ett av vagnens hjul. I pumpen trycksätts färgen och transporteras sedan vidare genom ytterligare en slang till munstycket där färgen sprids och appliceras på gräsmattan. Kritmekanismen består också av en ventil som gör det möjligt för användaren att via ett handtag på vagnen kontrollera färgflödet. När användaren trycker ner handtaget öppnas ventilen och färgen flödar ut, annars är färgflödet strypt. På det sättet kan användaren styra vart färgen ska appliceras och därmed krita linjerna på rätt ställe. Linjebreddens bestäms med två justerbara avskärmare som begränsar färgflödet till rätt bredd.

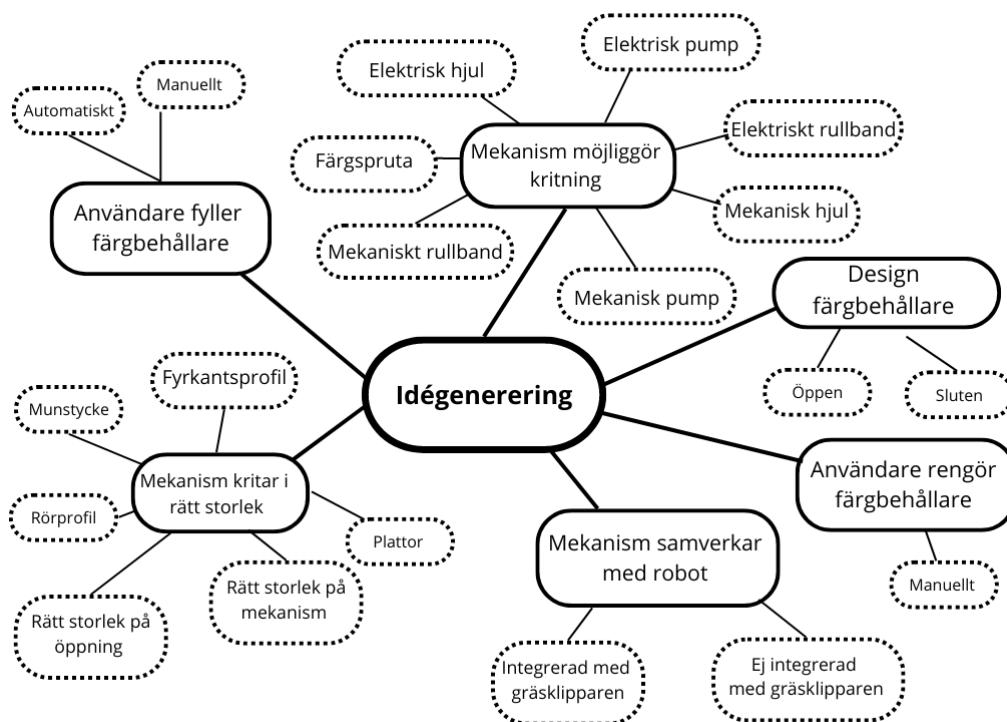
Efter analysen av kritmekanismen med en elektrisk pump kunde ett antal noteringar göras. Lösningen är bra, då det är lätt för användaren att styra färgflödet. Det innebär att användaren inte behöver lyfta upp anordningen när kritningen ska stoppas. Vidare gjordes noteringen att kritmekanismen är relativt otymplig och därmed ansträngande för användaren att framföra.

3.3.3 Konceptval

Resultaten för konceptvalet handlar till stor del om vilka koncept som behålls och utesluts i de olika beslutsmatriserna. Genom att följa resultaten från dessa blir det tydligt varför kritmekanismen med en elektrisk pump är den som valts att vidareutveckla.

3.3.3.1 Idégenerering

Idégenereringen resulterade i lösningar till varje funktion, vilka visas i figur 3.2. De ifyllda ellipserna visar funktionerna och de streckade ellipserna visar de genererade lösningarna till respektive funktion.



Figur 3.2: Idéer på lösningar till varje stödfunktion.

Mekanism möjliggör kritning

Till följande stödfunktion genererades åtta olika lösningar. Lösningarna till *hjul*, *pump* och *rullband* valdes att delas upp i både en elektrisk och en mekanisk lösning för att inte utesluta några alternativ. Med *hjul* menas en lösning där färg appliceras till gräsmattan via ett roterande hjul. Med *pump* menas en lösning där färg kan appliceras på gräsmattan tack vare att pumpen trycksätter färgen. Med *rullband* menas att ett roterade band används till att applicera färgen på gräsmattan.

Färgspruta är också en lösning till stödfunktionen. Tanken med sprutan är att den trycksätter luft med hjälp av en kompressor för att bilda ett undertryck som gör att färgen kan appliceras på gräsmattan. Den sista lösningen som genererades till stödfunktionen var *silon*, vilket är en lösning där färgen fylls på i silon och appliceras på fotbollsplanen genom att en skjutlucka öppnas i mynningen på silon.

Mekanism samverkar med robot

Till stödfunktionen genererades två lösningar: *integrerad* med gräsklipparen eller *ej integrerad* med gräsklipparen. Det som menas med det är att antingen är mekanismen monterad på gräsklipparen eller fristående.

Mekanism kritar i rätt storlek

Det genererades sex lösningar till stödfunktionen där vissa är relativt lika varandra. *Rätt storlek på mekanism* innebär att den delen av mekanismen, som är i kontakt med marken, har rätt linjebredd. Lösningen med *plattor* innebär att två plattor monteras parallellt, antingen på ett fast eller justerbart avstånd. *Rörprofil* och *fyr-*

kantsprofil innebär att färgen transporteras via profilerna som genererar rätt linjebredd. Lösningen som benämns *munstycke* innebär att munstycket som fördelar färgen kitar rätt linjebredd utan att någon ytterligare lösning krävs. *Rätt storlek på öppning* innebär att öppningen där färgen fördelas har önskad linjebredd.

Användare fyller färgbehållare

Idégenereringen resulterade i två lösningar till stödfunktionen, färgpåfyllningen sker antingen *manuellt* eller *automatiskt*.

Användare rengör färgbehållare

Manuell rengöring av mekanismen ansågs vara den enda realistiska lösningen, därför valdes att enbart behålla den i den fortsatta processen.

Design färgbehållare

Under idégenereringen framkom det att det finns två lösningar för designen av behållaren, antingen är den *sluten* eller *öppen*.

3.3.3.2 Morfologisk matris

Efter idégenereringen kombinerades dellösningarna till respektive funktion i mjukvaran Morpheus för att generera koncept. I mjukvaran fastställdes de dellösningar till stödfunktionerna som inte var kompatibla med varandra för att reducera antalet koncept och på det sättet spara tid. Ett exempel på detta var en kombination av dellösningar där kritmekanismen bestod av ett mekaniskt hjul som kitar i rätt storlek genom ett munstycke. Resultatet av Morpheus blev en matris bestående av 112 koncept.

3.3.4 Elimineringssmatris

Innan elimineringssmatrisen genomfördes togs beslutet att modifiera de två dellösningarna till färgbehållaren till en gemensam lösning. Insikten som gjordes var att en öppen färgbehållare hade kunnat generera färgspill så att andra komponenter i kritmekanismen eller gräsklipparen hade riskerat att skadas. Gällande den slutna behållaren fastslogs att den hade varit för tidskrävande att rengöra. En integrering av de båda dellösningarna resulterade således i en öppningsbar färgbehållare, vilket var den dellösning som behölls i processen. Det innebar också att de 112 genererade koncepten från den morfologiska matrisen reducerades till hälften.

De 56 unika koncepten som genererades från den morfologiska matrisen var för många att hantera separat, därför upprättades en elimineringssmatris för att sälla bort koncept som inte uppnådde satta kriterier. Den fullständiga elimineringssmatrisen återfinns i A.2.

3.3.4.1 Kriterier

Kriterierna som sattes upp beskrivs tillsammans med de koncept, som inte ansågs uppnå de uppsatta kriterierna, enligt nedan.

Låg vikt

Ett kriterium med avseende på vikt sattes upp i syfte att eliminera de koncept vars totalvikt ansågs vara för hög. Det betraktades som ett väsentligt kriterium för att en lösning med för hög totalvikt hade medfört problem på det integrerade systemet, eftersom större motorer hade krävts för att driva gräsklipparen framåt. Koncepten som eliminerades var de som innefattades av dellösningen silo.

Tillräckligt färgflöde

Kriteriet syftade till att färgflödet ska vara tillräckligt, men också att det sker en jämn fördelning av färgen för att uppnå önskvärt resultat. Det är även en del i att färgförbrukningen ska vara så optimerad som möjligt. Koncepten som eliminerades var de med dellösningen "Rätt storlek på öppning", då dessa ansågs för komplexa att utveckla.

Tillräcklig noggrannhet

Tillräcklig noggrannhet vid ritning av fotbollsplanens linjer är av stor vikt, därför sattes detta kriterium upp. Koncepten som eliminerades var de med dellösningar som innefattade rullband, med motiveringen att önskad precision, vid ritning av cirklar, inte ansågs kunna uppfyllas.

Påfyllning av behållare

Helt automatiserad påfyllning av behållare ansågs, liksom automatiserad rengöring, inte vara genomförbart inom projektets ramar. Därmed sattes detta kriterium upp för att begränsa koncepten till dellösningar med enbart manuell påfyllning.

3.3.4.2 Kvarstående koncept efter eliminering

Efter eliminering baserat på de ovan nämnda kriterierna återstod 12 koncept som presenteras i tabell 3.3.

Tabell 3.3: Kvarstående koncept efter eliminering.

Koncept	Mekanism möjliggör ritning	Mekanism samverkar med robot	Mekanism kritar i rätt storlek	Brukare fyller behållare	Brukare rengör mekanism	Design behållare
1	Mekaniskt hjul	Integrerad med gräsklippare	Rätt storlek på mekanism	Manuellt	Manuellt	Öppen
2	Mekaniskt hjul	Ej integrerad med gräsklippare	Rätt storlek på mekanism	Manuellt	Manuellt	Öppen
9	Elektriskt hjul	Integrerad med gräsklippare	Rätt storlek på mekanism	Manuellt	Manuellt	Öppen
10	Elektriskt hjul	Ej integrerad med gräsklippare	Rätt storlek på mekanism	Manuellt	Manuellt	Öppen
18	Mekanisk pump	Integrerad med gräsklippare	Munstycke	Manuellt	Manuellt	Öppen
19	Mekanisk pump	Ej integrerad med gräsklippare	Munstycke	Manuellt	Manuellt	Öppen
21	Mekanisk pump	Integrerad med gräsklippare	Geometri	Manuellt	Manuellt	Öppen
22	Mekanisk pump	Ej integrerad med gräsklippare	Geometri	Manuellt	Manuellt	Öppen
41	Elektrisk pump	Integrerad med gräsklippare	Munstycke	Manuellt	Manuellt	Öppen
42	Elektrisk pump	Ej integrerad med gräsklippare	Munstycke	Manuellt	Manuellt	Öppen
45	Elektrisk pump	Integrerad med gräsklippare	Geometri	Manuellt	Manuellt	Öppen
46	Elektrisk pump	Ej integrerad med gräsklippare	Geometri	Manuellt	Manuellt	Öppen

Antalet koncept som kvarstod efter elimineringen ansågs vara ett rimligt antal att hantera i kommande steg i processen, därför behölls alla utan ytterligare eliminering. Koncepten i tabell 3.3 analyserades noggrant för att återigen säkerhetsställa att alla dellösningar till respektive stödfunktion var kompatibla.

3.3.5 Pughmatris

Två Pughmatriser med lösning 1 och lösning 42 som referenslösning upprättades, se figur 3.3 och figur 3.4. Ett koncept med en mekanisk lösning, och ett koncept med en elektrisk lösning valdes som referenslösningar för att reducera risken att vissa koncept blev fördelaktigt bedömda. Kriterierna: låg vikt, färgflöde och noggrannhet återanvändes från elimineringsmatrisen, då de fortfarande betraktades som aktuella i den fortsatta jämförelsen av koncepten. Vidare lades följande kriterier till: få komponenter, livslängd och stöttålighet. Få komponenter ansågs vara intressant för att jämföra konceptens komplexitet. Lång livslängd är alltid eftersträvansvärt. Ett kriterium för konceptens stöttålighet sattes upp för att finna eventuella brister i konceptens konstruktion.

3.3.5.1 Pughmatris 1

I figur 3.3 presenteras resultatet från den första Pughmatrisen.

Chalmers	Pughmatris 1											
			Skapad: 22/2-2024									
Kriterier	Alternativ											
	1	2	9	10	17	18	21	22	41	42	45	46
Vikt	R	-	-	-	0	-	0	-	0	-	0	-
Kostnad	E	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Färgflöde	F	0	0	0	+	+	+	+	+	+	+	+
Noggrannhet	E	0	0	0	0	0	+	+	0	0	+	+
Få komponenter	R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Livslängd	E	+	+	+	0	0	0	0	0	0	0	0
Stöttålig	N	+	-	+	0	+	0	+	0	+	0	+
	S											
$\Sigma+$	0	2	1	2	1	2	2	3	1	2	2	3
$\Sigma 0$	0	2	2	2	4	2	3	1	4	2	3	1
$\Sigma -$	0	3	4	3	2	3	2	3	2	3	2	3
Nettovärde	0	-1	-3	-1	-1	-1	0	0	-1	-1	0	0
Rangordning	1	5	12	5	5	5	1	1	5	5	1	1
Vidareutveckling	Ja	Nej	Nej	Nej	Nej	Nej	Ja	Ja	Nej	Nej	Ja	Ja
Beslut	Behåll	Elim	Elim	Elim	Elim	Elim	Behåll	Behåll	Elim	Elim	Behåll	Behåll

Figur 3.3: Pugh-matris med koncept 1 som referens.

Under genomförandet av den första Pughmatrisen valdes koncept 1 som referens. Konceptet var integrerat med gräsklipparen och bestod av ett mekaniskt hjul som möjliggjorde kritning. Dellösningarna gällande rengöring, påfyllning och behållarens design var desamma för samtliga kvarstående koncept.

Vikten på koncept 1 ansågs vara relativt låg, eftersom konceptet integreras med klipparen. De lösningar som inte integreras på klipparen ansågs vara tyngre, då de kräver ytterligare en konstruktion i form av en vagn som bidrar till totalvikten. De koncept som inte var integrerade med gräsklipparen erhöll därför ett minus gentemot referenslösningen i Pughmatrisen. Referenslösningen är enkel att producera och inga dyra komponenter krävs för att konceptet ska fylla sin funktion. De andra koncepten i Pughmatrisen ansågs vara betydligt mer komplexa att tillverka och bestå av dyrare

3. Kritmekanism

komponenter jämfört med referenslösningen, därför sattes ett minus på alla koncept.

På grund av att mekanismen med hjulet kan ha svårt att producera ett jämnt och tillräckligt färgflöde, sågs koncepten med pump vara bättre och tilldelades därför ett plus gentemot referenslösningen. Detsamma gäller noggrannheten, eftersom hjulet är känsligt för ojämna ytor. De koncept som inte består av ett mekaniskt hjul kommer kräva fler komponenter, exempelvis batteri, slangar och ventiler, därför tilldelades de ett minus med avseende på det kriteriet. Vid bedömningen av livslängd bedömdes alla lösningar ha lika lång livslängd förutom de elektriska hjulen. Eftersom hjulen roteras genom en elektrisk motor blir inte lasten på hjul, axlar samt friktion lika stor vilket leder till en längre livslängd. Slutligen utvärderades stöttåligheten där de koncept som inte är integrerade med gräsklipparen bedömdes vara mer stöttåliga. Detta eftersom en mer stöttålig anordning är lättare att tillverka om den inte är integrerad med gräsklipparen och ingen hänsyn behöver tas till gräsklipparens geometri eller funktion.

Resultatet från matrisen blev väldigt jämnt och inga lösningar fick ett nettovärde som var högre än referenslösningen.

3.3.5.2 Pughmatris 2

I figur 3.4 presenteras resultatet från den andra Pughmatrisen.

Chalmers	Pughmatris 2											
			Skapad: 22/2-2024									
Kriterier	Alternativ											
	1	2	9	10	17	18	21	22	41	42	45	46
Vikt	+	0	+	0	+	0	+	0	+	R	+	0
Kostnad	+	0	0	0	+	+	+	+	+	E	+	0
Färgflöde	-	-	-	-	0	0	+	+	0	F	+	+
Noggrannhet	-	-	-	-	0	0	+	+	0	E	+	+
Få komponenter	+	+	+	0	+	0	+	0	+	R	0	0
Livslängd	+	+	+	+	-	-	-	-	0	E	0	0
Stöttålig	-	0	-	0	-	0	-	0	-	N	-	0
										S		
Σ+	4	2	3	1	3	1	5	3	3	0	4	2
Σ 0	0	3	1	4	2	5	0	3	3	0	2	5
Σ -	3	2	3	2	2	1	2	1	1	0	1	0
Nettovärde	1	0	0	-1	1	0	3	2	2	0	3	2
Rangordning	6	8	8	12	6	8	1	3	3	8	1	3
Vidareutveckling	Ja	Ja	Ja	Nej	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Beslut	Behåll	Behåll	Behåll	Elim	Behåll	Behåll	Behåll	Behåll	Behåll	Behåll	Behåll	Behåll

Figur 3.4: Pugh-matris med koncept 42 som referens.

Under genomförandet av den andra Pughmatrisen valdes koncept 42 som referens. Konceptet bestod av en elektrisk pump som möjliggör kritningen. Mekanismen är inte integrerad med gräsklipparen och fördelar ut färgen direkt genom ett munstycke. Rengöring, påfyllning och behållarens design är desamma för samtliga kvarstående koncept.

Referenslösningens vikt är hög, eftersom lösningen inte integreras med gräsklipparen och en anordning som ökar totalvikten därmed krävs för att möjliggöra kritningen. Med det resonemanget gavs de koncept som ska integreras med gräsklipparen därför ett plus och de som inte ska integreras med gräsklipparen en nolla, eftersom det kommer att bli lika tungt att tillverka en extern kritmekanism oavsett om ett hjul eller en pump används. Eftersom koncept med en elektrisk pump som inte integreras med gräsklipparen är svårare att producera, och fler komponenter behöver köpas in, medför det att alla koncept kommer vara antingen lika dyra eller billigare än referenslösningen.

Eftersom mekanismen med elektrisk pump kan producera ett jämnt- och tillräckligt färgflöde, och dessutom uppnå bra noggrannhet blir alla lösningar med hjul sämre. De mekaniska pumparna som använder munstycket för att fördela ut färgen har inte lika bra färgflöde och noggrannhet, och tilldelas därför ett minus. De koncept som använder en pump och som har en geometri runt munstycket kommer att ha bättre färgflöde och noggrannhet, och tilldelas därför ett plus.

Samtliga koncept kommer att ha färre komponenter än referenslösningen om de inte använder en pump som inte ska integreras med gräsklipparen, då får de lika många. Det beror på att en inte integrerad lösning kommer behöva till exempel ett nytt batteri, en ny mikrocontroller, med mera. Vid bedömning av livslängd uppskattades koncepten med hjul ha längre livslängd än referenslösningen, då hjulen är slitstarka och mindre känsliga. Koncepten med mekaniska pumpar tilldelades ett minus eftersom det sliter på både gräsklipparens batteri och de mekaniska delarna kopplade till den mekaniska lösningen om en sådan lösning implementeras. Till sist utvärderades stöttåligheten där de lösningar som är integrerade med gräsklipparen bedömdes som mindre stöttåliga. Detta eftersom en mer stöttålig anordning är lättare att tillverka om den inte är integrerad med gräsklipparen och man inte behöver ta hänsyn till gräsklipparens geometri eller funktion.

Resultatet från den andra Pughmatrisen skiljer sig från den första Pughmatrisen eftersom resultatet inte är lika jämnt. Till skillnad från den första Pughmatrisen fick många koncept ett nettovärde som var högre än referenslösningen, vilket innebär att de ansågs prestera bättre än referenslösningen.

3.3.5.3 Kvarstående koncept efter Pughmatriserna

Från de båda Pughmatriserna valdes att totalt eliminera de åtta koncept som erhöll ett negativt nettovärde i förhållande till referenslösningarna. Det innebär att det återstod fem koncept till produktutvecklings sista matris, Kesselringmatrisen. De återstående koncepten namngavs och tilldelades en bokstav istället för siffror för att göra hanteringen av lösningarna enklare. Koncepten presenteras i tabell 3.4.

Tabell 3.4: Kvarstående koncept efter Pugh-matriser och namngivning av koncept.

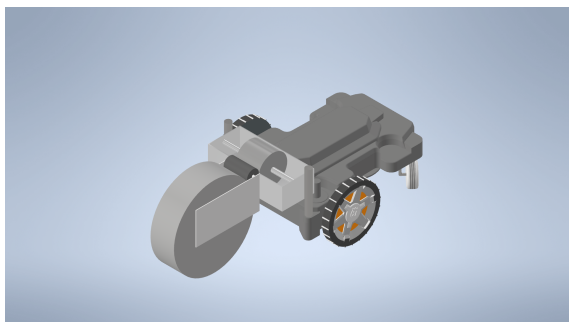
Koncept	Kritning	Samverkan med robot	Storlek på linje	Påfyllning	Rengöring	Behållare
A: Hjulet	Mekaniskt hjul	Integrerad med klipparen	Hjulets storlek	Manuell	Manuell	Öppen
B: Integrerad mekanisk pump	Mekanisk pump	Integrerad med klipparen	Geometri	Manuell	Manuell	Öppen
C: Fristående mekanisk pump	Mekanisk pump	Ej integrerad med klipparen	Geometri	Manuell	Manuell	Öppen
D: Integrerad elektrisk pump	Elektrisk pump	Integrerad med klipparen	Geometri	Manuell	Manuell	Öppen
E: Fristående elektrisk pump	Elektrisk pump	Ej integrerad med klipparen	Geometri	Manuell	Manuell	Öppen

3.3.6 Skisser

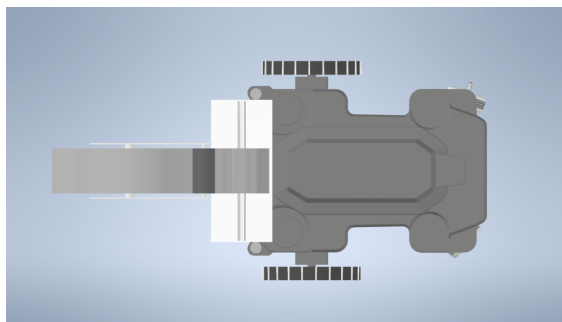
De återstående koncepten efter Pugh-matriserna skissades upp i CAD för att kunna göra så grundande och rättvisa bedömningar som möjligt i Kesselringmatrisen. Det återstod fem koncept efter Pugh-matriserna, men enbart tre modeller valdes att skissas upp eftersom vissa av de kvarstående koncepten ansågs vara likvärdiga utseendemässigt.

3.3.6.1 Koncept A

I figur 3.5 och 3.6 illustreras koncept A från två olika vinklar. Tre hjul samverkar med varandra för att applicera färgen på gräsmattan.



Figur 3.5: Sidovy på hjulet.



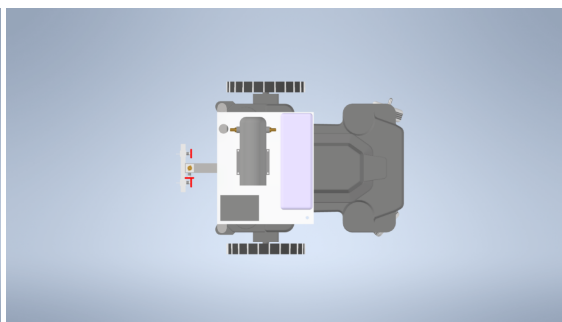
Figur 3.6: Toppvy på hjulet.

3.3.6.2 Koncept B och Koncept D

I figur 3.7 och 3.8 visas en möjlig lösning på koncept integrerade med gräsklipparen. Det motsvarar koncept B och koncept D från de återstående koncepten från Pugh-matriserna.



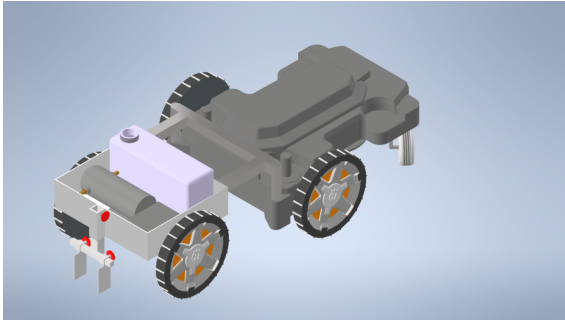
Figur 3.7: Sidovy på integrerad elektrisk pump.



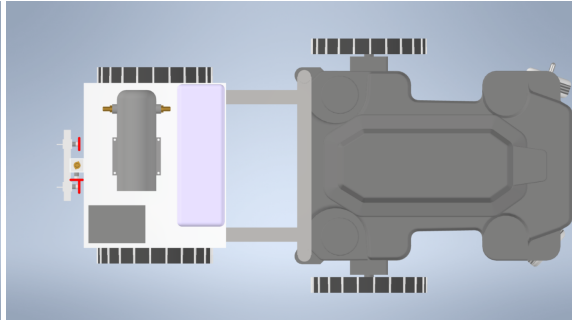
Figur 3.8: Toppvy på integrerad elektrisk pump.

3.3.6.3 Koncept C och Koncept E

I figur 3.9 och 3.10 ges en illustration på hur de koncept som inte är integrerade med gräsklipparen kan se ut. Från de återstående koncepten från Pughmatriserna motsvarar dessa koncept C och koncept E.



Figur 3.9: Sidovy på koncept ej integrerade med gräsklipparen.



Figur 3.10: Toppvy på koncept ej integrerade med gräsklipparen.

3.3.7 Kesselringmatris

En Kesselringmatris upprättades i syfte att kunna jämföra de kvarstående koncepten utifrån viktade kriterium. De kriterium som lades till och inte har funnits med tidigare i processen var: snabbhet, energieffektivitet och styrbarhet. Kriteriet snabbhet relaterade till konceptets förmåga att krita planen så snabbt som möjligt. Kriteriet energieffektivitet kopplade till konceptens prestanda med avseende på energiåtgång under ritning av en fotbollsplan. Styrbarhet var det sista kriteriet som lades till och det relaterade till konceptens förmåga att enkelt styras och kontrolleras via en värddator.

För att bestämma hur viktigt varje kriterium ansågs vara i relation till de andra kriterierna, gjordes en viktning som visas i tabell 3.5. Kriterierna i den vertikala kolumnen tilldelades 0 om de ansågs vara mer väsentliga än kriterierna i den horisontella raden, 0,5 om de ansågs vara likvärdiga och 1 om de ansågs vara viktigare. För att sedan få fram en viktning på varje kriterium dividerades den enskilda summan för varje kriterium med den totala summan för alla kriterier. Som det går att avläsa i tabell 3.5 var således noggrannhet det viktigaste kriteriet.

Tabell 3.5: Viktning av kriterier till Kesselringmatris.

Kriterier	Vikt	Kostnad	Färgflöde	Noggrannhet	Få komponenter	Livslängd	Snabbhet	Energi-effektivitet	Styrbarhet	Summa	Viktning
Vikt	-	1	0.5	0.5	1	1	1	1	0.5	6.5	0.1710
Kostnad	0	-	0.5	0	1	1	0.5	1	0	4	0.1052
Färgflöde	0.5	0.5	-	0	1	1	0.5	1	0	4.5	0.1184
Noggrannhet	0.5	1	1	-	1	1	1	1	0.5	7	0.1842
Få komponenter	0	0	0	0	-	0	0	0.5	1	1.5	0.0394
Livslängd	0	0	0	0	1	-	0.5	1	0	2.5	0.0658
Snabbhet	0	0.5	0.5	0	1	0.5	-	1	0	3.5	0.0921
Energi-effektivitet	0	0	1	0.5	0.5	0	0	-	0	2	0.0526
Styrbarhet	0.5	1	1	0	1	1	1	1	-	6.5	0.1710

Viktningen lades sedan till i Kesselringmatrisen för att värdera varje kriterium rätt. Resultatet från Kesselringmatrisen presenteras i figur 3.11.

Chalmers		Kesselringmatris: Kritmekanism											
		Skapad: 2024-02-27											
Kriterier	Viktning	Alternativ											
		Ideal		A		B		C		D		E	
Namn		v	t	v	t	v	t	v	t	v	t	v	t
Vikt	0,171052632	5	0,86	3	0,51	4	0,68	2	0,34	4	0,68	2	0,34
Kostnad	0,105263158	5	0,53	5	0,53	4	0,42	3	0,32	3	0,32	2	0,21
Färgflöde	0,118421053	5	0,59	2	0,24	4	0,47	4	0,47	4	0,47	4	0,47
Noggrannhet	0,184210526	5	0,92	2	0,37	4	0,74	4	0,74	4	0,74	4	0,74
Få komponenter	0,039473684	5	0,2	4	0,16	3	0,12	2	0,08	3	0,12	2	0,08
Livslängd	0,065789474	5	0,33	4	0,26	2	0,13	2	0,13	3	0,2	3	0,2
Snabbhet	0,092105263	5	0,46	2	0,18	3	0,28	3	0,28	4	0,37	4	0,37
Energieffektivitet	0,052631579	5	0,26	4	0,21	3	0,16	3	0,16	2	0,11	2	0,11
Styrbarhet	0,171052632	5	0,86	2	0,34	2	0,34	2	0,34	4	0,68	4	0,68
<i>T (Totalt viktat värde)</i>		45	5	28	2,8	29	3,34	25	2,86	31	3,68	27	3,2
<i>T / Tideal</i>		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Medel		5,00	0,56	3,11	0,31	3,22	0,37	2,78	0,32	3,44	0,41	3,00	0,36
Std-avvikelse		0,00	0,22	1,01	0,11	0,69	0,18	0,69	0,14	0,62	0,21	0,89	0,19
Median		5,00	0,53	3,00	0,26	3,00	0,34	3,00	0,32	4,00	0,37	3,00	0,34
Antal svaga punkter		0		0		0		0		0		0	
Rangordning				5		2		4		1		3	
Beslut		Väljer D eftersom konceptet tydligt vann											

Figur 3.11: Resultat från Kesselringmatrisen.

3.3.7.1 Koncept A: *Hjulet*

Koncept A fick lägst totalt viktat värde vilket främst berodde på att konceptet bedömdes ha sämre färgflöde, noggrannhet, snabbhet och också var mer komplext att styra. Styrbarheten ansågs svårare i koncept A eftersom det hade krävts en lyftanordning för att krita linjerna på rätt ställe.

3.3.7.2 Koncept C: *Fristående mekanisk pump,*

Koncept C rankades som det fjärde bästa konceptet. Anledningen till det sämre totalt viktade värdet, relaterade till att konceptet inte var integrerat med gräsklipparen. Det medförde sämre betyg med avseende på vissa kriterier, så som vikt, antal komponenter och styrbarhet. Totalvikten för konceptet ansågs bli högre, då en konstruktion, som inte var integrerad med gräsklipparen, hade behövt inkludera en stabil ställning med hjul. Vikten är väsentlig för att den påverkar gräsklipparens egenskaper.

3.3.7.3 Koncept E: *Fristående elektrisk pump*

Koncept E rankades som tredje bäst i Kesselringmatrisen. På samma sätt som koncept C var inte konceptet integrerat med gräsklipparen, vilket innebar att även vikten på gräsklipparen i detta fall var en anledning till det totala viktade värdet i Kesselringmatrisen. I och med att den inte var integrerad med gräsklipparen ansågs det även krävas fler komponenter, vilket också drog ner det totalt viktade värdet i Kesselringmatrisen. Konceptets kostnad ansågs också bli relativt hög på grund av den elektriska pumpen.

3.3.7.4 Koncept B: *Integrerad mekanisk pump*

Koncept B fick näst högst totalt viktat värde i Kesselringmatrisen och blev därmed rankad på en andra plats. Konceptet presterade bra och fick högt betyg på många kriterier. Konceptet fick ett lägre betyg när det gällde dess styrbarhet, vilket var det som var skillnaden gentemot det vinnande konceptet. Det berodde på att det ansågs vara svårare att styra en mekanisk pump i förhållande till en elektrisk pump.

3.3.7.5 Koncept D: *Integrerad elektrisk pump*

Koncept D var det koncept som fick högst totalt viktat värde i Kesselringmatrisen. Konceptet fick bra betyg på alla kriterier förutom energieffektivitet, då den elektriska pumpen ansågs påverka det kriteriet negativt. När det konstaterades att koncept D var det vinnande konceptet i Kesselringmatrisen analyserades varje kriterium igen för att säkerhetsställa att konceptet verkligen skulle kunna uppnå de mål som tidigare satts upp. Bedömningen som gjordes var att koncept D var det koncept som hade störst utvecklingspotential och därför valdes att arbetas vidare med.

3.3.8 Det vinnande konceptet

I figur 3.7 och 3.8 presenteras det vinnande konceptet i en CAD-modell från två olika vinklar för att tydliggöra alla funktioner. I figur 3.7 åskådliggörs kritmekanismens fästnanordning. Fästnanordningen inkluderar av hållaren till munstycket och avskiljarna. De röda detaljerna i figur 3.7 är stoppskruvar. Skruvarna på det horisontella röret möjliggör att avskiljarna kan justeras i sidled så att önskad linjebredd kan ställas in. Skruven på det vertikala röret gör att anordningen kan justeras i höjddled.

3.3.9 Kravspecifikation

En kravspecifikation upprättades i syfte att i ett senare skede kunna utvärdera och verifiera slutkonceptets målvärden genom uppsatta krav. Kravspecifikationen låg även till grund för att underlätta framtida utvecklingsarbeten med konceptet. Målvärdena i kravspecifikationen, se tabell 3.6, har dels fastställts genom tidigare resultat och dels genom uppskattningar utifrån enklare beräkningar. Kriterierna har delats upp i krav eller önskemål vilket symboliseras med K/Ö i tabell 3.6. Kraven anses vara nödvändiga att uppfylla för att konceptet ska fungera som tänkt, medan önskemålen ger ett mervärde till konceptet om de uppfylls.

3. Kritmekanism

Tabell 3.6: Kravspecifikation för slutmodellen av kritmekanismen.

Kriterier	Målvärde	K/Ö	Verifieringsmetod	Referens
Funktioner				
Mekanism öppnas/stängs på rätt plats	+/- 2 cm från önskad position	K	Test mot en referens	
Mekanism kriter i rätt storlek	+/- 1 cm från linjebredd 11 cm	K	Test och mätverktyg	
Prestanda				
Energiförbrukning	Maximalt 10Ah per kritning	K	Beräkning	Produktplanering
Trycksättning av färg	4 bar	K	Test	Användare
Storlek				
Färgbehållare	5 l		Mätning	Användare
Massa				
Pump	2 kg	K	Produktspecifikation	Produktplanering
Slang	300 g	K	Produktspecifikation	Produktplanering
Energikälla	1 kg	K	Produktspecifikation	Produktplanering
Färgbehållare + färg	5 + 0.3 kg	K	Beräkning	Produktplanering
Fästanordning	0.5 kg	K	Beräkning	Produktplanering
Låda	1.5 kg	K	Beräkning	Produktplanering
Utvecklingskostnad				
Pump	1600 kr	K	Budgetberäkning	Given projektbudget
Slang	50 kr	K	Budgetberäkning	Given projektbudget
Energikälla	100 kr	K	Budgetberäkning	Given projektbudget
Munstycke + hållare	500 kr	K	Budgetberäkning	Given projektbudget
Färgbehållare	100 kr	K	Budgetberäkning	Given projektbudget
Låda	100 kr	K	Budgetberäkning	Given projektbudget
Kommunikation med klippare	200 kr	K	Budgetberäkning	Given projektbudget

I och med att konceptet ska integreras med gräsklipparen kommer totalvikten på konceptet påverka gräsklipparens prestanda. Det ansågs därför vara av stor betydelse att hålla ned totalvikten på konceptet. Färgbehållaren och behållaren är de två komponenterna där vikten kan påverkas med avseende på utformning och materialval.

Utvecklingskostnaden i kravspecifikationen syftar till prototypkostnaden. Det ansågs vara en tillräckligt god approximation till kostnaden för ett slutgiltigt koncept i och med att prototypen var verklighetsnära det valda konceptet. Det viktigaste med kraven på kostnaderna var att säkerställa att utvecklingskostnaden skulle vara lägre än den projektbudget som fanns tillgänglig.

3.3.10 Prototyp

En prototyp har tillverkats i syfte att kontrollera kravuppfyllnad för kritmekanismen. Prototypen är främst avsedd att testa kritmekanismens funktioner och måluppfyllnad. Det innebär att vissa förenklingar har gjorts i prototypen gentemot slutkonceptet.

Efter att det vinnande konceptet var fastställt genomfördes en noggrann inventering av dess olika komponenter för att se vilka komponenter som kunde köpas in, och vilka komponenter som behövde tillverkas internt till prototypen. En del av komponentvalet bestod av en ostrukturerad expertintervju med Jakob Roos som har erfarenheter inom skötsel av fotbollsplaner [46]. Roos genomförde ett studiebesök på en anläggning med elektriska kritkärnor och försåg projektgruppen med värdefull information om exempelvis vilken pump som finns i elektriska kritkärnor. I och med en begränsad projektbudget gjordes även en kontroll i CASE-labbet om några

komponenter kunde lånas till testningen för att spara pengar.

3.3.10.1 Inköpta komponenter

Vid analys av det vinnande konceptet gjordes en kontroll kring vilka komponenter som behövdes köpas in för att säkerhetsställa uppfyllnad av konceptets funktioner.

Pump

Det vinnande konceptet bestod av en elektrisk pump som skulle kunna trycksätta färgen till 4 bar. Det gjordes därför en noggrann analys kring vilken typ av pump som ansågs lämplig för syftet och som kunde uppfylla de krav och mål som tidigare satts upp. Valet föll på en membranpump från tillverkaren SHURflo. Enligt [47] kan membranpumpar användas för praktiskt taget alla vätskor. Membranpumpen arbetar med ett flexibelt membran som får sin translaterande rörelse genom en kolvstång som kan drivas via exempelvis en elektrisk motor. Vidare beskrivs att membranpumpar alltid ger ett pulserande flöde, vilket kan regleras med hjälp av en tryckutjämnare som monteras in efter pumpen. Det nämns också att membranet behöver bytas regelbundet för att undvika att membranet brister, då det orsakar läckage. Pumpens exakta produktnamn är PENTAIR SHURflo 8000-543-236 och dess specifikationer finns bland rapportens bilagor, se A.4. Pumpen drivs med 12 volt DC och levererar ett tryck upp till 4,1 bar. Pumpen är självsugande upp till 1,5 meter och är försedd med tryckvakt och backventil. Genom analys av vad nuvarande kritmekanismer använder för pumpar blev det tydligt att just denna pumpen är en vanlig pump för mekanismerna, se exempelvis bilden från en elektrisk kritkärra nedan i figur 3.12 tagen av den intervjuade personen Roos [46].



Figur 3.12: PENTAIR SHURflo 8000-543-236 i en elektrisk kritkärra.



Figur 3.13: PENTAIR SHURflo 8000-543-236.

Eftersom pumpen skulle kunna generera ett tryck upp till 4 bar, kunde vilken pump som helst väljas. Då pumpen återfinns i kritkärror kändes därför valet av SHURflo 8000 som ett tryggt val.

Munstycke

Valet av munstycke grundade sig i munstyckets huvudsakliga funktion, att sprida färgen tillräckligt för att uppnå den önskade linjebredd. En annan central del i valet av munstycke var att välja ett munstycke med så lågt flöde som möjligt i syfte att ha låg färgförbrukning. Ytterligare en aspekt som togs hänsyn till vid val av munstycke var att det skulle klara av det maximala trycket som pumpen kunde generera. Det resulterade i att ett munstycke med spridningen 40-010 och maxtrycket 35 bar valdes. Munstyckets beteckning innebär att spridningen är 40° och diametern på öppningen är 0,59mm. Enligt produktspecifikationen [48] ska det generera ett flöde på cirka 0,4 liter per minut vid ett tryck på 4 bar.

I och med att det är svårare att reglera färgflödet i den konstruktion som har tagits fram ansågs det mer väsentligt att ta större hänsyn till munstyckets diameter gentemot spridningen. Det visade sig att de munstyckena med lågt flöde generellt hade antingen för stor, eller ingen spridning alls. Vissa kompromisser fick således göras, vilket resulterade i att spridningen var större än vad den behövde vara, men eftersom avskärmarna begränsade linjebredd ansågs inte det vara ett problem. I figur 3.14 visas det inköpta munstycket och i figur 3.15 är det gängat i röret.



Figur 3.14: Munstycke 40-010 1/4".



Figur 3.15: Munstycke 40-010 1/4gängat i röret.

Slang och slangnipplar

Slang med tillhörande slangnipplar köptes in för att kunna transportera färgen och fästa slangen i pumpen på både tryck- och sugsidan. Det säkerhetsställdes även i detta fall att slangen skulle klara pumpens maximala tryck. Genom en analys av vad olika kritmekanismer använder för slang bedömdes att en slang med en innerdiameter på 10 mm och medföljande slangnipplar skulle vara lämpligt för kritmekanismen.

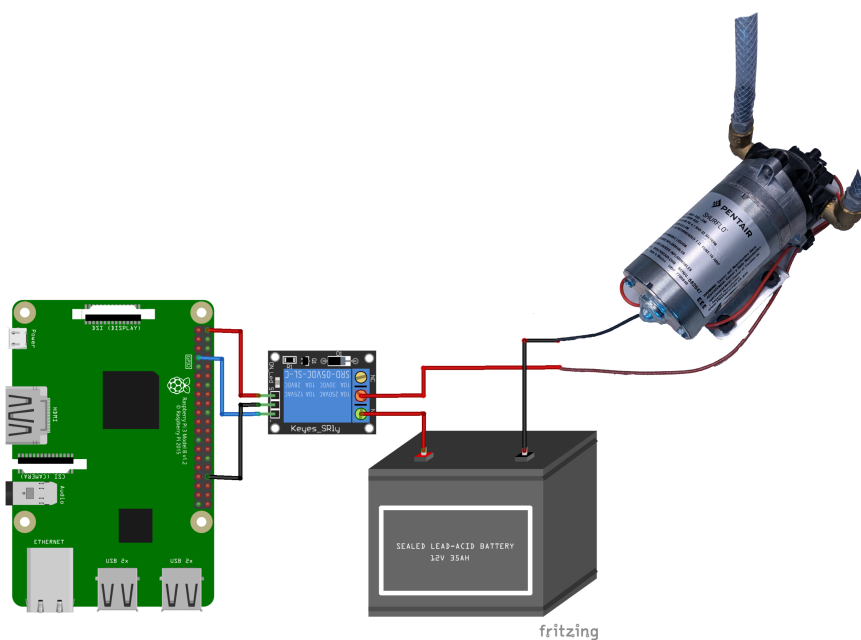
Slangen som inhandlades var en transparent armerad slang i PVC med en innerdiameter på 10 mm och ytterdiameter på 15 mm. Slangnipplarna som inhandlades hade ytterdiameter 10mm och 3/8"utvändiga gängor för att passa anslutningen till pumpen. Slangnipplar med samma dimensioner användes också i övriga delar för kritmekanismen där slangen behövde anslutas.

Relä och strömkälla

För att möjliggöra automatiserad styrning av kritmekanismen var det nödvändigt att pumpen kunde sättas på och av beroende på om linjer skulle kritis eller inte. Detta löstes genom att implementera ett 5 V 1-kanals relä kopplat till mikrokontrollen för att styra strömförsörjningen till pumpen.

5 V relämodulen är ett kort som används för hantering av högspännings- och strömbelastningar och är huvudsakligen utformat för användning med olika mikrokontrollers [49]. Ett relä är en elektromekanisk brytare som styrs av en elektrisk ström, och möjliggör styrning av en kraftigare elektriskt krets med en förhållandevis svagare styrspanning. Reläet fungerar genom att en ström appliceras på en elektromagnetisk spole, vilket resulterar i en mekanisk rörelse för att öppna och stänga en kontakt. Reläet medför även att både kontakterna och spolen är galvaniskt isolerade [49].

Den primära strömkällan till pumpen var från ett externt 12 V 7 Ah blybatteri och reläet drevs av 5 V kontakten på mikrokontrollen. Kopplingschemat kan ses i figur 3.16. En av mikrokontrollens GPIO (General Purpose Input/Output)-kontakter kopplades till IN-kontakten på reläet. Med hjälp av algoritmen för reglering skickade mikrokontrollen en 3,3 V styrsignal till reläet när linjer skulle kritis.



Figur 3.16: Kopplingschema för styrning av pump.

3.3.10.2 Tillverkning av komponenter

När komponenterna till prototypen tillverkades gjordes vissa modifieringar gentemot den CAD-modell som tagits fram för att underlätta tillverkningen. Det ansågs vara ett välgrundat beslut eftersom prototypen främst skulle användas för att testa funktioner och verifiera uppsatta mål. Modifieringarna ansågs också vara tillräckligt små för att inte påverka konceptets funktion på ett negativt sätt.

Den första komponenten som tillverkades var lådan där de andra komponenterna sedan fästes eller placerades. En plåt i rätt storlek klipptes till i en gradsax efter att ha erhållit måtten på ritningar från CAD-modellen. Därefter gjordes ett uttag för start- och stoppknappen på gräsklipparen med hjälp av en vinkelslip. Det gjordes även uttag i hörnen på plåten så att kanterna sedan kunde bockas i en kantpress, se figur 3.17. När kanterna var bockade svetsades hörnen på lådan ihop med en TIG-svets eftersom lådan tillverkades i aluminium. För att kunna fästa lådan i hållarna på gräsklipparen kapades två aluminiumrör till. Hål borrades i både rören och lådan så att ihopmontering kunde ske med skruvar. I figur 3.18 visas lådan monterad på gräsklipparen.



Figur 3.17: Tillklippt plåt till lådan innan bockning.



Figur 3.18: Lådan monterad på gräsklipparen.

Behållaren till färgen var den andra komponenten som tillverkades, även denna i aluminium. Det gjordes genom att först klippa till en plåt som motsvarade kortsidorna och botten på behållaren. Plåten bockades sedan till en u-profil. Därefter klipptes långsidorna på lådan ut och sammanfogades med u-profilen genom svetsning. Behållaren putsades till och fylldes sedan med vatten för att säkerhetsställa att den höll tätt. En tunn plåtremsa svetsades fast i ena änden på behållaren för att erhålla en lutning när behållaren placerades plant, se figur 3.19. Tack vare lutningen rann all färg till sidan där färgen sögs upp så att all färg utnyttjades. Utöver det svetsades också två bockade fästen fast på behållaren, ett på ena långsidan och ett på ena kortsidan, se figur 3.20. Det gjordes för att behållaren skulle kunna fästas i lådan så att den inte välter eller förflyttar sig för mycket när gräsklipparen kör. Vidare tillverkades också locket till behållaren med samma metoder som användes för att göra lådan.

3. Kritmekanism



Figur 3.19: Behållarens undersida med fastsvetsad remsa för lutning.



Figur 3.20: Behållare med fäste på kort- och långsidan.

Vidare tillverkades fästeanordningen till munstycket samt avskiljarna. Fästeanordningen visas i figur 3.21. Fyrkantsrör kapades till önskad längd och sammanfogades med hjälp av svetsning. I rören borrades och gängades hål så att anordningen kunde fästas i lådan, men också för att stoppskruvar skulle kunna användas. Med hjälp av stoppskruvarna kunde anordningen justeras i höjdlid, och avskärmarna i sidled, för att kunna ställa in önskad linjebredd. I figur 3.22 visas fästeanordningen när den är monterad i lådan på gräsklipparen.



Figur 3.21: Fästeanordningen med stoppskruv på vertikalt rör.



Figur 3.22: Fästeanordningen monterad i lådan på gräsklipparen.

Två andra komponenter som tillverkades var två gängade rör. Röret som visas i figur 3.23 tillverkades för att kunna fästa munstycket på ett enkelt sätt. Det ansågs också vara en bra lösning att låta röret gå genom hela fyrkantsröret så att höjden enklare kunde ställas in med stoppskruvar, och så även öppningen på munstycket. Röret gängades i nederkant med hjälp av en gängtapp, i och med att munstycket hade utvändiga gängor. I överkant på röret användes istället ett gängsnitt för att göra utvändiga gängor. Det gjordes för att kunna sätta på en rörmuff som passade tillsammans med slangnippeln. Det andra röret som tillverkades visas i figur 3.24. Röret tillverkades för att underlätta att suga upp färgen. Ett spår gjordes i nederkant på röret för att se till att färg kunde sugas upp. Överkanten på röret gängades på samma sätt som det andra röret och samma lösning användes för att få ihop röret med slangnippeln.



Figur 3.23: Gängat rör att fästa munstycket i.



Figur 3.24: Rör att fästa i behållaren för uppsugning av färg.

3.3.10.3 Montering

Prototypen färdigställdes genom att de inköpta komponenterna och de tillverkade komponenterna monterades till en enhet, se figur 3.25 och 3.26. I alla kopplingar i kritmekanismen användes gängtejp för att undvika läckage. Samtliga komponenter som fästes på lådan gjordes avtagbara genom att använda skruvar med tillhörande muttrar. Lådan sattes sedan fast på gräsklipparen med hjälp av de två rören och de två hållarna som har monterats på gräsklipparen, se figur 3.26.



Figur 3.25: Kritmekanismen monterad på gräsklipparen framifrån.



Figur 3.26: Kritmekanismen monterad på gräsklipparen bakifrån.

3.3.11 Funktionella tester

Funktionella tester har genomförts med prototypen för att kontrollera att det valda konceptet uppfyller sina funktioner, samt de satta kraven och målen.

3.3.11.1 Färgflöde

Konceptets färgflöde testades för att kontrollera hur länge färgen i behållaren räcker. Testet syftade till kravet i kravspecifikationen, se tabell 3.6, att konceptet ska kunna krita planen på en viss tid. Testet utfördes genom att 3 liter vatten mättes upp i behållaren och sedan startades pumpen samt tidtagning. Vattnet pumpades från behållaren ut genom munstycket och tidtagningen stoppades när vattnet i behållaren var slut. Testet genomfördes två gånger med samma resultat, ett färgflöde på 0,57 l/min. Flödet är att jämföra med det förväntade flödet från munstycket på 0,4 l/min, enligt [48]. Den färg som används vid krita av fotbollsplaner är såpass utspädd att vatten ansågs vara en bra approximation till vätskans tröghet som påverkar flödet.

3.3.11.2 Vikt

Eftersom flödet som genererades var relativt högt i förhållande till tiden det kommer ta att krita planen, drogs slutsatsen att en större behållare skulle krävas. Ett funktionellt test för att kontrollera att gräsklipparen kunde lastas med ytterligare vikt utan att styrningen påverkades, genomfördes därför. Utöver lådan, pumpen, batteriet och fästningsanordningen med en vikt på 6 kg lades ytterligare en vikt på 10 kg till. Gräsklipparen testades därefter att köras efter en angiven rutt. Vikten togs därefter bort och gräsklipparen fick köra samma rutt igen. Vid en jämförelse konstaterades att vikten inte påverkade gräsklipparens precision. Den extra vikten på 10 kg innebar därmed att en tank med cirka 9 liter färg teoretiskt sett skulle

kunna användas. En större tank än så ansågs inte vara rimligt att integrera med gräsklipparen, därav genomfördes inga ytterligare belastningstester.

3.3.11.3 Kritar i rätt storlek

Ytterligare ett test som genomfördes var på kritmekanismens förmåga att krita i rätt storlek, vilket även det var ett krav i kravspecifikationen, se tabell 3.6. Testet genomfördes på asfalt med vatten för att tydligt åskådliggöra resultatet. Avskärmarna ställdes in med ett avstånd på 11 cm från varandra, se figur 3.27. Därefter startades gräsklipparen med den integrerade kritmekanismen och kördes rakt fram. En linje genererades på asfalten vilket figur 3.28 visar. Bredden på linjen mättes på ett flertal ställen och avvikelserna var mindre än 1 cm.



Figur 3.27: Uppmätt avstånd på 11cm mellan avskärmarna.



Figur 3.28: Linjen som genererades när testet utfördes.

3.3.11.4 Precision

För att kontrollera att konceptet krita på rätt plats genomfördes ett precisionstest. Ett program där mekanismen skulle öppnas efter 2 meter och stängas av efter 8 meter skrevs i Python. Gräsklipparen placerades vid sin startposition, se figur 3.29, sedan drogs linjer vid 2 respektive 8 meter utifrån startpositionen. Programmet kördes och resultatet från när gräsklipparen med den integrerade kritmekanismen började krita vid 2 meter åskådliggörs i figur 3.30. Resultatet visar på god precision utifrån angiven startposition. När mekanismen stängdes av efter 8 meter skedde även detta med god precision då allt slog ifrån på rätt ställe. Problemet som uppstod var att det fortsatte komma lite vatten från munstycket vilket gjorde det svårt att framvisa ett rättvist resultat i en figur.



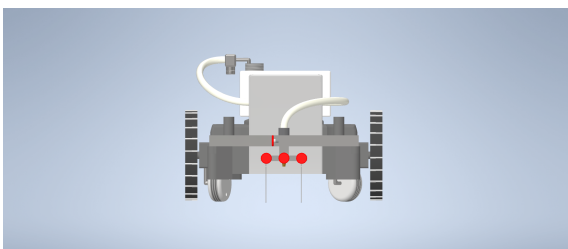
Figur 3.29: Startposition vid test av relä.



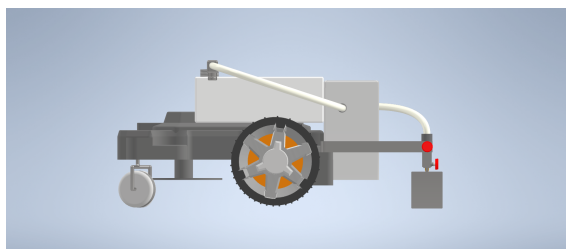
Figur 3.30: Resultat precision relä.

3.3.12 Slutmodell

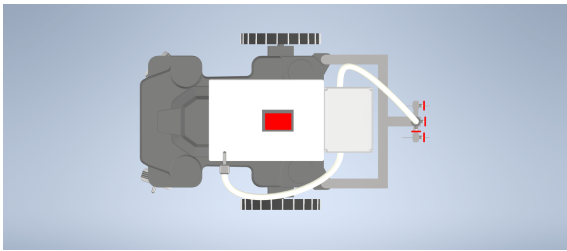
Eftersom prototypen främst utvecklades med syftet att kontrollera kravuppfyllnad för kritmekanismen, utformades ett förslag på hur en potentiell slutprodukt skulle kunna se ut och fungera. Prototypens design genomfördes med fokus på simplicitet för att den skulle bli enkel att tillverka, samtidigt som den skulle vara lätt att demontera för att kunna utföra olika tester på gräsklipparen. Designen av slutmodellen genomfördes istället med fokus på kompakthet, effektivitet och estetik. Lärdomar om kritmekanismens komponenter och dess placering togs från den byggda prototypen. I figur 3.31 - 3.34 följer en CAD-modell i olika vyer över hur den tänkta slutmodellen skulle kunna utformas. Vidare finns en sprängskiss med en tillhörande komponentlista för modellen bland rapportens bilagor, se A.3. Notera att slangarna saknas i sprängskissen då slangarna i modellen inte är modellerade komponenter utan bara är till för att visuellt visa att de ska finnas med i slutmodellen. Notera också att ett skal ska placeras över samtliga komponenter och gräsklipparen för att skydda dem. Skalet designades inte till modellen eftersom det försvårar visualiseringen av kritmekanismens komponenter.



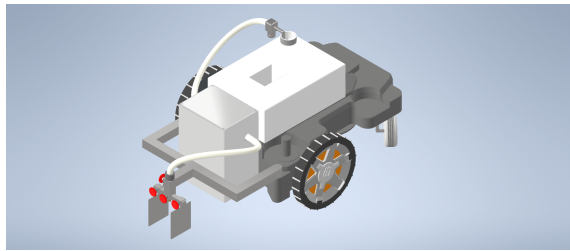
Figur 3.31: Slutmodell bakifrån.



Figur 3.32: Slutmodell från sidan.



Figur 3.33: Slutmodell uppifrån.



Figur 3.34: Slutmodell snett uppifrån.

Det slutgiltiga förslaget på kritmekanismens utformning bygger på att färg förs från en behållare som placeras på gräsklipparens överdel, genom en pump, till ett munstycke som fördelar ut färgen som ska appliceras på marken. De största skillnaderna från prototypen har att göra med kritmekanismens strömkälla och placering av färgbehållare och pump. I övrigt delar slutmodellen och prototypen till stor del komponenter och utformning.

3.3.12.1 Strömkälla och relä

Istället för att använda ett externt batteri kommer slutmodellen att använda det redan inbyggda batteriet som finns för att driva klipparen. Genom att koppla ett relä till gräsklipparens batteri och den befintliga mikrokontrollern är det möjligt att styra när pumpen ska vara av eller på. Reläet ska vara placerat i gräsklipparens chassi där övriga elektriska komponenter förvaras. Eftersom klipparen inte ska klippa och krita samtidigt kommer inte kritmekanismen och dess pump att påverka gräsklipparens klipptid.

3.3.12.2 Behållare

För att göra kritmekanismen mer kompakt och mer estetiskt tilltalande ändrades placeringen av färgbehållaren och pumpen jämfört med prototypen. Komponenternas placering möjliggjorde då att ett skal kunde placeras på gräsklipparen för att skydda alla komponenter, vilket hade varit svårt om designen för prototypen behållits. En skräddarsydd behållare för kritfärgen möjliggör detta. Behållaren har numrerats med nummer 9 i slutmodellens sprängskiss, se A.3. Färgbehållaren har anpassats till gräsklipparens form och undersidan av behållaren matchar gräsklipparens ovansida. Vidare går ett hål rakt igenom behållaren för att möjliggöra åtkomst till gräsklipparens stoppknapp. Hålet genom behållaren är inte optimalt men är nödvändigt för att kunna placera färgbehållaren på gräsklipparen.

En förflyttning av stoppknappen skulle göra mekanismen ännu mer användarvänlig, men då tanken med mekanismen var att den skulle kunna integreras med den nuvarande gräsklipparen gjordes bedömningen att behållarens utformning behövde se ut på ett sådant sätt så att stoppknappen gick att komma åt. Den skräddarsydda designen av behållaren hade inneburit en extra produktionskostnad eftersom den inte hade gått att köpa in. Vidare är behållaren designad för att kunna rymma cirka 9 liter färg istället för de 5 liter som tidigt i utvecklingsprocessen ansågs räcka för en kritning av en 11-mannaplan. Enligt de presenterade testerna av mekanismen

blev det tydligt att en större mängd färg hade behövts för att möjliggöra kritningen. I intervjun med Roos [46] intygades att mellan 8 till 10 liter färg gick åt vid en kritning med en elektrisk kärra. Dessvärre hade tillverkningen av prototypens behållare redan genomförts vid det laget och informationen användes istället enbart för tillverkningen av slutmodellen.

3.3.12.3 Pump och externt pumphus

Pumpens placering på slutmodellen är på gräsklipparens baksida, sett från körriktningen. För att inte exponera pumpen och dess elektriska kretsar för mycket mot den omkringliggande miljön kommer den att placeras i ett så kallat externt pumphus. Pumpen fästs genom sin fästordning med skruvar in i pumphusets vägg. Pumphuset fästs i sin tur med bultförband i baksidan på gräsklipparen där hål kommer att behöva borras för att möjliggöra detta. Genom att borra ytterligare ett hål i gräsklipparens baksida kan strömkablar dras från gräsklipparens batteri in till det externa pumphuset och pumpen. Pumpen som har valts till slutmodellen är samma som den pump som valdes till prototypen, se figur 3.12.

3.3.12.4 Filter och rör i färgbehållaren

Vid de tester som genomfördes på prototypen, se 3.3.11.1, drogs slutsatsen att flödet från kritmekanismen var högre än munstyckets angivna flöde. En potentiell lösning på problemet skulle kunna vara att minska inflödet i mekanismen. I slutprodukten kommer därför röret i mekanismens färgbehållare att ha en mindre innerdiameter. Dessutom kommer röret att förses med ett filter som främst ska förhindra att smuts och färgklumpar fastnar i munstycket, men också i pumpen och andra delar av mekanismen.

Idéen till ett filter erhöles genom att studera en nuvarande elektrisk kritkärre. Filtret noterades en bit in i utvecklingsprocessen, men eftersom den utvecklade prototypen enbart skulle användas under kontrollerade förhållanden och endast hantera vatten gjordes bedömningen att det inte skulle fylla något syfte att implementera ett filter. Det tänkta filtret är ett likadant som det som sitter på kritkärren på bilden nedan, se figur 3.35. Bilden är tagen av den intervjuade personen Roos [46].



Figur 3.35: Filter till slutprodukt på en elektrisk kritkärra.

3.3.12.5 Fästianordning, slanganslutningar och munstycke

Till slutprodukten är munstycket och slanganslutningarna samma som för prototypen. Möjligtvis skulle ett munstycke med mindre håldiameter kunna användas för att ge ett lägre flöde. Vid informationssökningar hittades inget munstycke med ett mindre flöde, men vid en mer detaljerad och nytänkande informationssökning skulle det kanske kunna vara möjligt. Storlek på slang och slanganslutningarna kommer att vara exakt samma som för prototypen. Funktionen för fästianordningen kommer att vara exakt densamma som för prototypen sett ur ett funktionellt perspektiv. Däremot kommer den att utformas på ett något annorlunda sätt för att möjliggöra utrymme för pump och pumphus, se figur 3.31 - 3.34.

3.3.13 Utvärdering mot kravspecifikationen

Utvärderingen mot kravspecifikationen är gjord både för slutkonceptet och prototypen som tagits fram. Det beror på att slutkonceptet anses uppfylla de krav som prototypen uppnått vid funktionstesterna. I de fall där kravuppfyllnaden av kriterierna skiljer sig mellan slutkonceptet och prototypen har slutkonceptet utvärderats. Analysen visar att kritmekanismen klarar de allra flesta av målen och kraven.

3.3.13.1 Funktioner

Konceptet skulle krita i rätt storlek och enligt kravspecifikationen skulle inte avvikelser på linjen vara mer än ± 1 cm. Linjen som genererades vid funktionstestet avvek inte mer än det och kravet anses således vara uppfyllt. Konceptet skulle också öppna och stänga mekanismen på rätt ställe med en avvikelse på ± 2 cm. Kravet uppfylldes delvis vid det funktionella testet med avseende på precision, men eftersom det fanns vissa problem när mekanismen stängdes av anses kravet inte vara uppfyllt.

3.3.13.2 Prestanda

Energiförbrukningen som krävs för att krita en plan har dels att göra med driften av gräsklipparens hjulmotorer samt driften av pumpen under kritningen. Batteriet har en kapacitet på 10 Ah och beräknas behöva laddas efter 3,5 timmars körtid. Eftersom klipparens hastighet är väldigt låg med den nuvarande regleringen är det mer rimligt att beräkna tiden för kritningen utefter vad som är rimligt. Pumpen behöver 7A för att fungera. Om kritningen tar 45 minuter skulle klipparens motorer förbruka cirka 2,15 Ah och pumpen 5,25 Ah vilket skulle innebära att gräsklipparen klarar av att krita planen på en laddning. I dagsläget är inte det rimligt med hänsyn till den nuvarande uppsättningen av flöde i relation till hastighet på gräsklipparen. Kravet på 10Ah per kritning får därför ses som ej uppfyllt. Vad gäller trycksättningen kan pumpen förse vätskan med ett tryck upp till 4,1 bar, vilket medför att kravet på 4 bars trycksättning uppfylls. Vid testerna upptäcktes också att ett lägre tryck fortfarande leder till en bra spridning av färg.

3.3.13.3 Utvecklingskostnad

Utvecklingskostnaden avser kostnaden för prototypen. I tabell 3.7 presenteras samtliga kostnader för prototyp tillverkningen. Den totala kostnaden blev 1902,85 kr vilket var mindre än den budgeterade kostnaden på 2605 kr, således är kravet för utvecklingskostnaden uppfyllt.

Tabell 3.7: Utvecklingskostnad prototyp.

Komponent	Kostnad
Pump	1553,36 kr
Munstycke	238,00 kr
Slang 1m	24,97 kr
Slangnipplar 4st	51,68 kr
Slangklämmor 4st	34,84 kr
Summa	1902,85 kr

En stor faktor till att utvecklingskostnaden kunde uppfyllas var att de tillverkade komponenterna kunde tillverkas av spillmaterial från en verkstad som en av projektmedlemmarna hade tillgång till. Ytterligare en faktor som bidrog till den låga utvecklingskostnaden var att energikällan som användes under de funktionella testerna kunde lånas från CASE-labbet och behövdes således inte köpas in.

3.3.13.4 Massa

I tabell 3.8 presenteras den totala massan för de komponenter som har ett krav på vikt i kravspecifikationen, se tabell 3.6.

Tabell 3.8: Total massa för slutkonceptet.

Komponent	Massa
Pump	1.9 kg
Slang	0.1
Energikälla	0 kg
Färgbehållare + färg	10 kg
Fästningsanordning	1 kg
Låda	1.6 kg
Totalt	14.6 kg

Pumpen och slangarna som användes i prototypen är samma som ska användas i slutkonceptet. De två komponenterna i prototypen kunde således användas för att mäta kravuppfyllnad med avseende på kriteriet massa. Pumpen vägde 1,9 kg och slangarna vägde tillsammans 0,1 kg, vilket innebär att kravet för massan för de båda komponenterna är uppfyllt. Energikällan är den enda av de återstående komponenterna som klarar kravet med avseende på massa. Det är framför allt färgbehållaren med färg vars slutgiltiga vikt är dubbelt så hög gentemot det krav som ställdes. Anledningen till det är insikten att mer färg än vad som tidigare antagits kommer gå åt för att krita en fotbollsplan. Funktionstestet rörande vikt visade däremot att vikt inte är en större begränsning. Den slutgiltiga totalvikten på 14,6 kg är lägre än vad gräsklipparen lastades med vid funktionstestet.

3.4 Diskussion av kritmekanismen

I diskussionen av kritmekanismen diskuteras om den metodik som använts vid produktutvecklingen har lett till att mekanismen utvecklats på ett ingenjörsmässigt sätt eller inte. Vidare diskuteras hur valet av komponenter till mekanismen genomförts och hur de har påverkat kritmekanismens förmåga att utföra sina funktioner. Till sist diskuteras varför flödet genom munstycket i de tidigare presenterade resultaten är högre än förväntat.

3.4.1 Produktutvecklingsmetodikens applicering

Under arbetets gång applicerades metoder inom produktutveckling för att ta fram en kritmekanism på ett ingenjörsmässigt sätt. Genom att följa [41] och metoderna i verket säkerställdes att produktutvecklingen skedde på ett sådant sätt. Det är dock värt att reflektera kring hur projektets avgränsningar och begränsningar påverkat den använda metodiken. Den största faktorn som påverkat metodiken är projektets tidsbegränsning på 4 månader. Då det inte direkt finns en generell riktlinje för hur lång tid ett produktutvecklingsprojekt bör ta, går det hävda att 4 månader är tillräckligt för att driva ett projekt från början till slut. I kontrast är det oundvikligt att delar som projektgruppens storlek, projektmedlemmarnas erfarenhet och projektmedlemmarnas övriga sysselsättning påverkar hur lång tid produktutvecklingen kommer ta.

Eftersom den huvudsakliga utvecklingen av kritmekanismen utfördes av två ingenjörstudenter som med halva sin studietid kvar utförde projektet på 50 procent är det inte orimligt att hävda att 4 månader kan vara för lite för att säkerställa att produkten är ingenjörsmässigt framtagen. För att kompensera för detta gjordes avgränsningen att endast en prototyp skulle byggas och att slutmodellen endast skulle göras som en CAD-modell. Då ingen slutmodell tillverkats är det svårt att hävda att den framtagna lösningen kommer att fungera som tänkt, men då en relativt omfattande och precis prototyp tillverkades som kunde testa många av slutprodukten funktioner talar det för att slutprodukten kommer fungera.

Det är även av intresse att diskutera hurvida produkten kommer att vara ekonomiskt lönsam, då produktutvecklingen skedde ur ett funktionellt perspektiv istället för ett kommersiellt. I och med att ingen kundundersökning genomfördes genererades inga kundbehov, vilket leder till att den framtagna produkten inte nödvändigtvis skulle kunna leda till ekonomisk vinst för det företag som vill implementera lösningen. Här bör det reflekteras över hurvida produktutvecklingen skett på ett ingenjörsmässigt sätt eftersom syftet med att ta fram en produkt oundvikligen är att den ska vara ekonomiskt lönsam.

I [41] beskrivs just hur upprättningen av krav på produkten ska baseras på information som hämtas både internt i produktutvecklingsteamet och externt från potentiella kunder och andra intressenter. Eftersom det huvudsakliga målet med kritmekanismen var att utveckla en mekanism som autonomt kunde applicera färg

på en gräsmatta snarare än att utveckla en produkt som skulle resultera i ekonomisk vinning gjordes bedömningen att utvecklingen kunde ske utan att samla in kundbehov.

3.4.2 Valet av komponenter till kritmekanismen

När valet av koncept var gjort övergick produktutvecklingsarbetet till att börja designa den framtida produkten. En CAD-modell skapades till konceptet, men modellen innehöll vid det laget bara generella komponenter och mycket tid lades på att bestämma exakt vilka specifika komponenter som skulle användas. Vid valet av komponenter användes information om alternativa lösningar för kritmekanismen som grund i många av de lägen när osäkerhet rådde kring hurvida en komponent skulle kunna klara av att uppfylla mekanismens funktioner eller inte. De mest kritiska delarna handlade om val av pump, slangar och munstycke.

Då medlemmarna som ansvarade för utvecklingen av mekanismen inte besatt erfarenhet och kunskap kring möjliga tänkbara pumpar gjordes valet av pump med utgångspunkt i vilken pump som återfinns i elektriska kritkärror. Genom intervjun med Roos [46] och sökningar på internet blev det tydligt att elektriska kritkärror använder elektriska membranpumpar. Även om den valda pumpen passar bra för ändamålet är det inte uteslutet att det finns en mer optimal pump. Författarna rekommenderar en noggrann analys av materialet i [47] för att kunna göra ett välgrundat beslut.

Liknande process och beslutsunderlag som för pumpen, användes för valet av slangar. Med det sagt går det att argumentera för att det mest troligt finns mer optimala slangar för appliceringsområdet. Genom att bara kolla på hur andra kritmekanismer löser problemet finns en chans att mer optimala sätt att lösa problemet på utesluts. I kontrast till det går det att hävda att de personer som ansvarat för utvecklingen av de alternativa lösningarna förmodligen och förhoppningsvis analyserat andra pumpar och slangar innan de valt just elektriska membranpumpar och armerade slangar med 10 mm i innerdiameter till kritmekanismer.

Valet av munstycke skedde egentligen enbart med tanken att minska kritmekanismens flöde. Dessutom analyserades enbart munstycken som finns för högtryckstvättar och liknande. Valet av munstycke föll helt enkelt på det minsta munstycket som hittades som fortfarande hade en spridning som inte resulterade i en punktstråle. Resultatet blev ett munstycke som fördelar ut färgen på ett sätt som tillfredsställer en linjebredd på 11 cm men med ett flöde som eventuellt skulle kunna reduceras. Enligt Roos [46] går cirka 8-10 liter färg åt till att krita en plan. Om kritningen sker manuellt tar den cirka 15 minuter, vilket resulterar i ett flöde på 0,53-0,67 l/min. Eftersom gräsklipparen just nu kör ganska mycket långsammare än en kvart för att krita en plan skulle det kunna vara mer rimligt att räkna på 45 minuter, vilket hade inneburit att flödet hade behövt reduceras till cirka 0,18-0,22 l/min.

3.4.3 Flödet genom munstycket är högre än förväntat

När flödet genom kritmekanismen analyserades resulterade det i ett högre flöde än väntat, vilket funktionstestet med avseende på färgflöde visade. Eftersom ingen ackumulering av vätskan sker i systemet är det förväntat att flödet in i systemet är samma som flödet ut ur systemet.

Det går att diskutera vad det högre flödet kan bero på och en teori är att ett läckage i anslutningen mellan pumpen och slangen på trycksidan kan ha orsakat skillnaden i flöde. Vid konstruktionen av kritmekanismen applicerades gängtejp på samtliga slangnipplar för att se till att inget vatten skulle läcka ut vid drift av pumpen. Vid de tester som utfördes noterades dock att anslutningen på pumpens trycksida inte var helt tät, vilket resulterade i att vatten läckte ut istället för att ta sig ut den tänkta vägen genom munstycket. Mängden vatten som läckte ut var svår att uppskatta men om skillnaden i flödet var 0,17 l/min och tiden för tömningen av tanken var 5,26 min skulle det innebära ett läckage på cirka 0,9 l. Genom okulär besiktning är det klart att anslutningen inte läckt särskilt mycket vatten under testet. Det är dock i det här sammanhanget värt att poängtera att det även fanns vatten kvar i behållaren vid tidens slut eftersom inte pumpen skulle gå torrt.

Vidare skulle det rimligtvis kunna vara så att vatten fanns kvar i pumpen när den stängdes av. Om vattnet i behållaren tillsammans med vattnet i pumpen skulle stå för 0,5-0,8 l av det beräknade läckta vattnet skulle det absolut inte vara omöjligt att anta att resterande del av det ökade flödet kan bestå av ett läckage på några dl. Skulle dessutom eventuella mätfel tas med i diskussionen går det att argumentera för att den uppmätta skillnaden i flöde kan förklaras.

3.4.4 Måluppfyllnad kritmekanism

När kritmekanismen analyseras utifrån de mål som sattes på mekanismen i början av projektet kan vissa slutsatser dras. Det första målet för kritmekanismen handlade om att linjebredden skulle vara 11 cm med en felmarginal på ± 1 cm. Det målet anses som uppfyllt då avskärmarna för mekanismen kan justeras enligt figur 3.27 till 11 cm. Det andra målet handlade om att kritmekanismen skulle klara av att krita en 11-mannaplan med den färg som fanns i behållaren. Detta mål uppfylldes inte då gräsklipparens låga hastighet i kombination med munstyckets höga flöde resulterade i att färgen i behållaren tog slut långt innan planen hade kritats färdigt.

I tabell A.1 framgår att en beräkning av mängden färg, som skulle krävas för att kunna krita hela planen, skulle göras om inte målet uppfyllts. Då gräsklipparens hastighet var så låg i kombination med det höga flödet av färg, skulle detta resultera i en orimlig mängd färg och beräkningen har därför valts att uteslutas. Det sista målet handlade om att kritmekanismen skulle sättas på och av på rätt ställe med en felmarginal på ± 2 cm och detta anses delvis avklarat. Färgen applicerades inom felmarginalen när pumpen sattes på, men det uppstod problem med att färgen fortsatte flöda ut ur munstycket ett tag efter att pumpen hade stängts av.

4

Slutsats och framtida arbeten

Projektet syftade till utveckling och styrning av en kritmekanism, som kunde integreras med en autonom gräsklippare, för att krita linjerna på en fotbollsplan. Efter att ha analyserat systemet går det konstatera att syftet i generella termer är uppnått. Av de åtta delmål som sattes upp, var det fem stycken som ansågs helt uppfyllda och ett som ansågs delvis uppfyllt. Resterande två ansågs inte vara uppfyllda.

Genom att kombinera odometrins höga uppdateringsfrekvens och RTK-mottagarens höga precision via ett Extended Kalman Filter togs ett system för linjeföljning fram. Gräsklipparen kunde då regleras och styras utefter både raka linjer och mer komplicerade geometrier, där både simulering och verklig körning visar på samstämmiga resultat. Resultaten kunde däremot variera vid körning på olika underlag och olika geometrier, vilket gör att den framtagna modellens robusthet kan ifrågasättas. Vidare har en kritmekanism konstruerats, vilket bevisade att det var möjligt att krita linjer på rätt ställe och med rätt bredd samtidigt som gräsklipparen följde linjer.

Även om syftet i stora drag är uppfyllt kan systemets förmåga att utföra sitt syfte analyseras. När projektet summeras är det tydligt att systemet inte kommer att kunna krita en hel fotbollsplan även om det har kapacitet till att krita linjer. Anledningen är att regleringen som krävs för att gräsklipparen ska kunna följa linjer på en fotbollsplan enligt önskad tolerans, gör gräsklipparen för långsam i relation till hur högt flödet av färg från den tillverkade kritmekanismen är. Detta leder till att en orimlig mängd färg krävs för att möjliggöra kritning av en fotbollsplan.

För att summera blir slutsatsen att även om systemet som utvecklats möjliggör kritning av linjer på en fotbollsplan och därmed visar på att de viktigaste principerna fungerar, är det inte kapabelt till att utföra kritningen av en hel fotbollsplan med endast en full behållare. För att klara av det krävs att gräsklipparens reglering justeras så att dess hastighet ökar samtidigt som designen av kritmekanismen ändras så att flödet av färg minskar.

Inför framtida arbeten rekommenderas att evaluera nuvarande uppsatta modell som används till styrning av gräsklipparen för att se vart vidareutveckling är möjligt. Det mesta som krävs för att kunna krita linjerna till en fotbollsplan finns i detta arbete, men den största felkällan är hastigheten gräsklipparen kör i för att upprätthålla den önskade precisionen. Därav hade ett möjligt framtida arbete kunna behandla utveckling av tillståndsestimeringen för att möjliggöra snabbare och mer precis körning.

Vidare är flödet av färg från kritmekanismen för högt i relation till gräsklipparens hastighet. Om flödet genom mekanismen skulle vara detsamma som det förväntade flödet genom munstycket hade det inneburit att gräsklipparen skulle behöva krita alla linjer på fotbollsplanen under 22,5 minuter. Detta under förutsättningen att 9 liter färg går åt till kritningen. Från intervjun med Roos framgick att cirka 8-10 liter går åt vid kritningen av en 11-mannaplan vilket innebär att ungefär samma mängd färg förväntas gå åt vid en autonom kritning. Vid längre tider skulle det innebära att flödet hade behövt minskas. Det enklaste sättet är att utforska mindre storlekar på munstyckets håldiameter och se hur håldiametern påverkar resterande delar av kritmekanismen. En annan möjlig lösning skulle kunna vara att strypa flödet in i systemet för att på så sätt ge ett lägre flöde. Ett alternativ är att montera någon form av strypning på pumpens insug-sida för att möjliggöra detta. Ett sista alternativ är att utforska en annan pump.

Systemet som har utvecklats är helt autonomt när all färg blandats och fyllts på i kritmekanismens behållare. Däremot behöver blandningen och påfyllnaden av färg i dagsläget skötas manuellt. I inledningen diskuterades möjligheterna och intresset av ett autonomt kritnings- och klippningssystem. Det indikerar att intresse finns för ett fullständigt autonomt system. En helt automatiserad färgblandning, påfyllnad och rengöring skulle då eventuellt kunna vara intressanta områden att utforska vidare. En möjlig lösning hade då varit att se om det går att integrera påfyllningen av färg i samband med att gräsklipparen laddas i laddstationen. En viktig parameter för autonom blandning av färgen är att färgen måste röras om kontinuerligt för att inte börja klumpa sig.

Litteratur

- [1] Svenska Fotbollsförbundet, “Fotbollen i Sverige”, [Online]. Tillgänglig: <https://www.svenskfotboll.se/landslag/media/info-svff/> (hämtad 2024-01-25).
- [2] Husqvarna, “Lägg mindre tid på klippning och mer fokus på att förbättra planen”, [Online]. Tillgänglig: <https://www.husqvarna.com/se/utforska-och-upptack/lagg-mindre-tid-pa-klippning-och-mer-fokus-pa-att-forbatta-planen/> (hämtad 2024-01-25).
- [3] Unisport, “Konstgräs fotboll”, [Online]. Tillgänglig: <https://www.unisport.com/sv/konstgras-fotboll> (hämtad 2024-01-25).
- [4] Svenska Fotbollsförbundet, “Konstgräshallar och planer i Sverige”, 2015, [Online]. Tillgänglig: https://fogis.se/ImageVault/Images/id_116110/scope_0/ImageVaultHandler.aspx (hämtad 2024-01-25).
- [5] Centrum för idrottsforskning, “Konstgräs = skador?”, 2013, [Online]. Tillgänglig: <https://www.idrottsforskning.se/wp-content/uploads/2014/04/Kort-idrottsforskning-nr3-2013.pdf> (hämtad 2024-01-25).
- [6] Folkhälsomyndigheten, “Fysisk aktivitet och stillasittande”, 2023, [Online]. Tillgänglig: <https://www.folkhalsomyndigheten.se/livsvillkor-levnadsvanor/mat-fysisk-aktivitet-overvikt-och-fetma/fysisk-aktivitet-och-stillasittande/> (hämtad 2024-01-25).
- [7] Naturvårdsverket, “Konstgräsplaners miljöpåverkan”, [Online]. Tillgänglig: <https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/plast/om-plast/konstgrasplaners-miljopaverkan/> (hämtad 2024-01-25).
- [8] Svenska Fotbollsförbundet, “Lösning - en fotbollsplan”, [Online]. Tillgänglig: <https://www.svenskfotboll.se/499f8a/globalassets/svff/dokumentdokumentblock/anlaggning/losning---1-fotbollsplan.pdf> (hämtad 2024-01-25).
- [9] SMHI, “Skalor för vindhastighet”, [Online]. Tillgänglig: <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/vind/skalor-for-vindhastighet-1.252> (hämtad 2024-05-01).
- [10] Husqvarna, *PD-InstallROS2forHRP2-100222-1151-32.pdf*.
- [11] Husqvarna, *PD-Hqvpublicinterface-110222-1013-48.pdf*.
- [12] Axelsson, J. Carlson, J. Malmström, G. Olson, J. Renberg, F. Öhlund, E., “Autonom robotgräsklippare: Autonom robotgräsklippare utvecklad för linjemålning och kamning av fotbollsplaner”, Kandidatarbete, Institutionen för elektroteknik, Göteborg, Sverige, 2023. Tillgänglig: <http://hdl.handle.net/20.500.12380/306551> (hämtad 2024-02-01).

- [13] Råd och Rön, “Robotarna som skonar igelkotten”, [Online]. Tillgänglig: <https://www.radron.se/var dagskunskap/robotarna-som-skonar-igelkotten/> (hämtad 2024-04-02).
- [14] S. L. Rasmussen, “10 steg till en igelkottsvänlig trädgård”, [Online]. Tillgänglig: <https://www.husqvarna.com/se/utforska-och-upptack/tio-tips-pa-hur-du-kan-gora-din-tradgard-igelkottsvanlig/> (hämtad 2024-04-02).
- [15] Husqvarna, “Frågor och svar om säkerhet för robotgräsklippare”, [Online]. Tillgänglig: <https://www.husqvarna.com/se/utforska-och-upptack/nyheter-och-media/fragor-och-svar-om-sakerhet-for-robotgrasklippare/> (hämtad 2024-04-02).
- [16] SISU förlag, “Svenska fotbollsförbundets spelregler 2024”, 2024, [Online]. Tillgänglig: <https://utbildning.sisuforlag.se/fotboll/tranare/domare/spelregler-for-fotboll-2024/regel-1-spelplanen/> (hämtad 2024-03-11).
- [17] Husqvarna, “Husqvarna 550 EPOS™”, Online. Tillgänglig: <https://www.husqvarna.com/se/robotgrasklippare/automower-550epos/> (hämtad 2024-03-15).
- [18] Husqvarna, “Husqvarna EPOS™-teknologi”, [Online]. Tillgänglig: <https://www.husqvarna.com/se/robotgrasklippare/automower-550epos/?feature=FEATURE74551694> (hämtad 2024-02-01).
- [19] Lantmäteriet, “RTK”, [Online]. Tillgänglig: <https://www.lantmateriet.se/sv/geodata/gps-geodesi-och-swepos/GPS-och-satellitpositionering/Metoder-for-GNSS-matning/RTK/> (hämtad 2024-03-11).
- [20] emlid, “Beginner’s Guide to Precise Positioning with RTK GNSS”, *RobotShop*, aug. 2020, [Online]. Tillgänglig: <https://community.robotshop.com/blog/show/introduction-to-precise-positioning-with-rtk-gnss> (hämtad 2024-03-11).
- [21] Jouav, “A Complete Guide to Inertial Measurement Unit (IMU)”, Oktober 2023, [Online]. Tillgänglig: <https://www.jouav.com/blog/inertial-measurement-unit.html> (hämtad 2024-03-15).
- [22] D. G. Alciatore, *Introduction to mechatronics and measurement systems*, 5. utg. New York, USA: McGraw-Hill Education, 2019.
- [23] A. Sofwan, H. R. Mulyana, H. Afrisal och A. Goni, “Development of Omni-Wheeled Mobile Robot Based-on Inverse Kinematics and Odometry”, i *2019 6th International Conference on Information Technology, Computer and Electrical Engineering (ICITACEE)*, 2019, s. 1–6. DOI: 10.1109/ICITACEE.2019.8904418.
- [24] F. M. Tseeva, M. M. Shogenova, K. M. Senov, I. A. Nogerov och A. M. Bozi-eva, “Simulation of a Differential Robot Drive in Gazebo”, i *2023 International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS)*, 2023, s. 175–178. DOI: 10.1109/ITQMTIS58985.2023.10346385.

-
- [25] J. Heikkinen, T. Minav och A. D. Stotckaia, “Self-tuning parameter fuzzy PID controller for autonomous differential drive mobile robot”, i *2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM)*, 2017, s. 382–385. DOI: 10.1109/SCM.2017.7970592.
- [26] Mathworks, “Extended Kalman Filters”, [Online]. Tillgänglig: <https://se.mathworks.com/help/fusion/ug/extended-kalman-filters.html> (hämtad 2024-04-06).
- [27] M. Tradacete, Á. Sáez, J. F. Arango m. fl., “Positioning System for an Electric Autonomous Vehicle Based on the Fusion of Multi-GNSS RTK and Odometry by Using an Extented Kalman Filter”, i *Advances in Physical Agents*, R. Fuentetaja Pizán, Á. García Olaya, M. P. Sesmero Lorente, J. A. Iglesias Martínez och A. Ledezma Espino, utg., Cham: Springer International Publishing, 2019, s. 16–30, ISBN: 978-3-319-99885-5.
- [28] Open Robotics, “Basic Concepts”, [Online]. Tillgänglig: <https://docs.ros.org/en/humble/Concepts/Basic.html> (hämtad 2024-03-14).
- [29] Tully Foote, “Husqvarna Research Platform”, maj 2016, [Online]. Tillgänglig: <https://www.ros.org/news/2016/05/husqvarna-research-platform.html> (hämtad 2024-03-14).
- [30] ISO, “ISO 11898-1:2015(en) Road vehicles — Controller area network (CAN)”, dec. 2015, [Online]. Tillgänglig: <https://www.iso.org/standard/63648.html> (hämtad 2024-04-06).
- [31] SSH, “What is SSH (Secure Shell)?”, [Online]. Tillgänglig: <https://www.ssh.com/academy/ssh#the-ssh-protocol> (hämtad 2024-04-16).
- [32] J. Butts, “What is the Raspberry Pi”, sept. 2021, [Online]. Tillgänglig: <https://www.howtogeek.com/754492/what-is-raspberry-pi/> (hämtad 2024-04-08).
- [33] S. E. Mathe, A. C. Pamarthy, H. K. Kondaveeti och S. Vappangi, “A Review on Raspberry Pi and its Robotic Applications”, i *2022 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Signal Processing (AISP)*, 2022, s. 1–6. DOI: 10.1109/AISP53593.2022.9760590.
- [34] B. Lennartsson, *Reglerteknikens grunder*. Studentlitteratur, 2011.
- [35] PID Explained, “PID controller explained”, [Online]. Tillgänglig: <https://pidexplained.com/pid-controller-explained/> (hämtad 2024-03-20).
- [36] ni, “The PID Controller and Theory Explained”, mars 2023, [Online]. Tillgänglig: <https://www.ni.com/en/shop/labview/pid-theory-explained.html> (hämtad 2024-03-20).
- [37] C.-L. Shih och L.-C. Lin, “Trajectory Planning and Tracking Control of a Differential-Drive Mobile Robot in a Picture Drawing Application”, *Robotics*, årg. 6, nr 3, 2017, ISSN: 2218-6581. DOI: 10.3390/robotics6030017. Tillgänglig: <https://www.mdpi.com/2218-6581/6/3/17>.
- [38] Husqvarna, *PD-ROS2autostart-100222-1156-36.pdf*.
- [39] Husqvarna, *PD-Run2HRP2RosSWexamples-100222-1156-34.pdf*.

- [40] noelan01, *Autonomous-Lawnmower*, Kandidatarbete autonom gräsklippare 2024, febr. 2024. Tillgänglig: <https://github.com/noelan01/Autonomus-Lawnmower> (hämtad 2024-04-11).
- [41] K.T. Ulrich och S.D. Eppinger, *Produktutveckling: Konstruktion och design*. 2012.
- [42] J. Burenius och P. Lindstedt, *The value model: How to master product development and create unrivalled customer value*. 2006.
- [43] G. Pahl, J. Feldhousen, K.H. Grote och W. Beitz, *Engineering Design: A systematic approach*. 2007.
- [44] Turftank, "TURF TANK TWO", 2024, [Online]. Tillgänglig: <https://turftank.com/se/turf-tank-two/> (hämtad 2024-02-13).
- [45] Turftank, "HOW TO ACHIEVE CENTIMETER-LEVEL ACCURACY IN LINE MARKING", 2024, [Online]. Tillgänglig: <https://turftank.com/us/base-station-benefits/> (hämtad 2024-02-13).
- [46] J. Roos, Personlig kommunikation, april 2024.
- [47] Björkner. M, Process Contract Scandinavia AB, *Pumphandboken*. 2010.
- [48] Högtrycksdelar, "Munstycke 1/8", [Online]. Tillgänglig: <https://www.hogtrycksdelar.se/search?q=> (hämtad 2024-04-30).
- [49] El Procus, "What is a 5V Relay Module : Working & Its Applications", [Online]. Tillgänglig: <https://www.elprocus.com/5v-relay-module/> (hämtad 2024-04-26).

A

Appendix

A.1 Måltabell

Tabell A.1: Målsättning

Kriterium	Målvärde	Felmarginal	Krav	Verifieringsmetod
Bredd på linje	11 cm	+/- 1 cm	Krav	Mäta bredd på en kriad linje.
Kritning	En 11-manna plan		Krav	Krita en 11-manna plan och kontrollera att färgen räcker. Om ej möjligt att krita en hel plan - krita en mindre del och gör beräkningar på att färg i behållare räcker till en 11-manna plan.
Kritmekanism	Öppna / stäng ventil	+/- 2 cm	Krav	Kontrollera att kritning av linjer sker på rätt ställe genom öppning och stängning av ventil på kommando.
Trådlös styrning			Krav	Test på öppen yta.
Köra rakt	50 m	1 cm / m	Krav	Kör gräsklipparen 50 m och mät avvikelser per meter.
Köra i en cirkel	Kriad radie = Önskad radie	1 cm / m radie	Krav	Kör gräsklipparen i en cirkel med given diameter och mät avvikelser.
Positionering	Ta sig till ombedd position	30 cm	Krav	Ange position till gräsklippare och mät sedan avvikelser.
Projektbudget	5000 kr		Krav	Kostnadsberäkning av projektets utgifter.

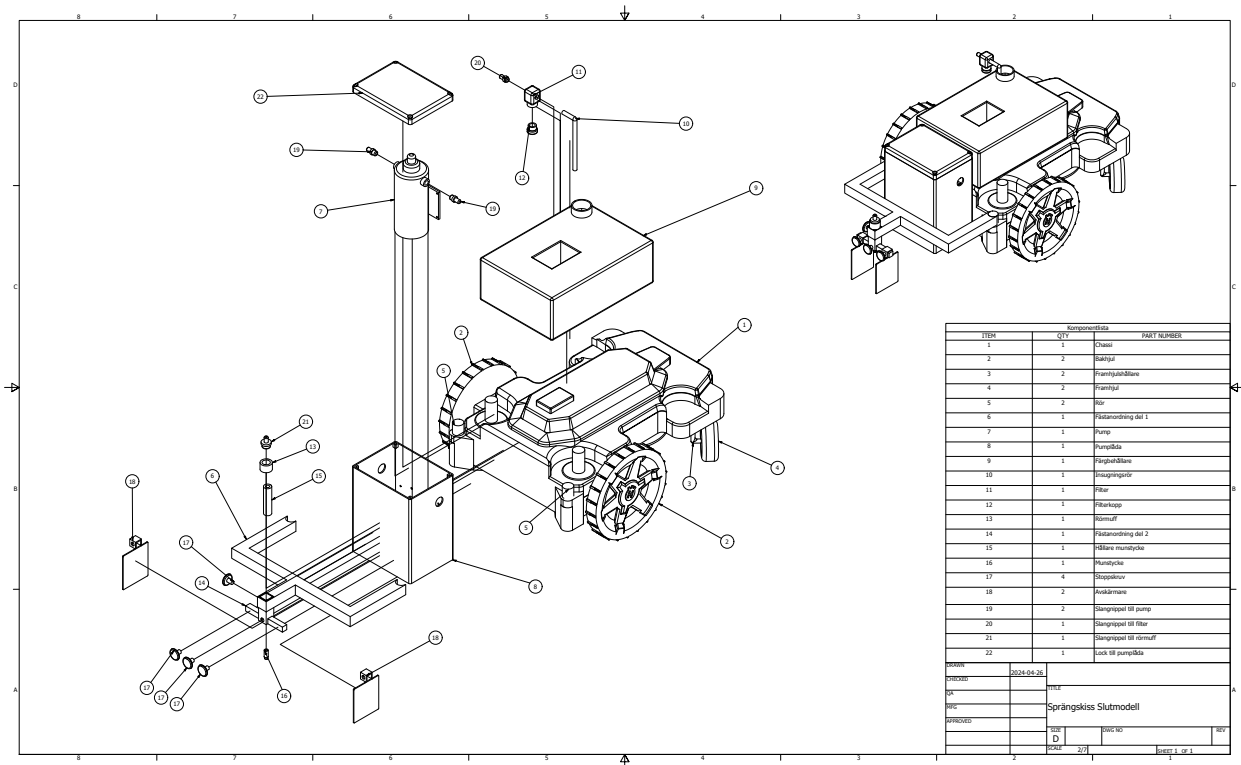
A.2 Fullständig elimineringsmatris

Tabell A.2: Elimineringsmatris

Koncept	Låg vikt	Tillräckligt färgflöde	Tillräcklig noggrannhet	Påfyllning av behållare
1	+	+	+	+
2	+	+	+	+
3	+	+	+	-
4	+	+	+	-
9	+	+	+	+
10	+	+	+	+
11	+	+	+	-
12	+	+	+	-
17	+	+	+	+
18	+	+	+	+
19	+	-		
20	+	-		
21	+	+	+	+
22	+	+	+	+
23	+	+	+	-
24	+	+	+	-
25	+	+	+	-
26	+	+	+	-
27	+	+	+	-
28	+	-		
41	+	+	+	+
42	+	+	+	+
43	+	-		
44	+	-		
45	+	+	+	+
46	+	+	+	+
47	+	+	+	-
48	+	+	+	-
49	+	+	+	-
50	+	+	+	-
51	+	-		
52	+	-		
65	+	-		
66	+	-		
67	+	-		
68	+	-		
69	+	-		
70	+	-		

71	+	-		
72	+	-		
73	+	-		
74	+	-		
75	+	-		
76	+	-		
89	+	+	-	
90	+	+	-	
91	+	+	-	
92	+	+	-	
97	+	+	-	
98	+	+	-	
99	+	+	-	
100	+	+	-	
105	-			
106	-			
107	-			
108	-			

A.3 Sprängskiss på slutmodell



Figur A.1: Sprängskiss och komponentlista till slutmodell

Komponentlista							
ITEM	QTY	PART NUMBER					
1	1	Chassi					
2	2	Bakhjul					
3	2	Framhjulshållare					
4	2	Framhjul					
5	2	Rör					
6	1	Fästanordning del 1					
7	1	Pump					
8	1	Pumplåda					
9	1	Färgbehållare					
10	1	Insugningsrör					
11	1	Filter					
12	1	Filterkopp					
13	1	Rörmuff					
14	1	Fästanordning del 2					
15	1	Hållare munstycke					
16	1	Munstycke					
17	4	Stoppskruv					
18	2	Avskärmare					
19	2	Slangnippel till pump					
20	1	Slangnippel till filter					
21	1	Slangnippel till rörmuff					
22	1	Lock till pumplåda					
DRAWN	2024-04-26	TITLE Sprängskiss Slutmodell					
CHECKED							
QA							
MFG							
APPROVED							
		SIZE	D	DWG NO		REV	
		SCALE	2/7	SHEET 1 OF 1			

Figur A.2: Komponentlista till slutmodell

A.4 Pumpmanual

21154

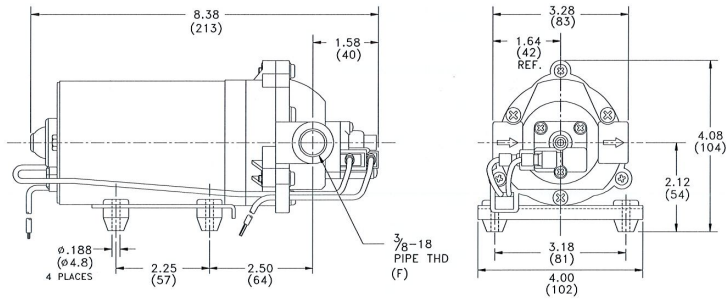
SHURflo
First in Fluid Innovation™

PRODUCT DATA SHEET
MODEL: 8000-543-236

SPECIFICATIONS:

MODEL NUMBER: 8000-543-236
PUMP DESIGN: Positive Displacement 3 Chamber Diaphragm Pump
CHECK VALVE: (1-Way Operation) Prevents Reverse Flow
CAM: 3.0 Degree
MOTOR: Permanent Magnet, P/N 11-111-00
VOLTAGE: 12 VDC Nominal
PRESSURE SWITCH: Adjustable Shut-Off (Range 40-60 PSI)
 Factory Set @ 60 PSI, Turn On 45 PSI ± 5 PSI
LIQUID TEMPERATURE: 170 Degrees Fahrenheit (77 Degrees Centigrade) Max.
PRIME: Self-Priming Up To 5 Ft. Vertical,
 Max. Inlet Pressure 30 PSI (2.1 Bar)
PORTS: 3/8"-18 NPT Female
MATERIAL OF CONSTRUCTION:
PLASTICS- Polypropylene
VALVES- Viton
DIAPHRAGM- Santoprene
FASTENERS- Zinc Plated Steel
NET WEIGHT: 4.1 Lbs (1.9 Kg)
DUTY CYCLE: Continuous (See Temperature Rise Chart)
TYPICAL APPLICATIONS: Agricultural Spraying

DIMENSIONS:

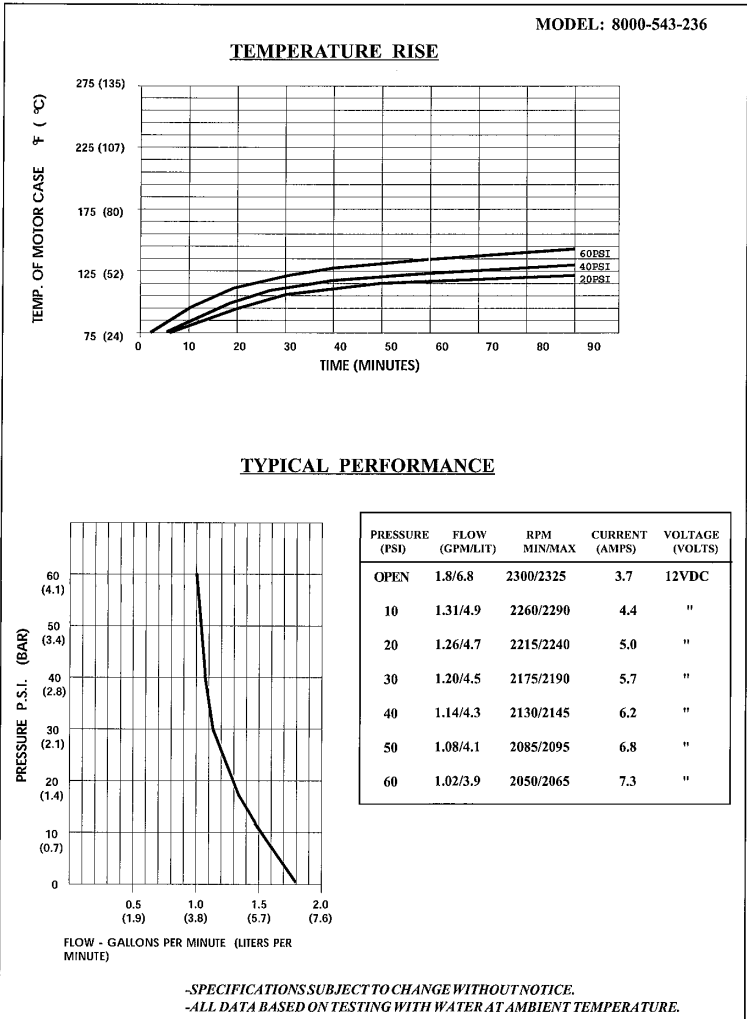


FILE # 8000-543-236

REVISED: 6/04

ISSUED: 5/21/90

Figur A.3: Pumpmanual



5900 KATELLA AVENUE, CYPRESS CA. 90630 (562) 795-5200 (800) 854-3218 FAX (562) 795-7554
 SHURflo EAST, 52748 PARK SIX COURT, ELKHART, IN 46514 (574) 262-0478/(800) 762-8094/FAX (574) 264-2169 SHURflo LIMITED, UNIT 5,
 STERLING PARK, GATWICK ROAD, CRAWLEY, WEST SUSSEX, RH10 2QT, UK 44 (0) 1293-424-000 FAX 44 (0) 1293-421-880

Figur A.4: Pumpmanual

Institutionen för elektroteknik
Chalmers Tekniska Högskola
Göteborg, Sverige
www.chalmers.se



CHALMERS