

Noggrannhet av RTK-GPS-positionering av enskilda frön vid precisionssådd



Christoffer Pålsson Andersson
Oskar Wikfeldt

Division of Industrial Electrical Engineering and Automation
Faculty of Engineering, Lund University

Examensarbete för civilingenjörsexamen i maskinteknik

Noggrannhet av RTK-GPS-positionering av enskilda frön vid precisionssådd

Christoffer Pålsson Andersson och Oskar Wikfeldt

Handledare: Gunnar Lindstedt, IEA
Examinator: Johan Björnstedt, IEA



Avdelningen för industriell elektroteknik och automation (IEA), Institutionen
för biomedicinsk teknik, Lunds Tekniska Högskola, Lunds Universitet

Juni 2023

Abstract

With higher demands on farmers to reduce the usage of fertilizers and pesticides because of their negative environmental impact, as well as the rising prices of resources required for agriculture, precision agriculture has become a big focus in today's agriculture research. Individual plant care systems are a big part of precision agriculture, and accurate information about the positions of individual plants is required for these systems. In collaboration with RISE Research Institutes of Sweden and Väderstad AB, a seed mapping system for the planter Väderstad Tempo was developed. The system was designed to determine the individual seed positions by receiving geographical coordinates from a real time kinematic global positioning system (RTK-GPS) in conjunction with signals from the seed sensor already installed on the planter. A secondary task in the project was to isolate the error sources which would affect the final error of the positioning. Variation in the GPS system's reported coordinates as well as variation in the seed fall time from the seed sensor to the ground were investigated.

Seed fall times were measured in laboratory conditions where the type of crop, air pressure in the seed housing, and angular velocity of the seed disc were varied in order to build a mathematical model of the seed fall time. The deviation metric *root mean squared error* (RMSE) of maize, sunflower, sugar beet, and cereal were 2.97 ms, 4.58 ms, 1.72 ms and 3.23 ms respectively.

Measurement of the variation of the RTK-GPS system was conducted in conjunction with the final tests of the system in a field. On average, the latitude and longitude had a RMSE of 4.17×10^{-8} degrees and 6.38×10^{-8} degrees respectively, which corresponded to a RMSE of 4.6 mm northing and 4.0 mm easting at the specific location of the measurements.

The seed mapping system was tested in a field under operation velocities in the range 5–15 km/h with the crops maize and cereal. After the seed mapping process, the seeds were found and positioned in a combination of RTK-GPS and manual measuring in order to determine their actual position. In the planter's driving direction, it was found that a seed could be found within a distance of 62.34 mm of a mapped seed position with a 95 % probability.

The errors investigated for the seed fall times and RTK-GPS measurements turned out to only account for a small part of the total error of the seed mapping system. The remaining error stems from other parts of the process and needs to be investigated further.

Sammanfattning

Med ökade krav på lantbrukare att minska användningen av gödningsmedel och bekämpningsmedel på grund av deras negativa miljöpåverkan, samt de stigande priserna på resurser som krävs för jordbruk, har precisionsjordbruk blivit ett stort fokus inom dagens jordbruksforskning. Individuella plantvårdssystem är en stor del av precisionsjordbruket, och noggrann information om positionerna för enskilda frön krävs för dessa system. I samarbete med RISE Research Institutes of Sweden och Väderstad AB har ett frökartläggningssystem för såmaskinen Väderstad Tempo utvecklats. Systemet är utformat för att bestämma de enskilda frönas positioner genom att ta emot geografiska koordinater från ett *real time kinematic global positioning system* (RTK-GPS) i kombination med signaler från frösensorerna som redan är installerad på såmaskinen. En sekundär uppgift i projektet var att isolera felkällorna som skulle påverka det slutliga felet hos positioneringen. Variationen i GPS-systemets rapporterade koordinater samt variationen i fröfalltiden från frösensorerna till marken undersöktes.

Fröfalltider mättes under laboratorieförhållanden där grödtypep, lufttryck i såhuset och såskivans vilkelhastighet varierades för att bygga en matematisk modell för fröfalltiden. Avvikelsemålet RMS-fel för majs, solros, sockerbetor och spannmål var 2,97 ms, 4,58 ms, 1,72 ms respektive 3,23 ms.

Mätning av variationen i RTK-GPS-systemet genomfördes i samband med de slutliga testerna av systemet på ett fält. I genomsnitt hade latitud och longitud ett RMS-fel på $4,17 \times 10^{-8}$ grader respektive $6,38 \times 10^{-8}$ grader, vilket motsvarade ett RMS-fel på 4,6 mm norrut och 4,0 mm österut på den specifika platsen för mätningarna.

Frökartläggningssystemet testades på ett fält med driftshastigheter inom intervallet 5–15 km/h med grödorna majs och spannmål. Efter frökartläggningsprocessen lokaliserades och positionerades fröna i en kombination av RTK-GPS och manuell mätning för att bestämma deras faktiska position. I såmaskinens färdriktning visade det sig att ett frö kunde hittas inom en avstånd på 62,34 mm från en kartlagd fröposition med en sannolikhet på 95 %.

De fel som undersöktes för fröfallstiderna och RTK-GPS-mätningar visade sig bara utgöra en liten del av den totala felet i frökartläggningssystemet. Återstående fel kommer från andra delar av processen och behöver undersökas vidare.

Förord

Vi vill tacka flera personer som har varit med och stöttat detta projekt, både fysisk men även med kunskap och råd. Detta projekt initierades, vägledades och möjliggjordes tack vare Per-Anders Algerbo och Mikael Gilbertsson från RISE Research Institutes of Sweden. Tack vare deras kunskap och kontaktnät kunde detta projekt utvecklas till ett stort samarbete mellan olika aktörer. Utöver detta vill vi även tacka Avdelningen för industriell elektroteknik och automation för utlåning av lokaler, kunskap och materiel. Ett särskilt tack till Gunnar Lindstedt och Getachew Darge för att ha väglett och assisterat projektet. Även ett stort tack till Avdelningen för industriell produktion som lånade ut 3D-skrivare, svets och svarv. Vi vill även tacka för det viktiga samarbetet med Väderstad och möjligheten att använda deras testmaskiner. Ett extra tack till Lars Thylén och Olof Andersson för att ha samarbetat med projektet och bidragit med ovärderlig kunskap. Slutligen vill vi tacka Borgeby Fältdagar för lån av fält och maskiner för att möjliggöra tester.

Arbetet i detta projekt fördelades jämnt mellan författarna.

Lund, juni 2023

Christoffer Pålsson Andersson & Oskar Wikfeldt

Innehåll

| | |
|--|------------|
| Abstract | i |
| Sammanfattning | ii |
| Förord | iii |
| 1 Introduktion | 1 |
| 1.1 Bakgrund | 1 |
| 1.2 Mål | 2 |
| 1.3 Avgränsingar | 2 |
| 2 Teori | 4 |
| 2.1 GNSS och RTK | 4 |
| 2.2 Geografiska koordinatsystem | 5 |
| 2.2.1 Projektion till kartesiska koordinater | 5 |
| 2.3 Statistiska metoder | 6 |
| 3 Material och metodik | 8 |
| 3.1 Hårdvara | 8 |
| 3.1.1 Mikrokontrollerkort | 10 |
| 3.1.2 GNSS-mottagare | 10 |
| 3.1.3 Inklinometer | 10 |
| 3.1.4 Precisionssåmaskin | 10 |
| 3.1.5 Övrig hårdvara | 10 |
| 3.2 Konfigurering av GNSS-mottagaren | 11 |
| 3.2.1 Korrektionssignaler | 11 |
| 3.2.2 Satellitkonstellationer | 11 |
| 3.2.3 Data-porten | 12 |
| 3.2.4 Radio-porten | 12 |
| 3.3 Registrering av frön | 12 |
| 3.4 Datainsamling | 13 |
| 3.5 Tolkning av data | 13 |
| 3.5.1 Tolkning av UBX | 13 |
| 3.5.2 Tidssynkronisering | 14 |
| 3.5.3 Interpolering av positionsserie | 14 |
| 3.6 Mätning av fröfalltid | 14 |
| 3.6.1 Bakgrund | 14 |
| 3.6.2 Metodik | 15 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.7 | Mätning av varians hos GNSS-mottagaren | 16 |
| 3.8 | Fälttest i Mjölby | 16 |
| 3.9 | Fälttest i Borgeby | 17 |
| 3.9.1 | Försöksuppställning | 17 |
| 3.9.2 | Inmätning | 18 |
| 3.9.3 | Dataanalys | 19 |
| 4 | Resultat och Diskussion | 23 |
| 4.1 | Mätning av fröfalltid | 23 |
| 4.2 | Mätning av varians hos GNSS-mottagare | 26 |
| 4.3 | Fälttest i Mjölby | 27 |
| 4.4 | Fälttest i Borgeby | 27 |
| 4.5 | Slutsatser | 32 |
| 4.6 | Framtida arbete | 33 |
| | Litteraturförteckning | 34 |

Kapitel 1

Introduktion

1.1 Bakgrund

2050 är decenniet som den Europeiska unionen ska bli den första klimatneutrala regionen enligt avtalet *Den europeiska gröna given*. Som en av de stora strategierna läggs strategin *Från jord till bord* fram med målet att minska miljöpåverkan inom hela matkedjan, både inom medlemsländer och för länder som import sker via. Europeiska kommissionen anser att lantbruk i alla dess former påverkar ekonomi, motståndskraft vid kriser, biodiversitet, djur, insekter, fåglar, vattenkvalitet och markkvalitet. Strategin avser att på ett ekonomiskt och hållbart sätt för alla aktörer omvandla den europeiska matproduktionen i linje med 17 mål uppsatta av Förenta nationerna [1, 2].

För att kunna uppnå målen måste bland annat ny teknik presenteras och implementeras [3–5]. Med ny teknik anser Europeiska kommissionen att vad som sprids ut på fält kan minskas avsevärt. En minskning av kemikalier och gödningsmedel ska ha effekten av sänkt miljöpåverkan, detta då det tros att läckage av gödning skapar överskott av kväve och fosfor som ger till exempel mass-algblomning och försurning av vattendrag. Läckage av kemikalier anses bidra till död bland essentiella pollinatörer och djurliv samt riskera att förgifta vattendrag [6, 7]. Ytterligare anses det ha ekonomiskt intresse att kontrollera spridningen av kemikalier, utsäde och gödning. För den enskilda producenten borde relativt billig teknik kunna spara in på allt dyrare resurser. Förutom ren kostnadsbesparing tros det att producenter som tidigt kan erbjuda hållbar mat kan använda detta som ett varumärke för ökad konkurrenskraft. Det argumenteras även att ifall beroendet av dessa resurser minskar kommer säkerheten i matproduktionen öka mot kriser inom leveranser som har upplevts under bland annat Covid-19-pandemin [8].

Dagens teknik har inte en stark adoption inom alla unionens medlemsländer. För att öka utnyttjandet av både nutida och framtida tekniker har det föreslagits att Europa ska spendera 10 miljarder kronor på forskning inom teknik för matproduktion. Ett annat mål inom strategin är tillgänglighet till snabbt bredband på landsbygden för att möjliggöra molnlagring för alla aktörer inom matkedjan och möjliggöra för precisionsodling i hela Europa [8].

Digitaliseringens framfart presenterar nya koncept inom precisionsodling och andra lantbrukssektorer. Med relativt billiga sensorer och möjlighet till lagring av stora mängder data kan avancerade informationstekniska metoder tillämpas för att göra användbara förutsägelser inom lantbruket [9–13]. Med förutsägbarheten kan styrsystem appliceras på flertalet sätt för att effektivisera lantbruket. Några exempel på effektiviseringar av styrsystem är avstängning av sektioner på maskiner då överlapp mot tidigare körningar sker, och styrning vid spridning av gödning, bekämpningsmedel och utsäde [14, 15].

Som tidigare nämnts är en minskning av användandet av bekämpnings- och gödningsmedel nödvändigt. System existerar idag som med hjälp av vetenskapen om plantors position autonomt kan sprida bekämpnings- och gödningsmedel på individuell plantnivå, vilket reducerar användandet av medlen [16, 17]. Dessutom finns autonoma system som kan utföra mekanisk ogräsbekämpning genom både rad- och i-radhackning givet att plantornas positioner är kända [18–21]. Kamera- eller laserteknologi används i majoriteten av dessa system för att ta reda på plantornas positioner. Positionering av plantor i syfte av att utföra individuell plantvård kan även utföras genom frökartläggning vid sådd med GPS-teknologi [22, 23]. Ett system som detta kan även underlätta vid optimering och diagnostisering av såmaskinens prestanda i realtid [24].

1.2 Mål

Detta är ett arbete i samarbete med RISE och Väderstad med målet att utveckla ett frökartläggningssystem. Systemet fästs på en av såhneterna hos Väderstads såmaskin Tempo, och består huvudsakligen av en GNSS-mottagare för bestämning av position, en fröräknare vilken ger en signal när ett frö färdas genom såröret, en inklinometer för att kunna veta såmaskinens lutning, och ett datainsamlingssystem där framtagning av detta också ingår i detta arbete. Evaluering av systemet sker i två delar. Först sås frön på ett fält med såmaskinen med frökartläggningssystemet installerat för att samla in data. Efter detta mäts de sådda fröna in i en blandning av manuell mätning med måttband och mätning med GNSS-mottagaren. Resultatet av detta experiment är skillnaden mellan de registrerade positionerna från frökartläggningssystemet och de faktiska uppmätta positionerna.

Dessutom är ett mål med detta arbete att i så stor mån som möjligt individuellt mäta hur mycket de olika bidragande felkällorna bidrar till det totala felet i systemet. De felkällor undersöks individuellt är

- Varians i frönas falltid från fröräknaren ned till marken
- Varians i GNSS-mottagarens rapporterade position

Det totala felet hos en enskild planta ε_{tot} kan uttryckas som

$$\varepsilon_{\text{tot}} = \varepsilon_{\text{falltid}} + \varepsilon_{\text{GPS}} + \varepsilon_{\text{okänt}} \quad (1.1)$$

1.3 Avgränsingar

En del avgränsningar placeras på arbetet. Arbetet, inom den förbestämda tidsramen av första halvåret av 2023, utförs av två maskiningenjörsstudenter där

det utformas efter studenternas erfarenheter från studier inom mekatronik. Systemet byggs på färdiga elektronikkomponenter i konsumentklass, där priset av varje komponent försöks hållas till endast några tusen kronor. Ingen hänsyn tas i hur systemet hade sett ut i ett verkligt produktionsscenario. Systemet anpassas även endast till att kunna integreras med en Väderstad Tempo. Vid evaluering av systemets totala noggrannhet undersöks som tidigare nämnts endast felet längdmässigt i såfåran. Denna avgränsning görs i mån av tid, då undersökning av felet tvärsgående mot såfåran hade tagit mycket längre tid. Detta hade inneburit färre datapunkter eftersom den tillgängliga tiden ute på fält är begränsad. Slutligen kan det nämnas att ett verkligt frökartläggnings-system hade genererat stora datamängder som inte hade varit enkla att hantera. I detta arbete samlas det endast in tillräckligt med data för att kunna evaluera systemets noggrannhet, ingen hantering av stora mängder data undersöks.

Kapitel 2

Teori

2.1 GNSS och RTK

Global Navigation Satellite Systems (GNSS) är ett samlingsnamn för system bestående av satellitkonstellationer som möjliggör global positionering (latitud, longitud och elevation). System av denna typ som finns i dagsläget är USA:s Global Positioning System (GPS), Rysslands Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS), Europeiska unionens Galileo, och Kinas BeiDou Navigation Satellite System (BDS) [25].

Satelliter i en GNSS-konstellation utsänder radiovågor innehållande information om satellitens tid och position samt annan användbar data. Denna information kan en GNSS-mottagare ta emot och använda för att beräkna avståndet till varje satellit som den har radiokontakt med. Mottagaren behöver ha radiokontakt med minst fyra satelliter för att kunna beräkna sin position samt det exakta klockslaget. I många fall har man tillgång till fler än fyra satelliter, detta gör positions- och tidsbestämningen mer noggrann [26].

Det finns flera felkällor i GNSS-system som bidrar till felaktigheter i positionsbestämningen. Vissa av felen går ej att kompensera för, men hos två närliggande mottagare kommer många av felen att uppenbara sig på samma sätt i båda mottagarna. Detta eftersom felen beror på lokala effekter, som påverkan på ljusets hastighet i troposfären och jonosfären, och felaktigheter i satelliternas rapporterade tid och position. Genom att placera en av mottagarna stationärt på en känd position, går det att räkna ut avståndsfelet mellan denna mottagare, som kallas för *basmottagaren*, och varje satellit i omgivningen. Dessa fel rapporteras sedan i vad som kallas för korrrektionssignaler, vanligtvis i protokollet NTRIP, till mottagaren med okänd position, som kallas för *rovermottagaren*. Rovermottagaren subtraherar felen från sitt uppmätta avstånd till varje satellit, vilket resulterar i en mätosäkerhet på centimeternivå. Ett samlingsnamn för system som nyttjar denna princip är *Differential GNSS* (DGNSS). *Real Time Kinematic* (RTK) är ett exempel på ett DGNSS-system som är mycket vanligt, där korrektionsprocessen sker i realtid [26].

Avståndet mellan basmottagaren, också kallad *referensstationen*, och rovermot-

tagaren kallas för *baseline*. En större baseline gör att felen hos rovermottagaren och referensstationen stämmer sämre överens vilket resulterar i att den slutliga positioneringen blir mindre noggrann [26]. För en pålitlig positionering med en enskild referensstation får baseline ej överstiga 10–20 km. Det hade varit mycket resurskrävande att exempelvis installera referensstationer som täcker ett helt land enligt detta krav. Således används ofta istället flera referensstationer vid korrektionssignalsgenerering i något som kallas *Nätverks-RTK*. Nätverks-RTK innebär att man interpolerar felen från flera referensstationer runtom rovermottagaren för att virtuellt flytta observationerna till närheten av rovermottagarens position. Med denna metod kan man minska antalet referensstationer från ungefär 30 per 10 000 km² till 5–10 per 10 000 km² [27, 28].

Den svenska myndigheten Lantmäteriet erbjuder ett stödsystem för satellitnavigering kallat Swepos. Swepos är en abonnemangstjänst bestående av ett nätverk av referensstationer som har täckning över hela Sverige [29, 30].

2.2 Geografiska koordinatsystem

Positioner på jordens yta beskrivs enligt ISO 19111 i form av longitud och latitud [31]. Longitud definieras av vinkeln i relation till nollmeridianen, definierad 1884 att passera genom Greenwich, England. På andra sidan av jorden ligger 180-graders meridianen. Latitud definieras av vinkeln i relation till ekvatorn där nordpolen har det maximala värdet 90 grader nordlig riktning och sydpolen 90 grader sydlig riktning. En grad kan delas in i 60 minuter, och en minut kan delas in i 60 sekunder.

2.2.1 Projektion till kartesiska koordinater

För de flesta tillämpningar krävs det att de polära koordinaterna (latitud och longitud) omvandlas till kartesiska koordinater. En vanlig projektion är *Gauss-Krüger-projektionen*, som är en transversal Mercator-projektion. En punkt på jorden med latitud φ och longitud λ kan omvandlas till en N-koordinat y och E-koordinat x relativt medelmeridianen λ_0 [32, 33]:

$$y = R \left[\xi + g_1 \sin(2\xi) \cosh(2\eta) + g_2 \sin(4\xi) \cosh(4\eta) + g_3 \sin(6\xi) \cosh(6\eta) + g_4 \sin(8\xi) \cosh(8\eta) \right] \quad (2.1)$$

$$x = R \left[\eta + g_1 \cos(2\xi) \sinh(2\eta) + g_2 \cos(4\xi) \sinh(4\eta) + g_3 \cos(6\xi) \sinh(6\eta) + g_4 \cos(8\xi) \sinh(8\eta) \right] \quad (2.2)$$

där

$$\begin{aligned}
 e &= 8,181\,919\,104\,281\,579 \times 10^{-2} \quad (\text{jordens excentricitet}) \\
 R &= 6,367\,449\,145\,771\,05 \times 10^6 \text{ m} \quad (\text{jordens radie}) \\
 g_1 &= 8,377\,318\,247\,3 \times 10^{-4} \\
 g_2 &= 7,608\,527\,788\,8 \times 10^{-7} \\
 g_3 &= 1,197\,638\,019\,2 \times 10^{-9} \\
 g_4 &= 2,443\,376\,242\,5 \times 10^{-12}
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

och

$$\begin{aligned}
 b &= \arctan \left(\tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \left(\frac{1 - e \sin \varphi}{1 + e \sin \varphi} \right)^{\frac{e}{2}} \right) 2 - \frac{\pi}{2} \\
 \eta &= \operatorname{arctanh}(\sin(\lambda - \lambda_0) \cos b) \\
 \xi &= \arctan \left(\frac{\tan b}{\cos(\lambda - \lambda_0)} \right).
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

I Sverige används denna projektion till många tillämpningar i ett system som kallas för SWEREF 99. På nationell nivå används SWEREF 99 TM, där medelmeridianen λ_0 ansätts till $15^\circ 00'$ vilket är en meridian som ligger centrerad på Sverige. E-koordinaten multipliceras även med en koefficient $k_0 = 0,9996$ samt adderas med 500 000 m. För lokala tillämpningar finns det tolv lokala projektionszoner som alla har en egen medelmeridian. För dessa zoner multipliceras E-koordinaten inte med en koefficient, och den adderas med 150 000 m istället för 500 000 m [34].

Anledningen till att de lokala projektionszonerna existerar är för att ett längre avstånd från medelmeridianen skapar ett större avbildningsfel. Om man inte har nytta av att använda SWEREF 99 kan man således istället ansätta en egen medelmeridian, som kan ligga mycket nära mätpunkterna man avser att projicera. På så sätt får man en mycket exakt avbildning vad gäller avstånd och vinklar.

2.3 Statistiska metoder

Två av de vanligaste begreppen inom matematisk statistik är *medelvärde* och *standardavvikelse*. Medelvärdet räknas ut på följande vis:

$$\mu = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_N}{N}. \tag{2.5}$$

Beteckningen μ betyder medelvärdet för hela populationen, vid stickprov brukar medelvärdet benämnas \bar{x} .

Standardavvikelsen är ett mått på spridningen av en mängd värden. Om värdena utgör hela populationen är standardavvikelsen för dessa

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}. \tag{2.6}$$

Vid stickprov, alltså där värdena inte utgör hela populationen, används ofta stickprovets standardavvikelse:

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}. \quad (2.7)$$

Standardavvikelsen för summan av två oberoende variabler är

$$\sigma(X + Y) = \sqrt{\sigma(X)^2 + \sigma(Y)^2}. \quad (2.8)$$

Root mean square error (RMSE eller RMS) är likt standardavvikelsen ett mått på spridningen av en mängd värden. I vissa fall brukar RMS-felet defineras som

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}. \quad (2.9)$$

Denna formel är mycket lik den för standardavvikelsen, där skillnaden är att standardavvikelsen är ett mått på hur värdena avviker från medelvärdet, medan RMS-felet är ett mått på magnituden av värdena, alltså hur mycket de avviker från noll. Likt (2.8) kan RMS-felet för summan av två oberoende variabler uttryckas som

$$\text{RMS}(X + Y) = \sqrt{\text{RMS}(X)^2 + \text{RMS}(Y)^2}. \quad (2.10)$$

I denna rapport används (2.9) för att räkna ut RMS för det totala felet, då detta är normalfördelat men ofta har ett medelvärde som inte är lika med noll¹. För resterande RMS-fels-uträkningar förflyttas värdena innan (2.9) används så att medelvärdet blir noll. Genom denna process blir RMS-felet och standardavvikelsen synonyma.

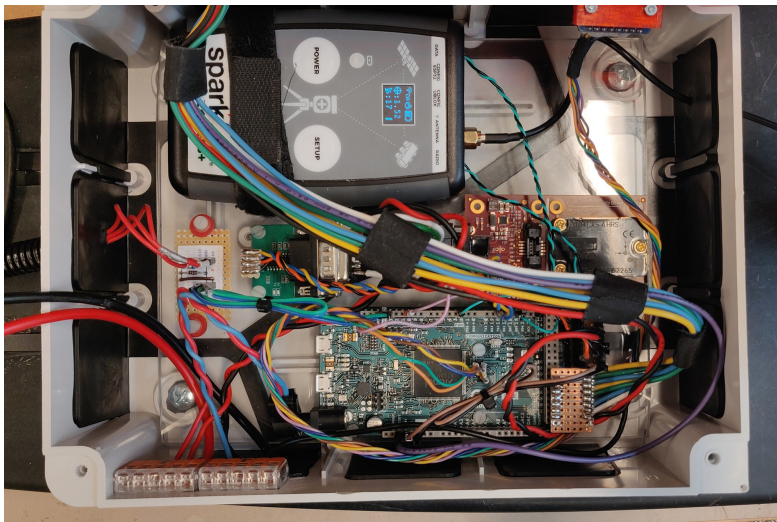
¹För det totala felet är det just avvikelsen från noll som är intressant att undersöka, då $\epsilon_{\text{tot}} = 0$ innebär en perfekt positionering från systemet.

Kapitel 3

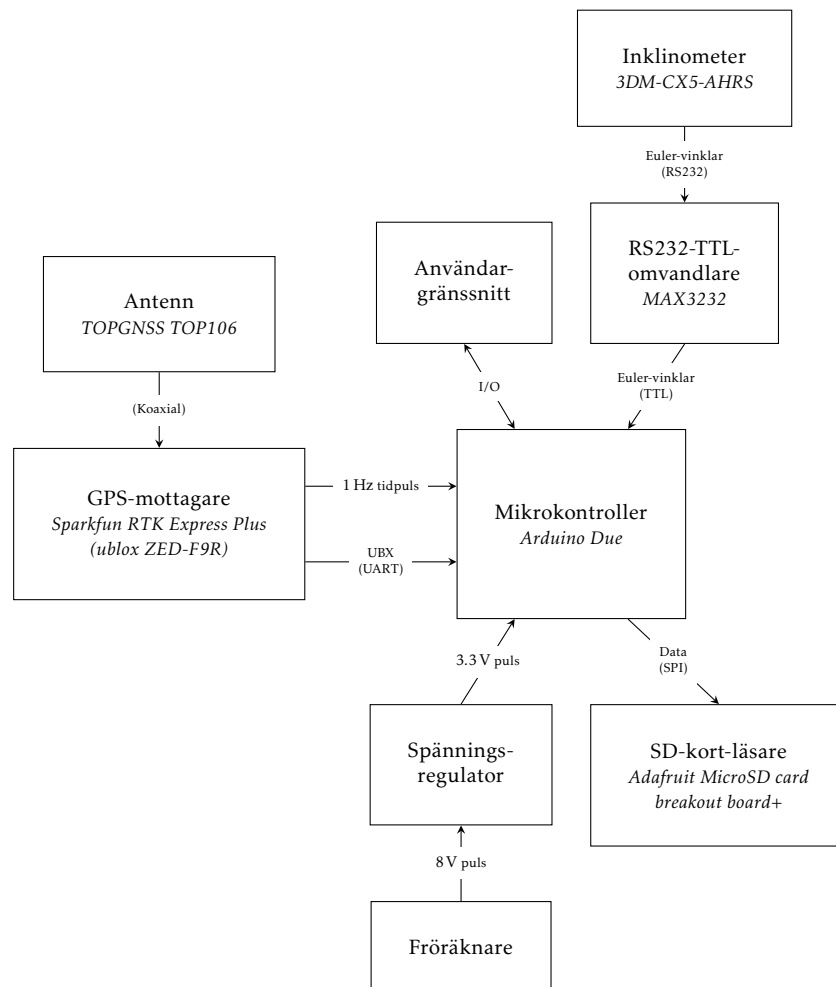
Material och metodik

3.1 Hårdvara

Ett av de huvudsakliga kraven på systemet var att det skulle integreras med en Väderstad Tempo R6. För att möjliggöra detta kom systemet att byggas på locket till sålådadan på den tidigare nämnda såmaskinen. Systemet behövde byggas av komponenter som möjliggjorde mätning av position, mätning av lutning, registrering av fröräknarens signaler, och datainsamling. Ett annat krav var även att systemet skulle kunna drivas av en traktors 12 V-system. Figur 3.1 visar det ihopbyggda systemet i eldosan och Figur 3.2 visar ett blockschema på hur de olika komponenterna är integrerade med varandra.



Figur 3.1: Fotografi av eldosan innehållande majoriteten av elektronikkomponenterna.



Figur 3.2: Blockschemat av elektronikkomponenterna och hur de är kopplade.

3.1.1 Mikrokontrollerkort

Projektet krävde en enhet som hade möjlighet till dataregistrering till exempelvis SD-kort, generering av interrupts för att kunna tolka fröräknarsignaler, och seriell kommunikation för att kunna kommunicera med GNSS-mottagare samt ytterligare enheter. Mikrokontrollerkort av typen Arduino valdes för att de uppfyllde ställda krav och att tidigare erfarenheter med Arduino fanns. Modellen Arduino Due valdes för att det har många in- och utgångar (54 st) samt en hög klockfrekvens (84 MHz) relativt andra mikrokontrollerkort av typen Arduino. Till mikrokontrollerkortet anslöts SD-kort-läsaren Adafruit MicroSD card breakout board+ [35] via SPI.

3.1.2 GNSS-mottagare

GNSS-mottagaren som valdes var RTK Express Plus tillverkad av SparkFun [36]. Mottagaren bygger på GNSS-modulen u-blox ZED-F9R som kan ta emot signaler från alla GNSS-konstellationer och har en inbyggd IMU (inertial measurement unit) för ökad noggrannhet [37]. I mottagaren finns också en rad komponenter som gör positioneringsprocessen enkel för användare. Nämnvärt är en mikrokontroller som kommunicerar med GNSS-modulen och tolkar dess meddelanden, samt en display, knappar och utgångar för att enkelt kunna konfigurera och använda mottagaren. Mottagaren har två USB-C-portar, en antennkontakt, och två seriella portar kallade data- och radiporten.

3.1.3 Inklinometer

För att kunna mäta pitch, yaw och roll användes inklinometern 3DM-CX5-AHRS [38]. Denna data användes för att projicera ned GPS-antennens position ned till marken. Inklinometern anslöts till mikrokontrollerkortet via RS-232 genom en RS-232-till-TTL-konverterare.

3.1.4 Precisionssåmaskin

Väderstad Tempo R6 var såmaskinen som eftermonterades med frökartläggningssystemet [39]. Tempo R6 är en övertrycksprecisionssåmaskin med sex individuella fröutmatningssystem. En bild på såmaskinen med systemet installerat finns i Figur 3.3 Varje såenhet består av en fröbehållare och ett såhus undertill som kontrollerar utmatning. I såhusen finns en så kallad såskiva som är en roterande skiva med hål i kanten. Genom det rådande övertrycket i såhuset fastnar enskilda frön i hålen på såskivan tills de kommer till såröret där undertrycket täpps till så att fröna skjuts ned mot marken. I såröret finns en fröräknare som ger en signal när ett frö färdas förbi.

3.1.5 Övrig hårdvara

All elektronik monterades i en kopplingsdosa. Locket som följde med dosan byttes ut mot ett 3D-printat lock för att uppnå en mindre profil samt för att kunna montera knappar, lampor och SD-kort-läsaren som utgjorde användargränssnittet.



Figur 3.3: Väderstad Tempo R6 med frökartläggningssystemet installerat på såenhet nummer 6. Packarhjulet på såenheten är uppspant för att undvika att såfåran stängs vid sådd.

Användargränssnittet bestod av sex LED-lampor och två knappar. Genom kontinuerliga jämförelser mot olika fall i mjukvaran signalerade lamporna information till användaren. I ordning gav lamporna information om följande: (i) status för strömförsörjning, (ii) status för inklinometer, (iii) status för initiering av SD-kort-läsaren, (iv) när ett frö registrerades, (v) status för tidspulser från GNSS-mottagaren, och (vi) en grön lampa som lyste om alla villkor ovan var uppfyllda.

Vid inmätning av fröns faktiska position användes ett kamerastativ med en egendesignad distans. Distansen möjliggjorde infästning av ett lod som fästes i antennen med en tillhörande skruv.

3.2 Konfigurering av GNSS-mottagaren

GNSS-mottagaren kunde mestadels konfigureras genom att ansluta till den via Wi-Fi, där inställningar justerades genom ett webbgränssnitt. Tillgång till ytterligare inställningar kunde fås genom att ansluta mottagaren via USB till en dator, där programmet u-center användes för att skicka konfigureringsmeddelanden direkt till GNSS-modulen.

3.2.1 Korrektionssignaler

Nödvändiga uppgifter till Nätverks-RTK-tjänsten Swepos överfördes till mottagaren för att få tillgång till korrektionssignaler. Man kan välja olika anslutningspunkter, den som valdes var RTCM3_GNSS [40].

3.2.2 Satellitkonstellationer

Det går att ställa in vilka satellitkonstellationer som mottagaren skall ta upp. De konstellationer som valdes var GPS, Glonass och Galileo, eftersom det är

för dessa som tjänsten Swepos erbjuder korrektionsdata [30].

3.2.3 Data-porten

I GNSS-mottagaren är data-porten kopplad till en multiplexer som tillåter fyra olika funktioner, där två är nämnvärda i denna rapport. Den första funktionen är att data-porten kopplas till TXD- och RXD-portarna på GNSS-modulen, vilket möjliggör att få navigationsdata, men också att skicka konfigureringsmeddelanden direkt till GNSS-modulen. Den andra funktionen är att porten kopplas till TIMEPULSE-porten, som är en port som kan ställas in för att skicka en digital puls vid valfri frekvens med en stor noggrannhet [41]. Det är denna sistnämnda funktion som mottagaren ställdes in på, då denna funktionalitet användes för att synkronisera klockan i mikrokontrollerkortet till UTC-tid. Detta kommer att diskuteras mer i Avsnitt 3.5.2.

3.2.4 Radio-porten

Radio-utgången är direkt kopplad till TXD2- och RXD2-portarna på GNSS-modulen. Systemet konfigurerades så att all data från mottagaren till mikrokontrollerkortet gick genom denna port. För koordinatmeddelandena fanns två valmöjligheter gällande dataprotokoll. Antingen kunde protokollet NMEA 0183 [42] användas, vilket är ett mycket vanligt protokoll för tillämpningar innehållande GNSS-system. Det andra protokollet som kunde väljas var u-blox protokoll UBX [43]. Tidsstämplarna som hörde ihop med tidpulserna kunde bara sändas i UBX-protokollet av GNSS-modulen, därför valdes detta protokoll även för koordinatmeddelandena. Några fler meddelanden aktiverades av olika anledningar, samtliga aktiverade meddelanden kan ses i Tabell 3.1.

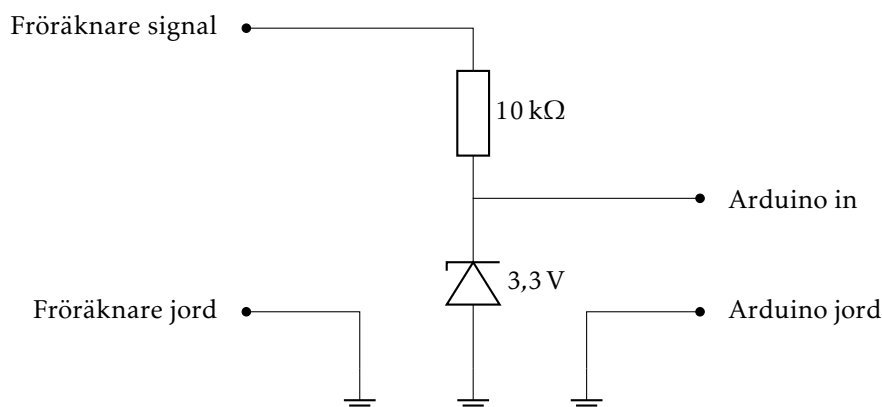
Tabell 3.1: De UBX-meddelanden som aktiverades på GNSS-modulen u-blox ZED-F9R. Mer information om meddelandena finnes i manualen [43].

| UBX-meddelande | Beskrivning |
|------------------|---|
| UBX-NAV-HPPOSLLH | Latitud och longitud i grader med nio decimalers noggrannhet |
| UBX-NAV-PVT | Hastigheter och riktning |
| UBX-TIM-TP | UTC-tiden som nästa tidpuls kommer inträffa vid |
| UBX-RXM-RTCM | Meddelande som skickas när en korrektionssignal har tagits emot |

3.3 Registrering av frön

I såmaskinen är signalutgången på fröräknaren ansluten med en 10 k Ω pull-up-resistor till 8 V¹. När ett frö färdas genom fröräknaren jordas signalutgången en kort stund vilket ger en puls som kan registreras. För att kunna

¹Information från en anställd på Väderstad.



Figur 3.4: Spänningsregulatorkrets med zenerdiod.

koppla in fröräknarens signal till mikrokontrollern behövde spänningen av signalen minskas från 8 V till 3,3 V. För att uppnå detta användes en zenerdiod som en spänningsregulator enligt kretsen i Figur 3.4.

3.4 Datainsamling

Mikrokontrollern sparar datan på ett SD-kort med hjälp av SD-kortläsaren tillsammans med Arduino-biblioteken SD [44] och SPI [45]. Vid varje körning skapas en ny fil på SD-kortet, sedan sparas all data i textformat (ASCII). Data från fyra olika källor sparas på SD-kortet på olika vis, nämligen UBX-meddelanden från GNSS-mottagaren, tidpulser från GNSS-mottagaren, signaler från fröräknaren, och meddelanden från inklinometern.

UBX-meddelandena sparas ned byte för byte som tvåsiffriga hexadecimala tal. All tolkning av dessa meddelanden sker alltså i efterhand, se Avsnitt 3.5.1.

För tidpulserna och signalerna från fröräknaren är tidsstämpeln i mikrosekunder det som sparas ned, och dessa sparas som åttasiffriga hexadecimala tal. För att i efterhand kunna urskilja denna data från resterande data på SD-kortet omringas dessa tidsstämplar med speciella tecken.

Inklinometern strömmar konstant meddelanden om roll, pitch, och yaw till mikrokontrollern i 100 Hz. Mikrokontrollern läser och tolkar samtliga meddelanden under körtid, och en tidsstämpel tillsammans med vinklarna sparas sedan på SD-kortet i en hexadecimal sträng omringad av tecknen på samma sätt som för tidpulserna och signalerna från fröräknaren.

3.5 Tolkning av data

3.5.1 Tolkning av UBX

För tolkning av meddelanden i UBX-protokollet användes Python-biblioteket pyubx2 [46]. Med biblioteket kunde varje meddelande behandlas och sorteras

på lämpligt sätt. Efter detta sparades datan ned i JSON-filer som sedan öppnades i MATLAB för att fortsätta dataanalyserna.

3.5.2 Tidssynkronisering

Med Python utfördes även tidssynkroniseringen. Tidssynkroniseringen började med att para ihop tidpulserna som mikrokontrollerkortet hade registrerat med de korresponderande UBX-TIM-TP-meddelanden som innehöll UTC-tiden som tidpulserna inträffade vid. Resultatet av detta blev en översättningstabell mellan den relativa tiden hos mikrokontrollern och den absoluta UTC-tiden. Eftersom fröhändelserna var tidsstämplade på samma sätt som tidpulserna var det trivialt att sedan bestämma UTC-tiden fröna hade matats ut.

3.5.3 Interpolering av positionsserie

Eftersom GNSS-mottagaren endast rapporterade sin position med 10 Hz innebär detta att avståndet mellan varje position kunde vara nästan en halv meter om systemet färdades i exempelvis 15 km/h. För att uppnå en så bra noggrannhet som möjligt utfördes en linjärinterpolering av alla mätvärden. Detta gjordes i MATLAB genom att lägga koordinaterna, fröhändelserna, inklinometervärdena, och informationen om hastighet och riktning i var sin timetable (timetable är en MATLAB-klass). Efter detta kunde MATLAB-funktionen synchronize användas för att utföra linjärinterpoleringen [47]. Innan interpoleringen adderades fröhändelsernas UTC-tider med den önskade fröfalltiden.

3.6 Mätning av fröfalltid

3.6.1 Bakgrund

Eftersom fröräknaren i såmaskinen är placerad en bit från marken måste tiden det tar för ett frö att färdas från fröräknaren till marken fastställas. Variansen av fröfalltiden är också något som är värdefullt att ta reda på, då denna är en direkt bidragande felkälla till exaktheten i fröpositioneringen. Följande tre variabler antogs vara möjliga faktorer i falltiden:

Typ av gröda: Olika grödor har olika form och densitet, och utsträckningen på hur dessa egenskaper varierar varierar också i sig. Formen på grödan misstänktes ha stor påverkan på hur fröet beter sig aerodynamiskt i luftflödet, och densiteten påverkar troligen hur snabbt fröet accelererar.

Såhustryck: Såhustrycket är det övertryck som är i såhuset. Ett högre såhustryck leder till en större tryckskillnad mellan såhuset och utloppet av såröret, där det är atmosfäriskt tryck. Ju större tryckskillnad desto högre lufthastighet kommer råda i såröret, vilket bör accelerera fröna mer.

Rotationshastighet på såskivan: Rotationshastigheten på såskivan påverkar möjligtvis den initiala hastigheten på fröna, som i sin tur bör påverka den totala tiden det tar för fröet att färdas ned till marken.



Figur 3.5: Radenheten där mätningar på fröfalltid gjordes.

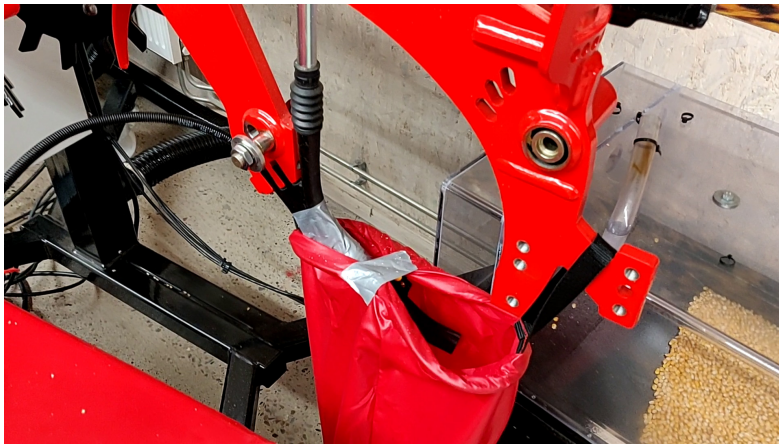
3.6.2 Metodik

En demonstrationsrigg av en Tempo-såenhet användes för att utföra mätningarna. Riggen som kan ses i Figur 3.5 var en fullständig såenhet med några modifieringar i visuellt syfte såsom att utsädeslådan var genomskinlig. En extra fröräknare monterades fast vid utloppet av såröret (se Figur 3.6) och denna tillsammans med den ordinarie fröräknaren kopplades in till mikrokontrollern som sedan kunde logga skillnaden i tid mellan signalerna från den övre respektive undre fröräknaren. När ett frö passerade den övre fröräknaren kördes en interrupt-rutin som registrerade antalet mikrosekunder mikrokontrollern hade varit igång. När samma frö passerade den nedre fröräknaren kördes en annan interrupt-rutin som räknade ut tidsdifferensen i mikrosekunder mellan det förra registrerade tidsvärdet och den nuvarande tiden. Denna tidsdifferens skickades direkt över till en dator seriellt där data sparades i en textfil. Mätningar på grödorna majs, sockerbeta, och solros gjordes med denna uppställning. Mätningar för spannmål kom att göras vid ett senare tillfälle, där en riktig Tempo-såenhet användes. Vid dessa mätningar valdes det även bort att variera rotationshastigheten på såskivan i mån av tid, eftersom de tidigare tester ansåg att denna variabel inte hade en stor inverkan på resultatet.

I Tabell 3.2 presenteras hur såhustricket och såskivans vinkelfrekvens ställdes in för respektive gröda. Alla möjliga permutationer i varje rad blev var sitt experiment där antal datapunkter försökte hållas till ungefär 2500.

Tabell 3.2: De såhustricket och vinkelfrekvenser på såskivan som testades.

| Gröda | Såhustricket [kPa] | Vinkelfrekvens [Hz] |
|------------|--------------------|---------------------|
| Majs | 2,8; 3,4; 4,0 | 0,25; 0,50; 0,75 |
| Sockerbeta | 2,3; 2,8; 3,1 | 0,25; 0,50; 0,75 |
| Solros | 2,8; 3,2; 3,6 | 0,25; 0,50; 0,75 |
| Spannmål | 2,6; 3,1; 3,5 | 0,50 |



Figur 3.6: Extra fröräknare fastmonterad på utloppet av såröret.

Analys av datan görs med en linjär regressionsmodell med MATLAB:

$$t_{\text{falltid}} = \beta_0 + \beta_1 p + \beta_2 \omega + e \quad (3.1)$$

där p är såhustrycket och ω är såskivans vinkelfrekvens.

Det intressanta man får ut genom detta är värdena på β_0 , β_1 och β_2 , samt måttet RMS-fel. Genom att observera β_1 och β_2 kan slutsatser dras om hurvida modellen stämmer eller om den behöver justeras.

3.7 Mätning av varians hos GNSS-mottagaren

För att identifiera den inverkan som variansen hos GNSS-mottagaren har på den totala osäkerheten i systemet gjordes flera mätningar med endast GNSS-mottagaren. Mätningarna gick ut på att placera mottagaren på en plats och spela in värdena under en längre tid, för att sedan kunna analysera resultatet. Mätningarna av variansen hos GNSS-mottagaren gjordes i samband med fälttestet i Borgeby, se Avsnitt 3.9.2.

3.8 Fälttest i Mjölby

Ett fälttest utfördes på ett testfält i Mjölby ($58^{\circ}20'30,0''\text{N}$, $15^{\circ}06'31,8''\text{E}$) den andra mars 2023 i syfte att evaluera systemet i sitt utvecklingsstadium. Systemet sattes upp på en Väderstad Tempo med tillhörande dragtraktor. Ett flertal körningar utfördes och registrering av frön och koordinater gjordes. Detta skedde med GNSS-signal utan korrektionssignaler och utan inklinometer. Testerna utfördes för att evaluera systemets integration med precisionssåmaskinen i sitt dåvarande stadium.



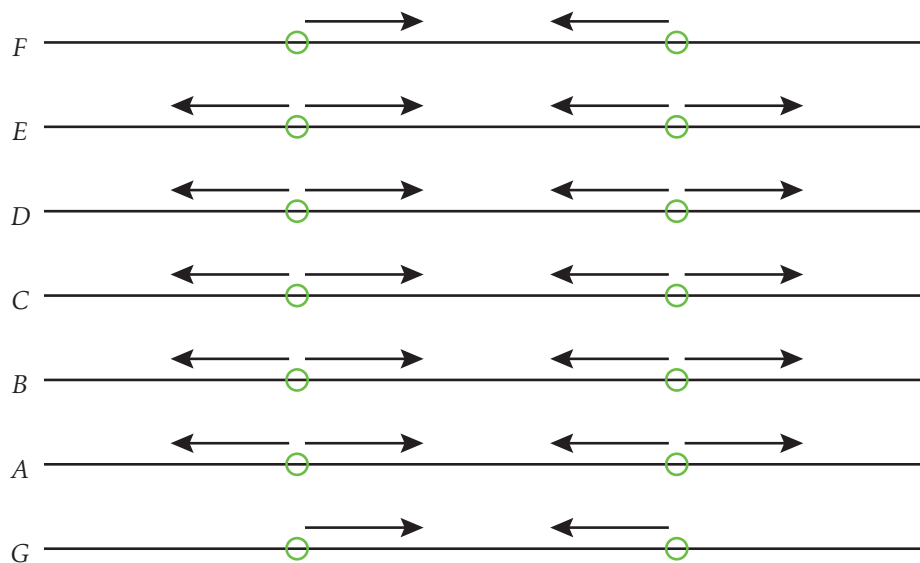
Figur 3.7: Harvning av fältet för att uppnå en optimal såbbädd. (a): Harv med sladd av märke Väderstad framförd av personal från Borgeby Fältdagar. (b): Konfiguration av Harv med sladd. (c): Såbbädd innan harvning. (d): Såbbädd efter harvning.

3.9 Fälttest i Borgeby

3.9.1 Försökuppställning

Fälttester i Borgeby utfördes under perioden 8-10 maj 2023 i syfte att evaluera systemets i sitt slutliga stadie. Det utvalda fältet ($55^{\circ}44'42,7''N$, $13^{\circ}03'11,6''E$) var av lätt lerjord för optimal fårbildning. Bra fårbildning var en fördel då det förmodligen ledde till mindre arbete vid uppsökandet av fröna i efterhand. Detta sparade tid samt minskade risken för förflyttning av fröna vid uppsökandet. För att ytterligare förbättra fårbildning och fröplacering användes en harv med tillhörande sladdkonfiguration för att luckra upp och slå sönder lerklumpar och ge en jämnare struktur i marken, se Figur 3.7. Tillpackningshjulet på såmaskinen spändes upp så att fåran inte täcktes igen, se Figur 3.3.

Åtta planerade körningar gjordes i olika hastigheter och grödor, dessa presenteras i Tabell 3.3 som kompletteras grafiskt i Figur 3.8. Längden på varje enskild körning bestämdes till 30 m, detta eftersom mängden av mätningar avgränsades till avstånd av 20 m. Detta gav 5 m säkerhetsmarginal för att försäkra att maskinen färdades i rätt hastighet. Fröer valda till testet var majs och spannmål. Majs valdes för att underlätta framgrävning tack vare dess stora volym samt röda betningsfärg. Två mindre körningar gjordes även med spannmål för att se om de skiljde sig från körningarna med majs. Dragtraktorn var av märke Fendt utrustad med RTK-system för autostyrning.



Figur 3.8: Icke skalenlig ritning av försöksuppställningen i Borgeby. Varje såfåra identifieras med en bokstav (se Tabell 3.3). Linjerna representerar såfåror, de gröna cirkelarna representerar de GPS-inmätta kontrollpunkterna, och pilarna representerar riktningarna som de manuella mätningarna med måttband gjordes.

Tabell 3.3: De körningar som genomfördes i Borgeby den 8–10 maj 2023.

| Såfåra | Gröda | Hastighet [km/h] | Såhustryck [kPa] | Fröavstånd [cm] |
|--------|----------|---------------------|---------------------|--------------------|
| A | Majs | 5,0 | 3,4 | 20 |
| B | Majs | 7,5 | 3,4 | 20 |
| C | Majs | 10,0 | 3,4 | 20 |
| D | Majs | 12,5 | 3,4 | 20 |
| E | Majs | 15,0 | 3,4 | 20 |
| F | Spannmål | 5,0 | 3,4 | 20 |
| G | Spannmål | 10,0 | 3,4 | 20 |

3.9.2 Inmätning

Efter körningar grävdes och borstades varje enskilt frö fram för hand under en period på tre dagar. Täckning av väv användes för att skydda försöket under natten från hungriga djur. Inmätningar gjordes med måttband och GNSS-mottagaren med stativet och lodet, se Figur 3.9. Vid varje mätning fick mottagaren spela in data i ungefär 30 min. Kontrollpunkterna användes för att positionera enstaka frön som sedan användes som referenspunkter vid inmätning. Måttband på 5 m användes för att i relation till referensfrön mäta in resterande fröpunkter. Två mätserier i vardera riktning gjordes från referensfrön. Två mät-punkter med GNSS-mottagaren gjordes för att kunna bestämma riktningen på varje såfåra. Figur 3.8 visar hur kontrollpunkterna var placerade och i vilka riktningar de manuella mätningarna gjordes.



Figur 3.9: Inmätning av ett frös verkliga position.

3.9.3 Dataanalys

Konvertering till kartesiska koordinater

För att kunna utföra en analys av data förvärvad vid fälttestet behövs alla koordinater konverteras från polära koordinater (latitud och longitud) till tvådimensionella kartesiska koordinater. En referenspunkt valdes för varje såfåra, och denna definierades som medelvärdet av de två inmätta punkternas latitud och longitud:

$$\mathbf{P}_{\text{ref,pol}} = \frac{1}{2} (\mathbf{P}_{1,\text{pol}} + \mathbf{P}_{2,\text{pol}}). \quad (3.2)$$

Medelmeridianen λ_0 ansattes till meridianen som punkten $\mathbf{P}_{\text{ref,pol}}$ befann sig på. $\mathbf{P}_{\text{ref,pol}}$ kunde sedan omvandlas till kartesiska koordinater med (2.1–2.4):

$$\mathbf{P}_{\text{ref}} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

där

$$\begin{pmatrix} \varphi & \lambda \end{pmatrix}^T = \mathbf{P}_{\text{ref,pol}}. \quad (3.4)$$

En godtycklig punkt \mathbf{p} kunde sedan omvandlas på ett likartat sätt med (2.1–2.4), med en liten ändring som gjorde att koordinatsystemet utgick från \mathbf{P}_{ref} :

$$\mathbf{p} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} - \mathbf{P}_{\text{ref}} \quad (3.5)$$

där λ_0 fortfarande var meridianen av $\mathbf{P}_{\text{ref,pol}}$ och

$$\begin{pmatrix} \varphi & \lambda \end{pmatrix}^T = \mathbf{p}_{\text{pol}}. \quad (3.6)$$

Alla punkter (positionsserien, de registrerade frönas positioner, och inmätningpunkterna) antas i följande avsnitt vara konverterade till kartesiska koordinater relativt deras respektive referenspunkter.

Bestämning av frönas faktiska position

Begreppet *frönas faktiska position* syftar på de punkter som mättes in på varje frö relativt de två inmätningpunkterna i respektive såfåra. Om såfåran antogs vara en rät linje kunde den faktiska positionen av fröna bestämmas genom att anta att de befinner sig sträckan d ifrån sin korresponderande inmätningpunkt, i riktningen

$$\hat{e}_1 = \frac{\mathbf{P}_2 - \mathbf{P}_1}{\|\mathbf{P}_2 - \mathbf{P}_1\|}. \quad (3.7)$$

Frönas faktiska position $\mathbf{x}_{f,n}$ kunde sedan bestämmas:

$$\mathbf{x}_{f,n} = \mathbf{P}_i + d_n \hat{e}_1. \quad (3.8)$$

Byte av koordinatsystem

Dataanalys blir enklare om koordinatsystemet roteras och förflyttas så att x -axeln representerar såfårans riktning, och $y = 0$ vid såfårans mitt i tvärsgående riktning som visat i Figur 3.10. Dessa krav kan fullföljas om man definierar x -axeln som \hat{e}_1 och y -axeln som

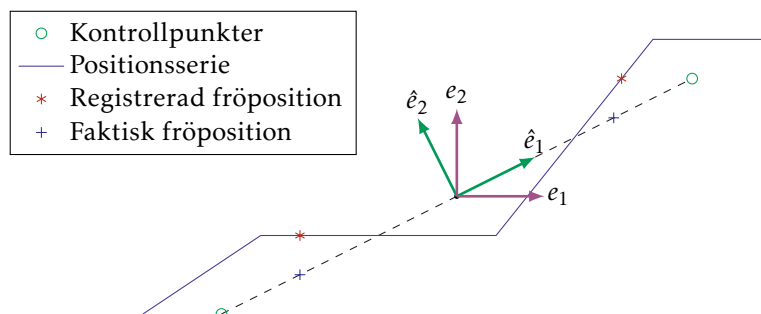
$$\hat{e}_2 = (-\hat{e}_{1,y} \quad \hat{e}_{1,x})^T. \quad (3.9)$$

Basvektorerna \hat{e}_1 och \hat{e}_2 kan placeras som kolonner i en matris vilket ger transformationsmatrisen

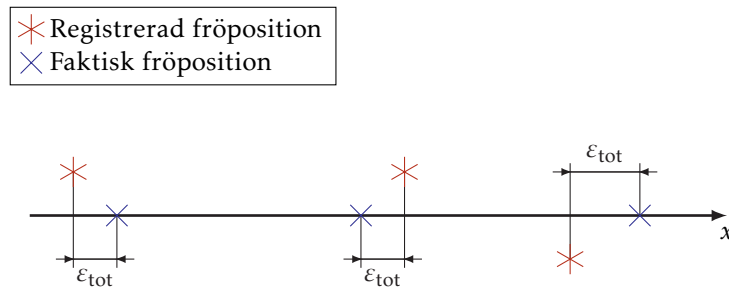
$$\mathbf{S} = (\hat{e}_1 \quad \hat{e}_2), \quad (3.10)$$

som kan användas för att transformera samtliga punkter till det nya koordinatsystemet:

$$\hat{\mathbf{p}} = \mathbf{S}^{-1} \mathbf{p}. \quad (3.11)$$



Figur 3.10: Visuell representation av koordinatsystemsbytet.

Figur 3.11: Fröpositioner efter koordinatbyte, med ε_{tot} utmarkerat.

Matchning faktiska och registrerade fröpositioner

Positionerna av de registrerade fröna bestämdes initialt med metodiken i Avsnitt 3.5.3, med en fröfalltid inställd på det resultat som hade erhållits vid fröfalltidstesterna. Med dessa inställningar blev det säkerställt i de allra flesta fall vilken registrerad fröposition som skulle höra ihop med vilken faktiskt fröposition. Karaktäristiska drag av vanliga fel som uppstår vid sådd såsom missar och dubletter gav bra indikation på lyckad matchning då ett unikt mönster skapades.

Parameterestimering

Efter koordinatbytet gjort i tidigare avsnitt representerade varje frös x -koordinat dess längdmässiga position i fåran, se Figur 3.11. I detta arbete är det endast denna dimension som analyseras. Med ett frös faktiska x -koordinat $x_{f,n}$ och registrerade x -koordinat $x_{r,n}$ kunde felet av positioneringen skrivas som

$$\varepsilon_{\text{tot}} = x_{r,n} - x_{f,n}. \quad (3.12)$$

För varje såfåra (som alla utfördes vid olika hastigheter) kunde ett medelvärde av felet tas fram:

$$\bar{\varepsilon}_{\text{tot}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \varepsilon_{\text{tot},n}. \quad (3.13)$$

Målet var att medelvärdet av felet $\bar{\varepsilon}$ skulle bli lika med noll, då betydde det att positioneringen i genomsnitt hade varit korrekt. För att förflytta medelvärdet till noll kunde parametrar i analysen justeras. I detta arbete justeras två parametrar, den första är fröfalltiden t_{falltid} , som förskjöts med parametern $\delta t_{\text{falltid}}$:

$$t'_{\text{falltid}} = t_{\text{falltid}} + \delta t_{\text{falltid}}. \quad (3.14)$$

Den andra parametern är en translationell förflyttning av de registrerade fröpositionerna i riktningen av GNSS-mottagarens rapporterade momentana riktning. Denna parameter benämndes till a .

Med två körningar vid olika hastigheter kunde ett ekvationssystem med två ekvationer och två okända variabler ställas upp för att bestämma parametrarna

nämnda ovan:

$$\begin{cases} \bar{\varepsilon}_{\text{tot},A} + \bar{v}_A \delta t_{\text{falltid}} + a = 0 \\ \bar{\varepsilon}_{\text{tot},E} + \bar{v}_E \delta t_{\text{falltid}} + a = 0 \end{cases} \quad (3.15)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \delta t_{\text{falltid}} = \frac{\bar{\varepsilon}_{\text{tot},A} - \bar{\varepsilon}_{\text{tot},E}}{\bar{v}_E - \bar{v}_A} \\ a = -\bar{\varepsilon}_{\text{tot},A} - \frac{\bar{\varepsilon}_{\text{tot},A} - \bar{\varepsilon}_{\text{tot},E}}{\bar{v}_E - \bar{v}_A} \bar{v}_A \end{cases} . \quad (3.16)$$

Som syns i ekvationen ovan så användes körningarna A (5 km/h) och E (15 km/h) för parameterestimeringen.

Validering av parameterestimering

För att validera parameterestimeringen och samtidigt ta fram det slutliga resultatet applicerades parametrarna uträknade ovan på samtliga körningar. Avståndet mellan de registrerade och faktiska fröpositionerna analyserades genom att anta en normalfördelning, samt att räkna ut RMS-felet.

Kapitel 4

Resultat och Diskussion

För att återkoppla till målpresentationen i Avsnitt 1.2 kan (1.1) vidareutvecklas för att bestämma det totala felet RMS_{tot} :

$$RMS_{tot} = \sqrt{(RMS_{falltid})^2 + (RMS_{GPS})^2 + (RMS_{okänt})^2}, \quad (4.1)$$

vilket kommer att vara användbart i vidare diskussion.

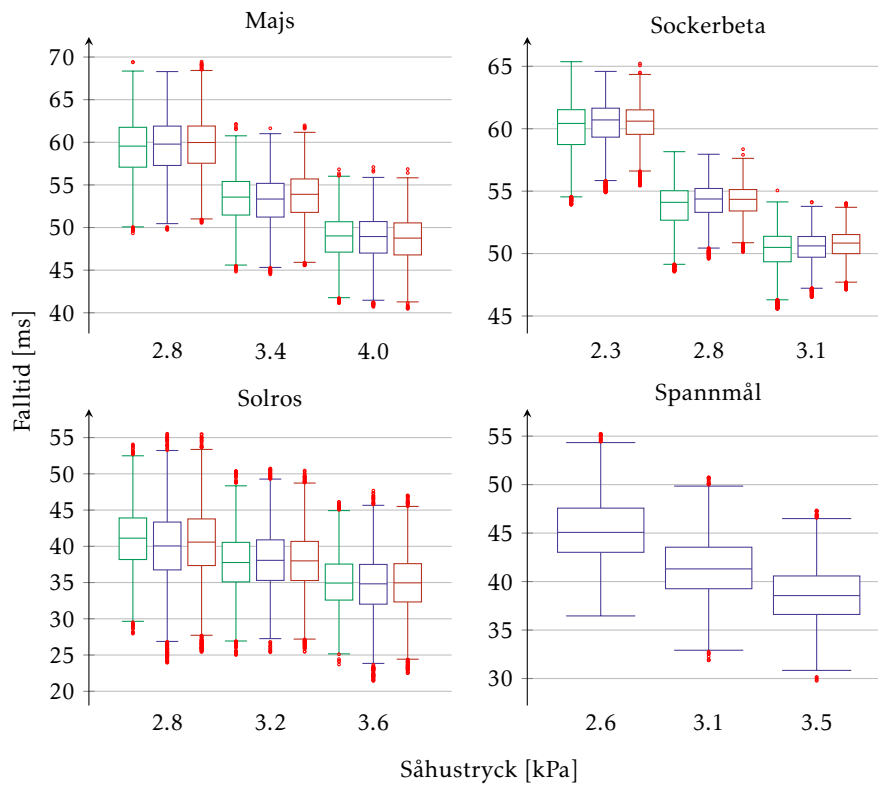
4.1 Mätning av fröfalltid

Figur 4.1 sammanfattar alla mätningar gjorda på fröfalltid med hjälp av låddiagram. I Figuren kan man se att ett högre såhstryck ger en lägre falltid. Man kan även se att rotationshastigheten på såskivan inte verkar ha en stor påverkan på falltiden.

Från resultat presenterade i Tabell 4.1 visas det tydligt skillnaderna mellan tryckets och rotationshastigheten på såskivans påverkan. De verkliga arbetsområdena för såhstryck och rotationshastighet på såskiva samt vad för påverkan de har på falltiden finns i Tabell 4.2. Från värdena i tabellen kan man konstatera att såhstrycket har en signifikant påverkan på falltiden inom sitt arbetsområde (så mycket som 24,42 ms), men att rotationshastigheten ej har en signifikant påverkan inom sitt arbetsområde (endast 0,52 ms). Valet att utelåta rotationshastigheten på såskivan från regressionsmodellen gjordes följaktligen. Tabell 4.3 visar en modell där inverkan från rotationshastigheten

Tabell 4.1: Regressionsmodell med såhstryck och rotationshastighet på såskivan som variabler.

| Gröda | β_0 (Intercept) [ms] | β_1 (p) [ms/kPa] | β_2 (ω) [ms/Hz] | RMSE [ms] |
|------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--------------|
| Majs | 84,03 | -8,95 | 0,47 | 2,97 |
| Solros | 60,00 | -6,87 | -0,55 | 4,58 |
| Sockerbeta | 87,75 | -12,21 | 1,03 | 1,72 |
| Spannmål | — | — | — | — |



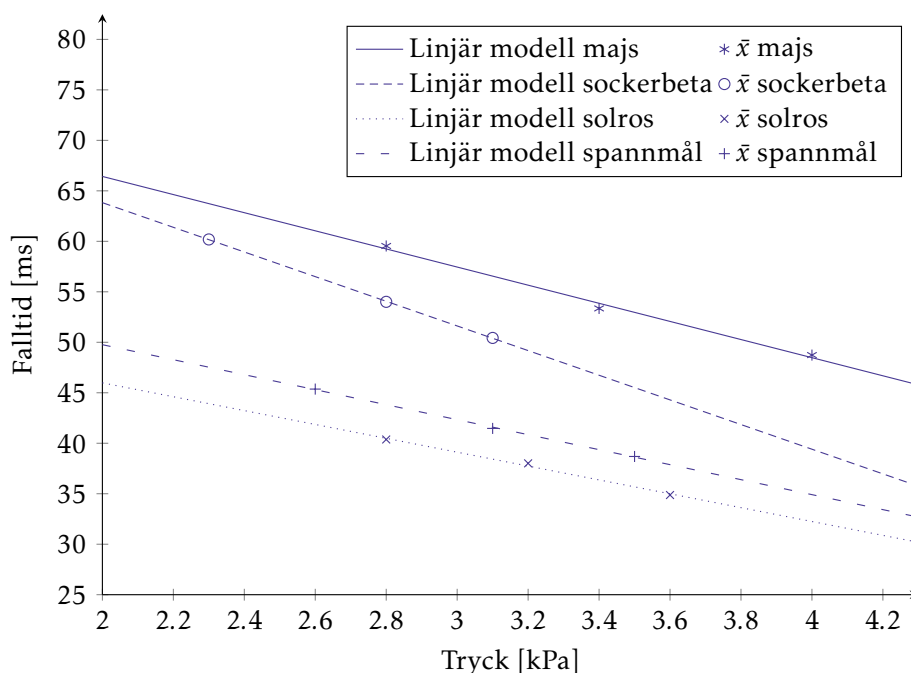
Figur 4.1: Låddiagram av falltid beroende på tryck och rotationshastighet på såskiva. Färgerna grön, blå och röd representerar 0,25, 0,50 och 0,75 varv per sekund respektive.

Tabell 4.2: Påverkan såhustrycket och rotationshastigheten på såskivan har på fröfalltiden i sina respektive arbetsområden. $(\Delta p)_{\max} = 2 \text{ kPa}$, $(\Delta \omega)_{\max} = 0,5 \text{ Hz}$.

| Gröda | Påverkan inom arbetsområde | |
|-------------|--|---|
| | $\beta_1 \times (\Delta p)_{\max} [\text{ms}]$ | $\beta_2 \times (\Delta \omega)_{\max} [\text{ms}]$ |
| Majs | 17,90 | 0,24 |
| Solros | 13,74 | 0,28 |
| Sockerbeter | 24,42 | 0,52 |
| Spannmål | — | — |

Tabell 4.3: Omarbetad regressionsmodell med endast såhustryck som variabel.

| Gröda | β_0 (Intercept) [ms] | β_1 (p) [ms/kPa] | RMS [ms] |
|-------------|-------------------------------|---------------------------|-------------|
| Majs | 84,38 | -8,97 | 2,97 |
| Solros | 59,71 | -6,87 | 4,58 |
| Sockerbeter | 88,25 | -12,21 | 1,72 |
| Spannmål | 64,61 | -7,43 | 3,23 |



Figur 4.2: De linjära regressionsmodellerna för fröfalltiden och de uppmätta medelvärdena för varje testat tryck.

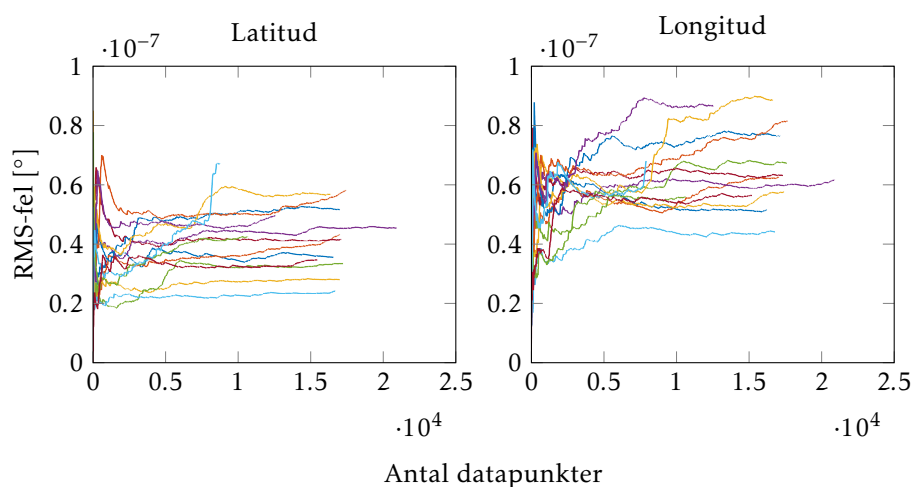
på såskivan har tagits bort. Här syns en mycket svag skillnad mot den tidigare regressionsmodellen. Detta styrker beslutet om att ta bort rotationshastigheten från den initiala regressionsmodellen. Figur 4.2 visar de linjära regressionsmodellerna och de uppmätta medelvärdena för fröfalltiden, till synes verkar antagandet om ett linjärt samband stämma. Figuren visar även väl hur de olika grödtyperna skiljer sig gällande falltid. Exempelvis är majs långsammast och solros snabbast, detta beror troligen på skillnaderna mellan deras aerodynamiska profiler. Solrosfrön är platta, och fångar antagligen luftflödet som råder i såröret bättre än vad majsfrön gör. Enligt denna teori borde sockerbeter, på grund av deras nästan perfekta sfäriska form, vara långsammare än majs; Figur 4.2 visar att detta inte är fallet. Faktorer som vikt kan spela roll här, då ett betfrö väger mindre än ett majsfrö.

Tabell 4.3 visar också RMS för modellerna. Ekvation (4.2) härleder hur fröfalltidens RMS påverkar osäkerheten av frönas uppskattade position.

$$\text{RMS}_{\text{falltid}} = v \times \text{RMS}_{\text{falltid},t} \quad (4.2)$$

där v är hastigheten som såmaskinen färdas i, $\text{RMS}_{\text{falltid},t}$ är RMS för fröfalltiden och $\text{RMS}_{\text{falltid}}$ är det ekvivalenta avståndsfelet som uppenbarar sig på grund av felet i falltid. Vi har nu erhållit vår första term i (4.1).

Som ett exempel för majs så blir $\text{RMS}_{\text{falltid}} = 12,38 \text{ mm}$ om såmaskinen färdas i 15 km/h, och 4,13 mm vid 5 km/h.



Figur 4.3: Utvecklingen av RMS-felet hos latitud och longitud för alla 14 kontrollpunktsinmätningar. Ingen förklaring finns till vilken linje som korresponderar till vilken mätning, då detta inte är viktigt i denna figur.

4.2 Mätning av varians hos GNSS-mottagare

Koordinaterna man får från GNSS-mottagaren är ej oberoende, eftersom positionen rör sig inkrementellt med tiden. Innebörden av detta är att man antagligen kommer få ett för litet mått på RMS-felet av latitud- och longitudvärdena om man inte har en datamängd som representerar ett tillräckligt stort tidsintervall. I Figur 4.3 kan man se hur RMS-felet utvecklas med tiden för alla kontrollpunktsinmätningar. De flesta av linjerna verkar ha konvergerat, men värdet de konvergerar mot är relativt spritt.

Tabell 4.4 visar halvbredden av konfidensintervallet (i denna rapport kallas den för β) för det sanna medelvärdet av mätningarna, alltså den sanna positionen på jorden som GNSS-mottagaren befann sig på. Detta är ett bra mått på hur noggranna man kan förvänta sig att inmätningarna av kontrollpunkterna var. För att få en bättre bild av denna noggrannhet kan teorin från Avsnitt 2.2.1 användas för att konvertera genomsnittet på β i Tabell 4.4 till vilken förskjutning det innebär på jorden, specifikt på fältet där experimenten utfördes. Resultatet som fås då är $\pm 75 \mu\text{m}$ för latitud och $\pm 64 \mu\text{m}$ för longitud. Detta anses vara mer än tillräckligt bra för detta arbete. Dock ska det påpekas att det finns andra felkällor vid inmätningen som gör att denna noggrannhet ej uppnås i praktiken.

Tabellen visar även RMS för kontrollpunktsinmätningarna. Detta är ett bra mått på hur man kan förvänta sig att GNSS-mottagaren presterar i varje givet tillfälle. Som i det tidigare stycket kan RMS också konverteras till ett avstånd, resultatet av detta blir 4,64 mm för latitud och 4,01 mm för longitud. RMS_{GPS} kan nu bestämmas till det största av dessa två värdena:

$$\text{RMS}_{\text{GPS}} = 4,64 \text{ mm.} \quad (4.3)$$

En andra term är nu bestämd i (4.1).

Tabell 4.4: Resultat och statistik för kontrollpunktsinmätningarna.

| Kontrollpunkt | | Mätvärden latitud [$^{\circ} \times 10^{-10}$] | | Mätvärden longitud [$^{\circ} \times 10^{-10}$] | |
|---------------|---|--|-----|---|-----|
| | | β^a | RMS | β^a | RMS |
| A | 1 | 5,53 | 351 | 8,03 | 510 |
| | 2 | 6,46 | 425 | 9,36 | 616 |
| B | 1 | 4,22 | 279 | 8,73 | 578 |
| | 2 | 6,15 | 449 | 8,40 | 614 |
| C | 1 | 5,01 | 334 | 10,08 | 671 |
| | 2 | 3,70 | 241 | 6,79 | 442 |
| D | 1 | 6,30 | 415 | 9,38 | 619 |
| | 2 | 7,76 | 513 | 11,51 | 760 |
| E | 1 | 8,61 | 580 | 11,83 | 796 |
| | 2 | 8,71 | 561 | 13,25 | 854 |
| F | 1 | 8,69 | 493 | 14,96 | 849 |
| | 2 | 8,07 | 418 | 10,05 | 520 |
| G | 1 | 9,62 | 427 | 12,26 | 544 |
| | 2 | 5,54 | 344 | 9,01 | 558 |
| Genomsnitt | | 6,74 | 417 | 10,26 | 638 |

^a β är halva bredden av det nittiofemprocentiga konfidensintervallet för det sanna medelvärdet μ : $CI_{95\%} = [\bar{x} - \beta, \bar{x} + \beta]$.

4.3 Fälttest i Mjölby

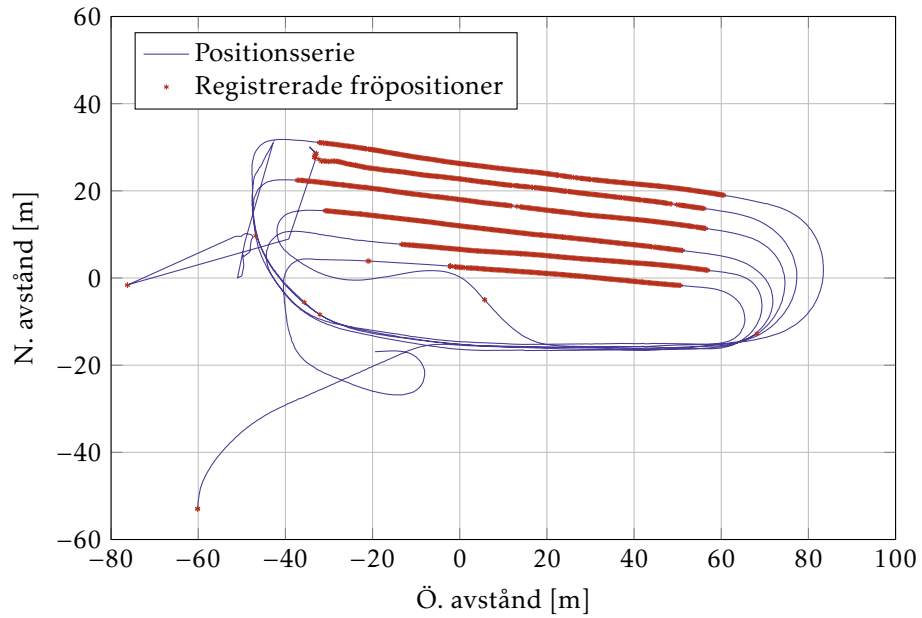
Resultatet i Figur 4.4 visar på att systemet i sitt dåvarande skick gav brukbar data. Figuren visar också felaktigheter. I en av svängarna mot öst verkar GNSS-mottagaren ha rapporterat fel koordinater, och systemet har rapporterat enstaka frötmatningar på ställen där maskinen förmodligen inte har gjort det i verkligheten. Dessa felaktigheter beror på okända störningar.

4.4 Fälttest i Borgeby

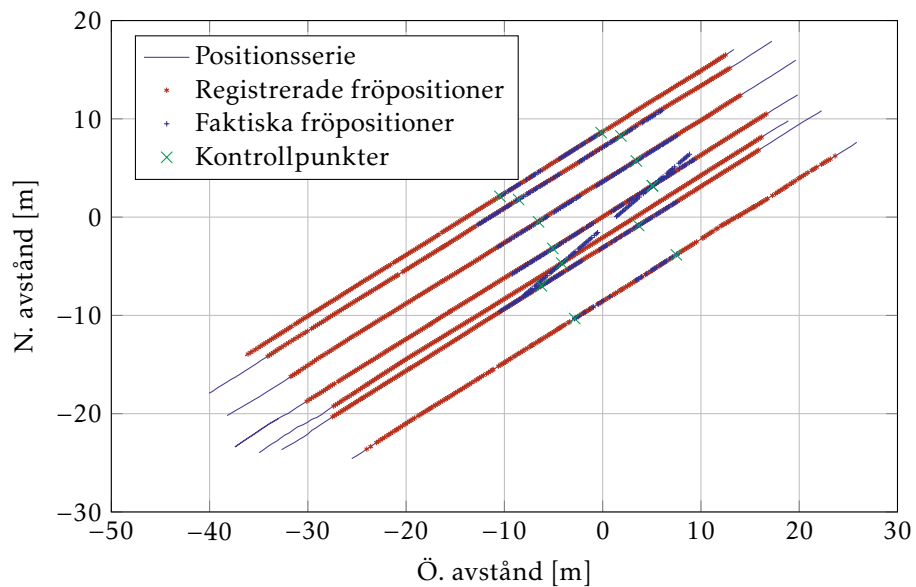
När kontrollpunkt två skulle mätas in för körning B (7,5 km/h) placerades antennen på platsen där kontrollpunkt två för körning C skulle utföras, därför tas körning B inte med i vidare diskussion om frökartläggningssystemet. Detta misstag syns i Figur 4.5.

Mätvärdena från inklinometern togs inte med i några beräkningar i detta arbete. Anledningen till detta var för att dessa var mycket svårtolkade. Det som gjorde mätvärdena svårbegripliga var att ingen kalibrering utfördes av inklinometern då det antogs att detta skulle kunna ske i efterhand. Kalibrering borde ha gjorts med systemet fastmonterat på såmaskinen genom att till exempel placera sårörsutloppet ovanför en känd punkt för att sedan läsa av inklinometerns och GNSS-mottagarens värden. Dessa värden hade kunnat användas för att bestämma en nollpunkt för de tre vinklarna. Större omsorg borde även ha tagits vid monteringen av inklinometern så att det hade varit säkert att vinkeln den rapporterade var korrekt.

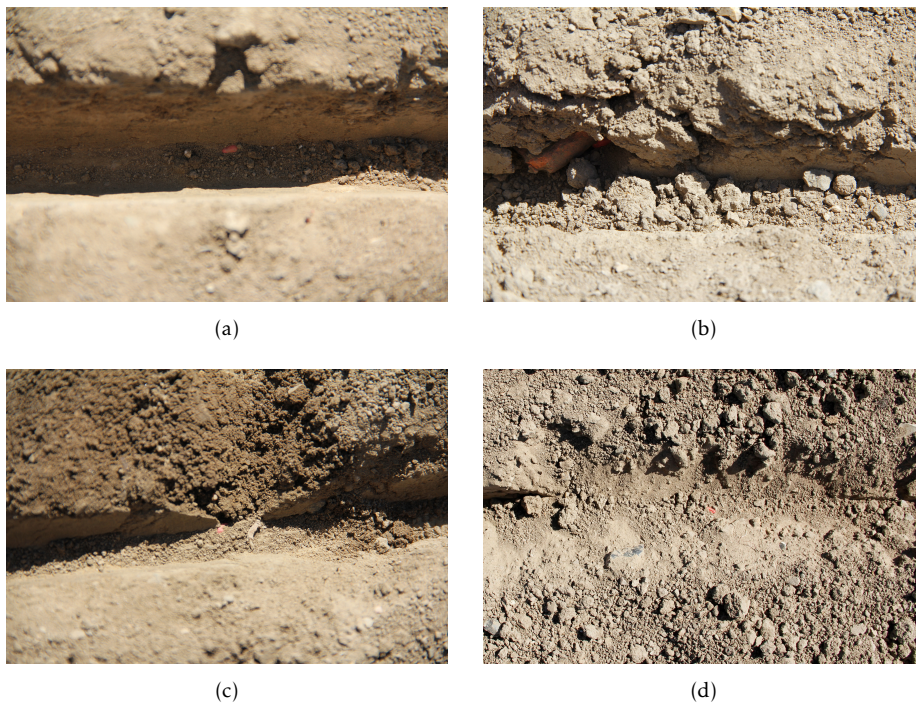
Figur 4.6d visar exempel på kasseringar av frön gjorda under inmätning. Även dessa kommer att exkluderas i vidare diskussion.



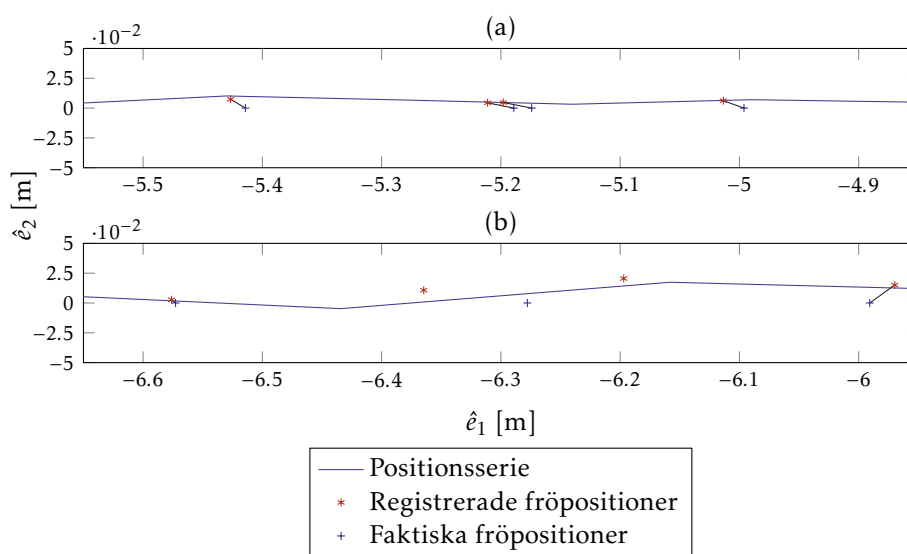
Figur 4.4: Körning i Mjölby.



Figur 4.5: Alla registrerade körningar i Borgeby.



Figur 4.6: Olika fall av fröplacering. (a): Bra placering av frö. (b): Frö inklämt under tegelsten. Stor avvikelse från centrum av fåra. (c): Frö med svag vägg, vilket kan ha påverkat placering och framgrävning. (d): Löst liggande frö, kasserat.



Figur 4.7: Matchning av registrerade och faktiska fröpositioner. (a): Dubblett som har kunnat matchas. (b): En faktisk fröposition som ej har kunnat matchas med en registrerad fröposition.

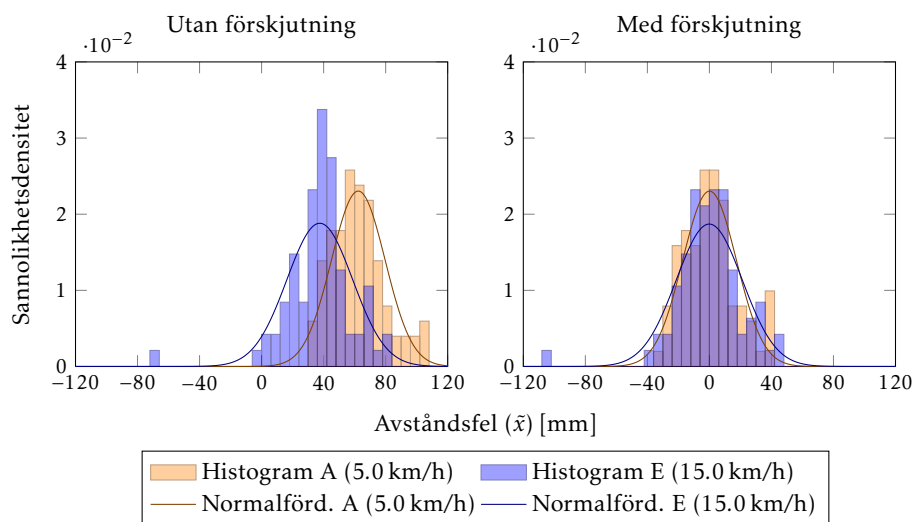
Figur 4.7 visar att matchning av faktiska fröpositioner med de registrerade positionerna kunde göras med stor säkerhet, bland annat tack vare fröfalltidsmätningarna gjorda i Väderstad och det generösa såavståndet på 20 cm. Dock ska det nämnas att matchningsprocessen vid ett fåtal gånger inte var självklar och då behövde de berörda fröna kasseras, ett exempel på detta finns i Figur 4.7. Extra försäkring av att matchning av frön gick rätt till gavs i att studera de oregelbundna händelser som båda inmätningar plockade upp. Olika fall i form av missar och dubletter förekom så lågfrekvent att det inte skulle ha matchat ifall serierna inte stämde överens; ett exempel på detta visas i Figur 4.7.

I Figur 4.8 syns en tydlig förändring av felet efter att parametrar har estimerats som presenteras i Tabell 4.5. Från parametrarna i Tabell 4.5 går det att se att frön i snitt hamnar cirka 7,5 cm bakom positionen som GNSS-mottagaren rapporterar. Detta beror delvis antagligen på att antennen placerades felaktigt vid montering, men också på grund av att lutningen av såmaskinen är okänd eftersom inklinometerns värden inte tas med i några beräkningar. Från Tabell 4.5

Tabell 4.5: Förskjutningarna uträknade med (3.16).

| Gröda | $\delta t_{\text{falltid}}$ (Fröfalltidförskjutning) [ms] ^a | a (Translationell förskjutning) [mm] |
|----------|---|---|
| Majs | 9,13 | -75,27 |
| Spannmål | 18,79 | -103,09 |

^a Innan parameterestimeringen var $t_{\text{falltid}} = 53,88$ ms för majs och 39,35 ms för spannmål (uträknat med (3.1) och värdena i Tabell 4.3). I den slutliga modellen används alltså $t'_{\text{falltid}} = 53,87$ ms + 9,13 ms = 62,99 ms för majs och 39,37 ms + 18,79 ms = 58,16 ms för spannmål.



Figur 4.8: Inverkan av förskjutning för majs vid körningar A och E (5 km/h och 15 km/h). Förskjutningarna från Tabell 4.5 används. Normalfördelningsparametrar utan förskjutning: $\bar{x}_A = 62,34$ ms, $s_A = 17,32$ ms. $\bar{x}_E = 37,51$ ms, $s_E = 21,21$ ms. Normalfördelningsparametrar med förskjutning: $\bar{x}_A = 0,09$ ms, $s_A = 17,32$ ms. $\bar{x}_E = -0,08$ ms, $s_E = 21,33$ ms.

går det även att se att modellerna beräknade från fröfalltidmätningarna inte visade sig vara helt perfekta. Detta kan vara på grund av att fröna i verkligheten blir stationära en bit nedanför där den nedre fröräknaren placerades vid mätningarna. Det kan även bero på att det existerar någon skillnad gällande trycket i den riktiga såmaskinen gentemot såmaskinsriggen använd i fröfalltidmätningarna.

Tabell 4.6 sammanfattar resultaten från alla körningar. För majs (körning A–E, utom B) är det mest intressant att titta på resultaten av körningar C och D, då dessa inte var med i parameterestimeringen och därför är minst partiska. $\pm\Delta_{95\%}$ är den maximala avvikelsen från medelvärdet man kan förvänta sig av felet för 95 % av de registrerade fröpositionerna, men det representerar inte avvikelsen från frönas faktiska position. Adderas medelvärdet med $\pm\Delta_{95\%}$ kan man konstatera att man med 95 % sannolikhet kan finna ett frö inom ett avstånd på 50,18 mm för körning C och ett avstånd på 62,34 mm för körning D.

Fokuserar man på spannmål i Tabell 4.6 kan man direkt se att det var en stor skillnad på felet mellan de två körningarna (F och G). Denna skillnad kan indikera på ett positivt förhållande mellan hastighet som såmaskinen färdas i och felet i positionering, vilket är något som (4.2) också indikerar på. Körning F indikerar på att man kan finna ett frö inom ett avstånd på 30,39 mm med 95 % sannolikhet och körning G indikerar på att detta går inom ett avstånd på 68,75 mm.

Det slutliga systemet fungerade väl för sitt bestämda ändamål, men hade inte varit robust nog att vara del av en verklig såmaskin. Vid olika tillfällen upp-

Tabell 4.6: Resultat och statistik för avstånd mellan registrerade och faktiska fröpositioner.

| Såfåra | Medelhastighet [km/h] | Antal frön ^c | PE ^d | Avstånd [mm] | | |
|----------------|-----------------------|-------------------------|-----------------|--------------|--------------------|-------|
| | | | | Medelv. | $\pm\Delta_{95\%}$ | RMS |
| A ^a | 5,10 | 84 | Ja | 0,09 | 33,95 | 17,22 |
| B ^a | 7,55 | — | Nej | — | — | — |
| C ^a | 10,13 | 87 | Nej | 4,77 | 45,41 | 23,52 |
| D ^a | 12,62 | 84 | Nej | 12,18 | 50,16 | 28,21 |
| E ^a | 14,88 | 79 | Ja | -0,08 | 41,80 | 21,19 |
| F ^b | 4,95 | 41 | Ja | 0,07 | 30,32 | 15,28 |
| G ^b | 10,28 | 29 | Ja | -0,42 | 68,33 | 34,26 |

^a Gröda: majs.

^b Gröda: spannmål.

^c Antal frön som hade en korresponderande faktisk och registrerad fröposition.

^d Om såfåran var med i en parameterestimering för grödan.

täcktes glappkontakt i vissa anslutningar som gjorde att vissa mätningar behövde göras om. Kostnaden av det slutliga systemet var ungefär 10 000 kr utan inklinometern inräknat och 22 000 kr med inklinometern inräknat.

4.5 Slutsatser

Med vetskapen om det totala felet RMS_{tot} samt bidragen $RMS_{falltid}$ och RMS_{GPS} kan (4.1) skrivas om för att få ut $RMS_{okänt}$:

$$\begin{aligned}
 RMS_{okänt} &= \sqrt{(RMS_{tot})^2 - (RMS_{falltid})^2 - (RMS_{GPS})^2} \\
 &= \sqrt{(28,21 \text{ mm})^2 - (12,38 \text{ mm})^2 - (4,64 \text{ mm})^2} = 24,92 \text{ mm}
 \end{aligned}
 \tag{4.4}$$

Att $RMS_{okänt}$ blir såpass stort visar på att det är en stor del av felkällorna som inte har fångats upp. Felkällor som kan ha bidragit till $RMS_{okänt}$ är att:

- det fanns fel i den manuella inmätningprocessen
- GNSS-mottagaren av någon anledning inte presterar lika väl vid verklig körning som när den står still
- fröfalltiden varierar mer vid verklig körning än i labbmiljö, detta är mycket troligt då såmaskinens vertikala hastighet förmodligen gör att fröna accelererar olika
- inklinometern inte togs med i beräkningarna. Antennen satt 1,2 m ovanför marken, detta gör att exempelvis 1° lutning motsvarar $1,2 \text{ m} \times \sin 1^\circ = 21 \text{ mm}$, vilket är ett signifikant avstånd

Detta arbete har visat på att det är möjligt med relativt få resurser att bygga ett välfungerande frökartläggningssystem för en precisionssåmaskin. Resultaten visar på att man med 95% sannolikhet i färdriktning kan finna ett frö som ligger inom ett avstånd på 62,34 mm från en fröposition som har registrerats av systemet utvecklat i detta arbete.

4.6 Framtida arbete

För att kunna säkerställa att ett kommersiellt frökartläggningssystem kommer att vara genomförbart bör fler försök liknande detta arbete utföras där

- större datamängder samlas in
- förbättrade och utökade inmätningmetoder används, exempelvis genom individuell inmätning av frön med GPS vilket hade möjliggjort evaluering av systemet även i tvärsgående riktning mot såfåran
- identifiering av resterande felkällor och deras inverkan på RMS_{tot} görs.

Åtgärder kan även tas hos tillverkare av precisionssåmaskiner för att minska de fel som uppenbarar sig i frökartläggningssystemet som beror på såmaskinen. Exempelvis kan positionern av fröräknaren flyttas närmre marken, så att falltiden får en lägre inverkan på det totala felet i systemet.

Som tidigare nämnts i rapporten hade exempelvis GPS-styrda radhackor och besprutningsmaskiner potentiellt kunnat utnyttja den data som ett frökartläggningssystem ger. Därför bör evaluering och utveckling av noggrannheten hos dessa typer av maskiner utföras.

Litteraturförteckning

- [1] Europeiska Kommissionen. (2019) Den europeiska gröna given: Meddelande från kommissionen till europaparlamentet, europeiska rådet, rådet, europeiska ekonomiska och sociala kommittén samt regionkommittén. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1576150542719&uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN> (hämtad 2023-04-27).
- [2] Förenta Nationerna, "Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development," 2015. [Internet]. Tillgänglig: <https://sdgs.un.org/publications/transforming-our-world-2030-agenda-sustainable-development-17981>
- [3] A. Bechar and C. Vigneault, "Agricultural robots for field operations. part 2: Operations and systems," *Biosystems Engineering*, vol. 153, pp. 110–128, 2017. [Internet]. Tillgänglig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511015301926>
- [4] T. Bakker, K. van Asselt, J. Bontsema, J. Müller, and G. van Straten, "Autonomous navigation using a robot platform in a sugar beet field," *Biosystems Engineering*, vol. 109, no. 4, pp. 357–368, 2011. [Internet]. Tillgänglig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511011000791>
- [5] T. Saranya, C. Deisy, S. Sridevi, and K. S. M. Anbananthen, "A comparative study of deep learning and internet of things for precision agriculture," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 122, p. 106034, 2023. [Internet]. Tillgänglig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095219762300218X>
- [6] European Commission, "Farm to fork strategy: for a fair, healthy and environmentally-friendly food system; document 52020dc0381," *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions*, vol. 381, pp. 1–9, 2020.
- [7] M. G. de Soto, L. Emmi, C. Benavides, I. Garcia, and P. G. de Santos, "Reducing air pollution with hybrid-powered robotic tractors for precision agriculture," *Biosystems Engineering*, vol. 143, pp. 79–94, 2016. [Internet]. Tillgänglig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S153751101530177X>

- [8] R. Schrijver, K. Poppe, and C. Daheim, "Precision agriculture and the future of farming in europe: Scientific foresight study," European Parliament, Tech. Rep., 2016.
- [9] V. N. T. Aleksandr B. Orishev, Azer A. Mamedov, "Agriculture 4.0: Application of the internet of things and digital technology in the agro-industrial complex," *Advances in Information Systems, Mathematical Modeling, and IT Applications in Industry 2021*, vol. 3040, pp. 155–162, Oktober 2021. [Internet]. Tillgänglig: <https://ceur-ws.org/Vol-3040/>
- [10] D. Youqiang, Y. Li, Z. Dongxing, C. Tao, L. Yuhuan, Z. Xiangjun, X. Chunji, and D. Zhengliang, "Novel low-cost control system for large high-speed corn precision planters." *International Journal of Agricultural & Biological Engineering*, vol. 14, no. 2, pp. 151 – 158, 2021. [Internet]. Tillgänglig: <https://ludwig.lub.lu.se/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&AuthType=ip,uid&db=a9h&AN=149751566&site=eds-live&scope=site>
- [11] G. Koo, K. Kim, J. Y. Chung, J. Choi, N.-Y. Kwon, D.-Y. Kang, and H. Sohn, "Development of a high precision displacement measurement system by fusing a low cost rtk-gps sensor and a force feedback accelerometer for infrastructure monitoring," *Sensors*, vol. 17, no. 12, 2017. [Internet]. Tillgänglig: <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/12/2745>
- [12] M. Perez-Ruiz, D. C. Slaughter, C. Gliever, and S. K. Upadhyaya, "Tractor-based real-time kinematic-global positioning system (rtk-gps) guidance system for geospatial mapping of row crop transplant," *Biosystems Engineering*, vol. 111, no. 1, pp. 64–71, 2012. [Internet]. Tillgänglig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S153751101100184X>
- [13] F. Noack and A. Larsen, "The contrasting effects of farm size on farm incomes and food production," *Environmental Research Letters*, vol. 14, no. 8, p. 084024, jul 2019. [Internet]. Tillgänglig: <https://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/ab2dbf>
- [14] R. Akhter and S. A. Sofi, "Precision agriculture using iot data analytics and machine learning," *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, vol. 34, no. 8, Part B, pp. 5602–5618, 2022. [Internet]. Tillgänglig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319157821001282>
- [15] M. A. Khan, A. Alqahtani, A. Khan, S. Alsubai, A. Binbusayyis, M. M. I. Ch, H.-S. Yong, and J. Cha, "Cucumber leaf diseases recognition using multi level deep entropy-elm feature selection," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 2, 2022. [Internet]. Tillgänglig: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/2/593>
- [16] A. Meshram, A. Vanalkar, K. Kalambe, and A. Badar, "Pesticide spraying robot for precision agriculture: A categorical literature review and future trends." *Journal of Field Robotics*, vol. 39, no. 2, pp. 153 – 171, 2022. [Internet]. Tillgänglig: <https://ludwig.lub.lu.se/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&AuthType=ip,uid&db=inh&AN=21747955&site=eds-live&scope=site>

- [17] A. S. A. Ghafar, S. S. H. Hajjaj, K. R. Gsangaya, M. T. H. Sultan, M. F. Mail, and L. S. Hua, "Design and development of a robot for spraying fertilizers and pesticides for agriculture." *Materials Today: Proceedings*, 2021. [Internet]. Tillgänglig: <https://ludwig.lub.lu.se/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&AuthType=ip,uid&db=edselp&AN=S2214785321021933&site=eds-live&scope=site>
- [18] C. Cordill and T. Grift, "Design and testing of an intra-row mechanical weeding machine for corn." *Biosystems Engineering*, vol. 110, no. 3, pp. 247 – 252, 2011. [Internet]. Tillgänglig: <https://ludwig.lub.lu.se/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&AuthType=ip,uid&db=edselp&AN=S153751101100122X&site=eds-live&scope=site>
- [19] S. A. Shearer and S. K. Pitla, *Precision Planting and Crop Thinning*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014, pp. 99–124. [Internet]. Tillgänglig: https://doi.org/10.1007/978-94-007-7512-1_6
- [20] R. L. Nielsen, "Stand establishment variability in corn," *AGRY-91-01*, 1993. [Internet]. Tillgänglig: agry.purdue.edu/ext/pubs/AGRY-91-01_v5.pdf
- [21] C. Bee Khim, P. Omara, N. Macnack, J. Mullock, S. Dhital, and W. Raun, "Effect of seed distribution and population on maize (zea mays l.) grain yield." *International Journal of Agronomy*, pp. 1 – 8, 2014. [Internet]. Tillgänglig: <https://ludwig.lub.lu.se/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&AuthType=ip,uid&db=a9h&AN=100483766&site=eds-live&scope=site>
- [22] B. Yan, G. Wu, Y. Xiao, H. Mei, and Z. Meng, "Development and evaluation of a seed position mapping system." *Computers & Electronics in Agriculture*, vol. 190, p. N.PAG, 2021. [Internet]. Tillgänglig: <https://ludwig.lub.lu.se/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&AuthType=ip,uid&db=a9h&AN=153371600&site=eds-live&scope=site>
- [23] M. Nørremark, H. Søgaard, H. Griepentrog, and H. Nielsen, "Instrumentation and method for high accuracy geo-referencing of sugar beet plants," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 56, no. 2, pp. 130–146, 2007. [Internet]. Tillgänglig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169907000208>
- [24] Y. Yanxin, C. Liping, M. Zhijun, L. Bin, L. Changhai, F. Weiqiang, M. Hebo, and Q. Wuchang, "Design and evaluation of a maize monitoring system for precision planting." *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol. 11, no. 4, pp. 186 – 192, 2018. [Internet]. Tillgänglig: <https://ludwig.lub.lu.se/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&AuthType=ip,uid&db=inh&AN=18697248&site=eds-live&scope=site>
- [25] Lantmäteriet. Gps och andra gnss. lantmateriet.se. <https://www.lantmateriet.se/sv/geodata/gps-geodesi-och-swepos/GPS-och-satellitpositionering/GPS-och-andra-GNSS/> (hämtad 2023-04-06).

- [26] North Group LTD. (2005) Gps, gnss and geodesy concepts. <https://northsurveying.com/index.php/soporte/gnss-and-geodesy-concepts> (hämtad 2023-04-06).
- [27] L. Wanninger. (2008) Introduction to network rtk. <http://www.wasoft.de/e/iagwg451/intro/introduction.html> (hämtad 2023-04-06).
- [28] Lantmäteriet. Rtk. <https://www.lantmateriet.se/sv/geodata/gps-geodesi-och-swepos/GPS-och-satellitpositionering/Metoder-for-GNSS-matning/RTK/> (hämtad 2023-04-07).
- [29] Lantmäteriet. Swepos. <https://www.lantmateriet.se/swepos> (hämtad 2023-04-07).
- [30] Lantmäteriet. Nätverks-rtk. <https://www.lantmateriet.se/sv/geodata/gps-geodesi-och-swepos/swepos/swepos-tjanster/natverks-rtk/> (hämtad 2023-04-07).
- [31] "Geographic information – referencing by coordinates, iso 19111:2019," 2019. [Internet]. Tillgänglig: <https://www.iso.org/standard/74039.html>
- [32] L. Krüger, "Konforme abbildung des erdellipsoids in der ebene." *Veröffentlichung Königlich Preussischen Geodätischen Institutes*, vol. 52, p. 172, 1912. [Internet]. Tillgänglig: <http://bib.gfz-potsdam.de/pub/digi/krueger2.pdf>
- [33] M. Hiroshi, "Re-evaluation of the first formula given in krueger(1912) for the gauss-krueger projection," *JpGU 2008 Proceedings*, 2008, (hämtad 2023-05-18). [Internet]. Tillgänglig: https://www2.jpгу.org/meeting/2008/program/pdf/J166/J166-P002_e.pdf
- [34] Lantmäteriet. Sweref 99, projektioner. <https://www.lantmateriet.se/sv/geodata/gps-geodesi-och-swepos/Referenssystem/tvdimensionella-system/sweref-99-projektioner/> (hämtad 2023-05-18).
- [35] lady ada, "Micro sd card breakout board tutorial," 2022, (hämtad 2023-05-20). [Internet]. Tillgänglig: <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-micro-sd-breakout-board-card-tutorial.pdf>
- [36] Sparkfun Electronics, "Sparkfun rtk express plus kit," (hämtad 2023-05-20). [Internet]. Tillgänglig: <https://www.sparkfun.com/products/18589>
- [37] u-blox. (2023) Zed-f9r: High precision sensor fusion gnss receiver integration manual. https://content.u-blox.com/sites/default/files/ZED-F9R_Integrationmanual_UBX-20039643.pdf (hämtad 2023-04-26).
- [38] P. Hannifin. (2018) 3dm-cx5-25 user manual. https://www.microstrain.com/sites/default/files/3dm-cx5-25_user_manual_8500-0082_rev_b_0.pdf (hämtad 2023-05-21).
- [39] Väderstad AB. Tempo, en ny generation precisionssåmaskin. <https://www.vaderstad.com/se/precisionssadd/tempo-precisionssamaskin/> (hämtad 2022-02-01).
- [40] Lantmäteriet. Uppkoppling mot tjänsten. <https://www.lantmateriet.se/sv/geodata/gps-geodesi-och-swepos/swepos/swepos-tjanster/natverks-rtk/uppkopplingsinformation/> (hämtad 2023-05-21).

- [41] N. Seidle, "Sparkfun rtk express plus," 2021, (hämtad 2023-05-21). [Internet]. Tillgänglig: https://cdn.sparkfun.com/assets/a/8/9/f/a/SparkFun_RTK_Express_Plus.pdf
- [42] National Marine Electronics Association (NMEA). Nmea 0183. <https://www.nmea.org/nmea-0183.html> (hämtad 2023-05-21).
- [43] u-blox. (2023) ublox 8 / u-blox m8: Receiver description including protocol specification. https://content.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/u-blox8-M8_ReceiverDescrProtSpec_UBX-13003221.pdf (hämtad 2023-05-21).
- [44] Arduino, "Sd - arduino reference," (hämtad 2023-05-21). [Internet]. Tillgänglig: <https://reference.arduino.cc/reference/en/libraries/sd/>
- [45] Arduino, "Spi - arduino reference," (hämtad 2023-05-21). [Internet]. Tillgänglig: <https://reference.arduino.cc/reference/en/language/functions/communication/spi/>
- [46] semuadmin, "pyubx2," 2023, (hämtad 2023-05-21). [Internet]. Tillgänglig: <https://pypi.org/project/pyubx2/1.2.25/>
- [47] The MathWorks, Inc, "Timetables," 2023, (hämtad 2023-05-21). [Internet]. Tillgänglig: <https://se.mathworks.com/help/matlab/timetables.html>