



Utvärdering av precisionen i en autonom terrängfordonsplattform's kranspetspositionering

Evaluation of the precision of an autonomous vehicle platform's crane-tip positioning

Martin Sedin

Examensarbete • 30 HP
Sveriges lantbruksuniversitet, SLU
Skogsfakulteten, Institutionen för skogens biomaterial och teknologi
Jägmästarprogrammet
Rapport från Institutionen för skogens biomaterial och teknologi, 2022:6
Umeå 2022



Utvärdering av precisionen i en autonom terrängfordonsplattformskranspetspositionering

Martin Sedin

Handledare:	Ola Lindroos, Sveriges lantbruksuniversitet, Skogens biomaterial och teknologi
Examinator:	Tomas Nordfjell, Sveriges lantbruksuniversitet, Skogens biomaterial och teknologi
Omfattning:	30 HP
Nivå och fördjupning:	Avancerad nivå
Kurstitel:	Mastersarbete i skogsvetenskap, A2E – Skogens biomaterial och teknologi
Kurskod:	EX0956
Program/utbildning:	Jägmästarprogrammet
Kursansvarig inst.:	Institutionen för skogens biomaterial och teknologi
Utgivningsår:	2022
Utgivningsort:	Umeå
Illustration:	Martin Sedin
Serietitel:	Rapport från Institutionen för skogens biomaterial och teknologi
Delnummer i serien:	2022:6
Nyckelord:	Självkörande, självgående, skotare, skotning, kranrörelser, sensorer, algoritmer

Sammanfattning

Skogsbranschen har möjlighet att fortsätta den teknologiska utvecklingen för att höja produktiviteten i skogen, men det krävs innovation, utveckling och investering. I de nordiska länderna bedrivs skogsbruk med kortvirkesmetoden, där en skördare och en skotare används. Kortvirkesmetoden har många arbetsmoment som skulle kunna autonomiseras, vilket skulle innebära ekologiska-, ekonomiska och sociala fördelar. Ett tidskrävande arbetsmoment för skotaren är kranarbetet, som består av att förflytta kranen, gripa stockar och lasta dessa i skotarens lastutrymme. Dessa arbetsmoment kräver hög noggrannhet och precision för att genomföras lyckosamt. I den här studien används en terrängfordonsplattform som har utvecklats för att autonomisera en skotares arbete.

Syftet med studien var att undersöka precision och noggrannhet i terrängfordonsplattformens kranpetspositionering. Positioneringen utfördes på olika avstånd och vinklar från terrängfordonsplattformen samt med och utan last i gripen. Variansanalyser i programvaran Minitab gjordes för att fastställa om det fanns skillnader i kranpetspositioneringen beroende de testade behandlingarna.

Kranpetsen positionerade sig 31 till 44 centimeter ifrån målpositionen, vilket var kranpetspositioneringens noggrannhet. Kranpetsen kunde genomföra återkommande positioneringar inom 2 centimeter till 3 centimeter från tidigare positioneringar, vilket var kranpetspositioneringens precision. Resultatet från variansanalysen visade signifikanta huvudeffekter av avstånd, vinkel och last. Det innebär att terrängfordonsplattformens kranpetspositioneringens noggrannhet och precision påverkades av olika avstånd och vinklar samt om gripen är lastad eller inte. Noggrannheten försämrades på längre avstånd och om gripen var lastad. De tio första och sista kranpetspositioneringarna utfördes med samma målposition för att utvärdera terrängfordonsplattformens maskininläring för förbättrad kranpetspositionering. Det konstaterades det att under datainsamlingens gång hade terrängfordonsplattformen förbättrat kranpetspositioneringen med 1 cm.

Studien visar att terrängfordonsplattformen kan autonomt placera kranpetsen vid en målposition med bra precision men med mindre bra noggrannhet. Detta är framsteg för den teknologiska utvecklingen inom skogsbruket och utveckling inom autonomisering.

Nyckelord: Självkörande, självgående, skotare, skotning, kranrörelser, sensorer, algoritmer

Abstract

The forest industry has the opportunity to continue the technological development to increase productivity in the forest, but innovation, development and investment are required. In the Nordic countries, forestry is conducted using the cut-to-length method, where a harvester and a forwarder are used. The cut-to-length method has many work elements that could be automatized, which would mean ecological, economic and social benefits. A time-consuming work element for the forwarder is the crane work, which consists of moving the crane, gripping logs and loading them into the forwarder's load space. These steps require high accuracy and precision to be completed successfully. This study uses an off-road vehicle platform that has been developed to automatize a forwarder's work.

The purpose of this study was to investigate the precision and accuracy of the off-road vehicle platform's crane tip positioning. The crane tip positioning was performed at different distances and angles from the off-road vehicle platform and with and without load in the grapple. Analysis of variance in the Minitab software was done to determine if there was a difference in the crane tip positioning depending on the tested treatments.

The crane tip was positioned 31 to 44 centimeter from the target position, which was the accuracy of the crane tip positioning. The crane tip could perform recurring positioning's within 2 to 3 centimeter from previous positioning's, which was the precision of the crane tip positioning. The results from the analysis of variance showed significant main effects of distance, angle and load. This means that the off-road vehicle platform's crane tip positioning accuracy and precision are affected by different distances and angles and whether the grapple is loaded or not. Accuracy deteriorated over longer distances and with load. The first ten and the last crane tip positioning's were performed with the same target position to evaluate the off-road vehicle platform's machine learning for improved crane tip positioning. It was found that during the data collection, the off-road vehicle platform had improved the crane tip positioning by 1 cm.

The study shows that the off-road vehicle platform can autonomously place the tip of the crane at a target position with a good precision but with less good accuracy. This is progress for the technological development in forestry and the development in autonomy.

Keywords: Self-driving, autopilot, forwarder, forwarding, crane movements, sensors, algorithms

Förord

Jag vill tacka min handledare Ola Lindroos vid institutionen för skogens biomaterial och teknologi för ovärderlig hjälp genom hela arbetet.

Håkan Lideskog (Luleå tekniska universitet), Pedro La Hera (Sveriges lantbruksuniversitet) och Omar Mendoza Trejo (Sveriges lantbruksuniversitet) - utan er hade det inte funnits någon data, stort tack! Hilda Edlund vid institutionen för skoglig resurshushållning - utan dina svar hade jag fortfarande kämpat med den statistiska analysen. Jag vill även tacka Hugo Eriksson, jägmästarstudent, som hjälpte till under datainsamlingen i Luleå.

Slutligen vill jag tacka min cocker spaniel Luna för att du drog ut mig på långa promenader där det fanns tid för reflektion och återhämtning vilket gav mig perspektiv.

Martin Sedin
Nordmaling, 2022

Innehållsförteckning

Tabellförteckning	8
Figurförteckning	9
1. Inledning	10
1.1. Bakgrund.....	10
1.2. Tillämpad automatisering och framtida autonomisering.....	11
1.2.1. Gruvindustrin, jordbruket och transporter.....	11
1.2.2. Skogsbruket	12
1.2.3. Kранteknik och sensorer	13
1.3. Autonomisering i skogsbruket.....	14
1.4. Syfte	15
2. Material och metod	16
2.1. Datainsamling.....	17
2.1.1. Material	17
2.1.2. Försöksuppställning	18
2.1.3. Datainsamling	19
2.2. Validering av mätutrustning	21
2.3. Databearbetning.....	22
2.3.1. Positionering av kranpelare i förhållande till SWEREF 99 TM	22
2.3.2. Konvertering av SWEREF 99 TM koordinater till lokala koordinater.....	23
2.4. Analys av inhämtad data.....	24
2.4.1. Statistiska analyser.....	24
3. Resultat	26
3.1. Kranspetsens verkliga position i förhållande till målposition	26
3.2. Styrsystemets indikering av kranspetsens position i förhållande till målposition ..	34
3.2.1. Utvärdering av algoritmens utveckling under studiegenomförandet.....	37
4. Diskussion	39
4.1. Resultatdiskussion.....	39
4.2. Metoddiskussion	40
4.3. Tillämpning och vidare forskning	41

Referenser	42
Bilagor	47

Tabellförteckning

Tabell 1. Försöksuppställning och ordning som studien genomfördes.....	20
Tabell 2. Resultaten från valideringen av mätutrustningens precision; standardavvikelse samt högsta och lägsta differens mellan enskilt mätvärde och medelvärde för de 10 observationerna per position.....	22
Tabell 3. Medeldifferensen (noggrannheten) och standardavvikelsen (precisionen) mellan verklig position och målposition i X-, Y-, Z-led och euklidiskt avstånd. Inom kolumnerna så har signifikant skilda medelvärden olika upphöjda bokstäver (n=10).....	33
Tabell 4. Medeldifferensen (noggrannheten) och standardavvikelsen (precisionen) mellan styrsystemet och målposition i X-, Y-, Z-led och euklidiskt avstånd. Inom kolumnerna så har signifikant skilda medelvärden olika upphöjda bokstäver (n=10).....	36
Tabell 5. Medeldifferensen (noggrannheten) och standardavvikelsen (precisionen) mellan verklig position och målposition i X-, Y-, Z-led och euklidiskt avstånd. Inom kolumnerna så har signifikant skilda medelvärden olika upphöjda bokstäver (n=10).....	38

Figurförteckning

Figur 1. Precision och noggrannhet. Måltavla A har hög precision och hög noggrannhet, måltavla B har hög precision men låg noggrannhet, måltavla C har låg precision och låg noggrannhet.	14
Figur 2. Datasamling av kranpetsens verkliga position med mätutrustning.	16
Figur 3. En illustration av de ingående delarna i TFPs kran (Hera et al. 2021). Fyra frihetsgrader återfinns vid pelare q1, lyftarm q2, vipparm q3, utskjut q4.	17
Figur 4. Styrsystemets lokala koordinatsystem.	18
Figur 5. Tredimensionell figur över försöksuppställningen. A, B, C, D är de olika målpositionerna, triangeln är TFPens nollpunkt och kvadraten är startpositionen för kranen.	19
Figur 6. Positionen för kranpetsens centrumpunkt visas med vit genomskinlig pil och positionen för insamling av koordinater visas som vit pil.	21
Figur 7. Figur över positioneringen av kranpelaren sedd ovanifrån.	23
Figur 8. Differensen i X-led mellan kranpetsens verklig position och målposition. Linjerna redovisas efter vilken målposition kranpetsen placerades mot och om gripen bar last eller ej (Tabell 1, Figur 5).	27
Figur 9. Differensen i Y-led mellan kranpetsens verklig position och målposition. Linjerna redovisas efter vilken målposition kranpetsen placerades mot och om gripen bar last eller ej (Tabell 1, Figur 5).	28
Figur 10. Differensen i Z-led mellan kranpetsens verklig position och målposition. Linjerna redovisas efter vilken målposition kranpetsen placerades mot och om gripen bar last eller ej (Tabell 1, Figur 5).	29
Figur 11. Differensen i euklidisk avstånd mellan kranpetsens verklig position och målposition. Linjerna redovisas efter vilken målposition kranpetsen placerades mot och om gripen bar last eller ej (Tabell 1, Figur 5).	30

1. Inledning

1.1. Bakgrund

Under 1900-talet har svenskt skogsbruk gått från att utföras manuellt till att mekaniseras och på senare år har olika arbetsmoment automatiserats (Hellström et al. 2008). Mekaniseringsgraden i svenskt skogsbruk ökade på 1950-talet vilket ledde till ökad produktivitet (Thorsén & Thor 2015). Det nordamerikanska skogsbruket imiterades i Sverige under 1960-talet med att motormanuellt fälla träd med motorsåg, maskinellt kvista med en kvistare och transportera hela stammen med lunnare (Björheden 2014). Samtidigt fick skogsmaskiner en större roll (Ager 2016) och trakthyggesbruk blev det dominerande skötselsystemet i Sverige (Albrektson et al. 2012). I slutet på 1960-talet konkurrerade trekvartsbandare, midjestyrda skotare och lunnare ut hästtransporter av virke från skog till väg (Andersson 2004; Adelhult & Hennersson 2014; Nordfjell et al. 2019). Näringslivet, forskningsinstitut och maskintillverkare samarbetade för att utveckla skogsbruket och skogsföretagen investerade i nya skogsmaskiner vilket gjorde att skogsbruket i Sverige fick en mekaniseringsgrad på 65% under 1980-talet (Andersson 2004). Under 1970-talet presenterade ÖSA den första svenska skördaren vilket medförde att utvecklingen i Sverige helt och hållet inriktade sig mot den mekaniserade kortvirkesmetoden där träden avverkas redan på avverkningsplatsen (Andersson 2004). Under 1980-talet presenterades engreppsskördaren med sitt kranspetsmonterade aggregat (Andersson 2004). Ett decennium senare standardiserades kommunikationen mellan skogsmaskin och datorer, kallad StandfordD.

Globalt avverkas ungefär 2 miljarder m³fub industriellt rundvirke årligen (Lundbäck et al. 2020). År 2016 avverkades 37% av det industrialiserade rundvirket i världen med mekaniserad kortvirkesmetod, 33% med mekaniserad helträdsmetoden och 30% med andra avverkningsmetoder t.ex. vinschavverkningsar, delvis mekaniserade avverkningar och manuell avverkning. I Sverige används mekaniserad kortvirkesmetod till 95% och resterande 5% är alternativa avverkningsmetoder. Under 2019 uppgick Sveriges nettoavverkning till 74,4 miljoner m³fub (Skogsstyrelsen 2021).

I Sverige finns några tusen registrerade skogsmaskiner och varje år nyregistreras ett par hundra. En skogsmaskin kostar flera miljoner vilket gör att entreprenörer behöver upprätthålla ett högt tekniskt utnyttjande på sina maskiner för att gå med vinst. Detta kan leda till långa arbetspass med en arbetsmiljö präglad av vibrationer, återupprepande rörelser och ensamarbeten (Häggström 2015). Utöver de fysiska påfrestningarna, orsakar upprepade monotona arbetsmönster trötthet hos maskinförarna. Arbetsplatsen är utmanad på grund av varierade terrängförhållanden, skandinaviska årstider med dåliga ljusförhållanden, nederbörd, vind och snö. Utöver det höga priset på skogsmaskinen utgör förarlönen en stor andel av kostnaderna (Lindroos et al. 2019). Under 2000-talet avstannade den ständigt ökade produktiviteten som funnits i svenskt skogsbruk. Nästa steg för att skogsbolag och maskinentreprenörer ska få bättre lönsamhet, ökad säkerhet och en kortare inlärningsperiod i skogsbruket skulle kunna vara genom automatiseringar (Löfgren et al. 2002; Adelhult & Hennersson 2014).

1.2. Tillämpad automatisering och framtida autonomisering

Robotar har använts för att ersätta, transportera, assistera och underhålla människor, mer specifikt har robotiken ansetts vara lösningen till farliga, smutsiga och tråkiga arbeten (Murphy 2019). Det finns olika nivåer av automation, från att operatören får stöttning till att endas övervaka det automatiska systemet (Lindroos et al. 2017). En automatiserad robot vägleds i en känd miljö (Nationalencyklopedin 2021) till skillnad från en autonomiserad robot som verkar i en okänd miljö och vägleder sig själv med egna sensorer (Berkvens et al. 2012)

1.2.1. Gruvindustrin, jordbruket och transporter

Automatiserade högteknologiska maskiner är vanligt förekommande i miljöer med en förutsägbar tillverkningsprocess. Henry Ford populariserade löpande band principen vilket dagens tillverkningsproducenter anammat och utvecklat genom att använda sig av maskiner i tillverkningen. Producenter använder sig av automatiserade maskiner även kallad robotar som svetsar, lackerar, monterar, demonterar, paketerar och så vidare. Robotar förekommer inom matindustrin (Kuka 2022), i laboriemiljö (Hawker 2008), på lager (Intel 2022) men även i hemmet där hushållsrobotar dammsuger och klipper gräset. Gruvindustrin har en förutsägbar miljö där maskiner har utrustats med automatiserande funktioner, fjärrstyrning och telestyrning (Scania AB 2016; Sandvik AB 2022). Jordbruksmaskiner opererar på plana marker med få hinder och god GPS mottagning. Jordbruket har automatiserat sina maskiner på olika sätt genom bland annat börjat använda GPS vilket är ett viktigt instrument för att kunna autonomiseras (New Holland Agriculture 2016). Transportbranschen har testat

autonomiserade fordon, både förarlösa lastbilar som följer en förarstyrd lastbil samt självkörande bilar för paketutlämning (PSA International 2017; Ward 2019). FPInnovations utvecklar och demonstrerar automatiserade truckar som opererar på sågverks råvaruintag (FPInnovations 2020). Autonomisering förekommer även i krävande miljöer under vattenytan (Bingham et al. 2010). Drönare med kameror för att identifiera objekt har testats med förhoppningen att utveckla autonoma drönare. (Barry & Tedrake 2015).

1.2.2. Skogsbruket

Till skillnad från den förutsägbara miljön som finns i industrier, på jordbruksmarker eller transporter på vägar, tampas skogsbruket med en oförutsägbar miljö och har inte utvecklats lika mycket i automatisering och autonomisering. Avlägsna platser under ett tätt tak av trädkronor kan vara problematiskt för maskinens positionssystem som kräver informationsutbyte med satellitnavigering. En omväxlande markstruktur med naturligt förekommande hinder och avverkningsrester kan förvirra sensorutrustningen och lamslå skogsmaskinens beslutsystem. Det krävs mycket arbete att träna maskinens beslutssystem för att skogsmaskinen ska veta vad som ska transporteras till avlägg och vad som ska lämnas kvar i skogen. En av anledningarna till att skogsbruket ligger efter i utveckling kan vara den blygsamma försäljningen av skogsmaskiner jämfört med maskiner i jordbruk, gruvindustri och det militära (Lindroos et al. 2019). Låg försäljning avhåller investerare från att investera, vilket bromsar innovationen inom branschen. Trots det har skogsmaskiner löpande gjorts smartare med avancerad datorteknik, sensorer och mätutrustning. En fördel är att kortvirkesmetoden är en bra metod när det kommer till automatiserad avlastning, sortering och lastning av virke (Visser & Obi 2021).

I ett försök att minska skogsmaskinens markpåverkan kunde Timberjack utveckla en sexbent skördare (Heinimann 1999). Operatören styrde maskinen framåt men det var maskinsystemet som koordinerade rörelsen av de sex benen. Timberjacks skördare vidareutvecklades aldrig till något kommersiellt men den tekniska lösningen väckte intresse. En liknande automatiserad arbetsprocess återfinns i maskiner utrustade för att vinscha virke i brant terräng (Valentini teleferiche 2022). Lastning och lossning av stockar utförs med manuell fjärrstyrning medan vinschning mellan punkt A och punkt B är automatiserat. Andra exempel på fjärrstyrda maskiner är den svenska *Besten* (Bergkvist et al. 2006), en fällare-läggare (Milliken et al. 2014) som även utvecklades till att telestyras (Milliken et al. 2015).

Historiskt har skotningsarbetet utförts med en hydraulisk kran och spakar för att styra varje länk separat (Lindroos et al 2019). Dagens skogsmaskiner är utrustade med sensorer och stabilisatorer för att effektivisera och bidra till ett mer lätthanterligt skotningsarbete. Utveckling av skogsmaskinens hytt har lett till

nivellerande maskinhyttar vilket ökar komfort och möjliggör längre arbetspass och bättre arbetskvälité (Gellerstedt 1998). Skogsmaskinernas drivlinor är utrustade med sensorer för att undvika hjulspinn vilket minskar maskinslitage och markskador. Skördaraggregatet kan utrustas med ett automatiserat system med sensorer för att värdeoptimera apteringen baserat på mätning av trädets längd och diameter (Lindroos et al. 2019). All datakommunikation till och från skogsmaskinen har blivit förenklad med en global standard enligt Stanford 2010. Aptering mot prislistor kan automatiskt uppdateras på några minuter (Möller & Arlinger 2016) vilket möjliggör styrning mot efterfrågan från industrin.

Autonomisering av skogsbruket skulle kunna bidra till ett mer ekonomiskt, ekologiskt, ergonomiskt och fossilfritt uttag av skogsråvara till den cirkulära bioekonomin (Lindroos et al. 2019). Utmaningarna att applicera autonom teknik på skogsmaskiner är bland annat den ostrukturerade miljön i skogen (Lindroos et al. 2019). Skogsmaskiner rör sig i en avskild, ostrukturerad miljö med fyra årstider med varierande ljusförhållanden, nederbörd och vind. Det försämrar kamerors och andra sensorers förmåga att upptäcka, klassificera och fastställa avstånd till objekt. Kranarbetet i skogen är ett unikt arbetsmoment där förarens skicklighet spelar roll för produktiviteten (Purfürst & Erler 2006) vilket ställer krav på den autonoma tekniken. Utvecklingen för att upptäcka skogsråvaran med bildigenkänning, global positionering för att framföra skogsmaskinen samt sensorer för att kontrollera maskindelar har ännu inte tillräckligt hög precision (Andersen et al. 2009; Lindroos et al. 2015, 2019). Framsteg har tagits för skotaren då den befinner sig i en mer strukturerad miljö och kan följa en förutbestämd väg med centimeterprecision när en skördare har stakat ut rutten (Ringdahl et al. 2011). Nästa steg för autonoma skogsmaskiner blir att identifiera och lasta stockar.

1.2.3. Kranteknik och sensorer

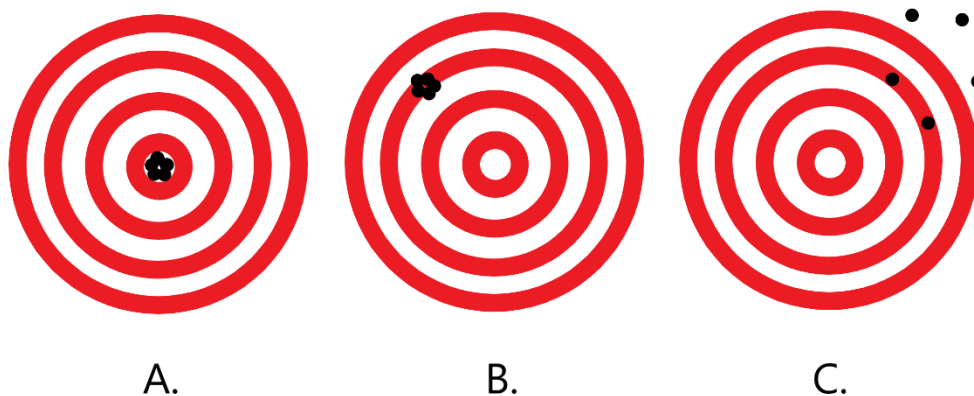
Kranarbetet utgör en stor del av skotningsarbetet (Manner et al. 2013, 2016) och för att ge en snabbare inlärningsprocess och upprätthålla en hög produktivitet bör kranen vara lätthanterlig (Löfgren & Egermark 2005). Skotningsarbete består av att flytta kranen mot en stock, gripa stocken och sedan flytta kranen tillbaka för att slutligen lossa stocken med gripen. Om kranförflyttningen kunde ske automatiskt skulle 60% av operatörens arbetsuppgifter ske automatiskt (Hera et al. 2021). Detta innebär att operatören endast skulle behöva fokusera på att gripa stocken och lossa stocken.

En typisk skotarkran är utrustad med hydrauliska manipulatorer med fyra variabler, tre rotationsvinklar och en linjär förskjutning, som bestämmer positioneringen av gripen. Dessutom justeras positionen av gripen med hjälp av en rotator. I skotarhytten använder operatören två joysticks för att positionera kranen. Joystickerna skicka elektiska signaler till det hydrauliska styrsystemet. Styrsystemet

använder elektrohydrauliska ventiler för att styra flödet. Ventilerna påverkar de hydrauliska ställdonen och varje länk i kranarmen kan flyttas individuellt.

Med hjälp av sensorer och programvaror har skogsmaskintillverkarna applicerat kranspetsstyrning på skogsmaskiner vilket lett till förenklat kranarbete. Operatören fokuserar på kranspetsens rörelseriktning istället för att styra varje enskild krandel vilket har höjt produktiviteten och kranarbetet har blivit mer nybörjarvänligt (Manner et al. 2017, 2019; Englund et al. 2018). John Deere, Ponsse, Komatsu och Cranab har alla sin variant av kranspetsstyrning i sina kranar. Automatisering av kranen har lett till jämnare motorgång och sänkta effektoppar vilket minskar maskinslitage och bränsleförbrukning. Kranens ändlägesdämpning minskar skakningar i förarhytten, slitage på maskinen och ger föraren mer komfort. Säkerheten har blivit bättre genom bland annat förarassistent vilket undviker att aggregatet matar stocken mot förarhytten. Maskinsystemens utveckling skapar även en bättre arbetsmiljö med mindre vibreringar och stötar från kranen, vilket annars kan vara en anledning till arbetsskador (Häggström et al. 2016).

Vid kranarbete eftersträvas både god precision och noggrannhet (figur 1). Om en kran har en hög precision men låg noggrannhet kan noggrannheten justeras för att positionera sig rätt.



Figur 1. Precision och noggrannhet. Träffarna i på måltavla A har hög precision och hög noggrannhet, på måltavla B har dom hög precision men låg noggrannhet, och på måltavla C har dom låg precision och låg noggrannhet.

Figure 1. Precision and accuracy. The hits on target A has high precision and high accuracy, on target B, they have high precision but low accuracy, and on target C, they have low precision and low accuracy.

1.3. Autonomisering i skogsbruket

Automation har även nått skogsbruket med ansatser till att göra skogsmaskinerna självständiga. En semi-autonom prototyp har utvecklats som förflyttar sig mellan

träd genom att greppa dem med två mekaniska armar (Meaclem et al. 2015). Trots att det spekuleras om vilka fördelar autonoma fordon kommer innebära finns det nästan ingen information om den faktiska produktivitetsförbättringen (Visser & Obi 2021). I en genomgång av robotisering kunde det konstateras att gripa föremål i dynamiska och ostrukturerade miljöer är en av de största utmaningarna i autonomitet (Christensen 2016). Det är främst forskning om autonoma kranrörelser som har studerats (La Hera & Ortíz Morales 2019) och ett autonomt skotningsarbete har visats sig spara tid (Morales et al. 2015). När planerade kranrörelser har demonstrerats autonomt har styrsystemet indikerat hög precision och noggrannhet med en avvikelse på några millimeter från den planerade rörelsen (Hera et al. 2021). Det finns anledning att tro att noggrannheten kan påverkas av olika faktorer eftersom sensorerna inte känner av t.ex. böjningar i krandelarna. En kran som opererar med olika last i gripen och på olika avstånd från kranens mittpunkt kan påfresta krandelarna på olika sätt. Därför är det av intresse att kontrollera kranpetspositionering med en separat mätutrustning. För att testa och validera olika autonoma styrsystem och teknisk utrustning har en terrängfordonsplattform, vilket framledes förkortas TFPn, utvecklats (Lideskog et al. 2015). På TFPn sitter en skotarkran som kommer att utvärderas i denna rapport.

1.4. Syfte

Syftet med studien var att undersöka precision och noggrannhet i kranpetspositionering utförd av en autonom terrängfordonsplattform med inbyggda sensorer och en styralgoritm. Följande frågeställningar besvarades:

- Med vilken precision och noggrannhet kunde kranpetspositioneringen genomföras?
- Skiljer sig styrsystemets definierade kranpetsposition från den verkliga kranpetspositionen?
- Påverkas noggrannheten och precisionen av målpositionens avstånd och vinkel från maskinen, samt om gripen bär last eller inte?

2. Material och metod

Arbetet inleddes med insamling av data i Luleå den 20 oktober 2021, följt av bearbetning av data för statistiska analyser. Vid datainsamlingen var vädret mulet med konstant men sparsamt regn, och en temperatur på ca 6 °C. Mätutrustningen för att kontrollera den verkliga kranspetspositionen var en Trimble GeoXR 6000 monterad på en 2 meter lång teleskopisk stång. Trimble är en handdator utrustad med en GNSS-mottagare, *Global Navigation Satellite System*, som positionerar mot SWEREF 99 TM genom Telia mobila nätverk.



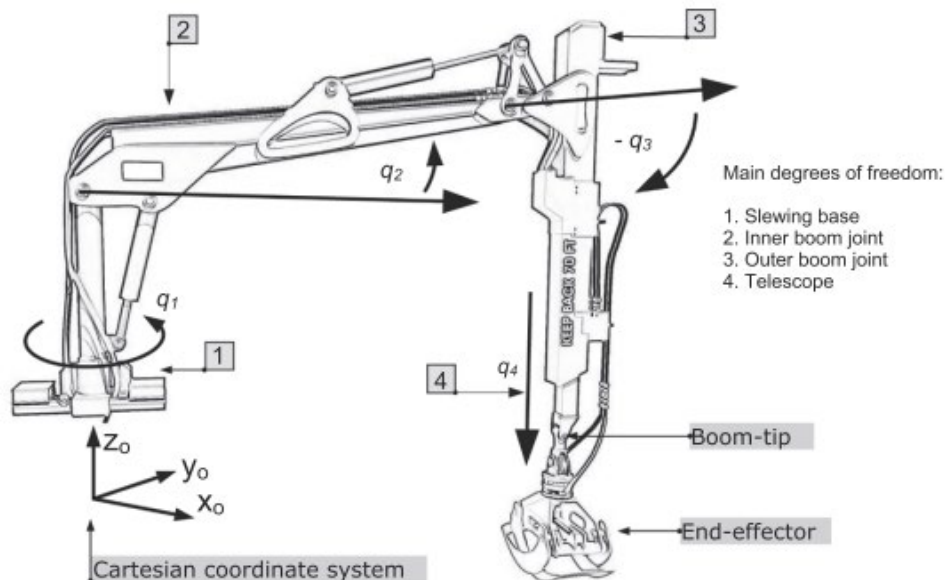
Figur 2. Datainsamling av kranspetsens verkliga position med mätutrustning.

Figure 2. Collection of data from the actual position of the crane tip using measurement equipment.

2.1. Datainsamling

2.1.1. Material

TFPn var utrustad med FC8 dubbel teleskopkran med 10 meter räckvidd och en CR250 grip (Lideskog et al. 2015) med en max gripvidd på 1443 mm. Både kran och grip var från Cranab (Cranab 2015). Kranen har en lyftkapacitet på 9,2 kN vid 5,8 meter och 17,7 kN vid 3,0 meter. Kranen var utrustad med CRANAB Intelligent System (CIS), vilket innebär att den hade inbyggda sensorer i kranen för pelare, lyftarm, vipparm och utskjut (figur 3). TFPn var utrustad med ett K170LS hydraulblock (Parker Hannifin Corporation 2010) och en A10V(S)O series 31 axial piston variable pump (Rexroth Bosch Group 2017).



Figur 3. En illustration av de ingående delarna i TFPs kran (Hera et al. 2021). Fyra frihetsgrader återfinns vid pelare q_1 , lyftarm q_2 , vipparm q_3 , utskjut q_4 .

Figure 3. An illustration of the components of the forwarder crane (Hera et al. 2021). Four degrees of freedom are found at slewing base q_1 , inner boom joint q_2 , outer boom joint q_3 , telescope q_4 .

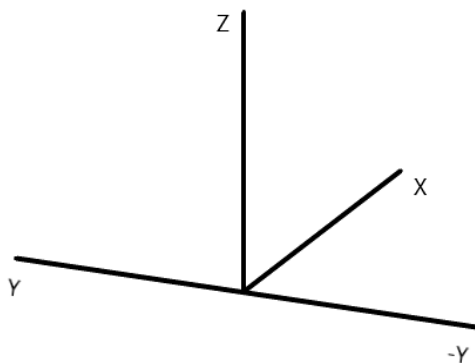
Sensorerna övervakade kontinuerligt positionen på var och en av kranarmens fyra delar (pelare, lyftarm, vipparm och utskjut). Detta ger tillräcklig information för att möjliggöra automatisering av återkommande operationer, genom att kontrollera rörelser med programvara för artificiell intelligens. Cranab delger ingen information om vilken typ av sensorer de använder, på grund av patentskydd och sekretess i produktutvecklingen.

Kranens kinematiks struktur består av ett roterande vridhus för kranpelaren (1 i figur 3) och tre leder, två drivs av hydrauliska cylindrar och därutöver utskjutet

(figur 3). Inom robotiken så definieras en robots frihetsgrader utifrån antalet rörliga leder. Det innebär att en skotarkran har fyra frihetsgrader, bortsett från gripen. De fyra frihetsgraderna kan kombineras till en mängd olika rörelser.

För att kranen autonomt ska utföra en rörelse krävs två algoritmer. Den första algoritmen är rörelseplaneringen (Hera et al. 2021) som planerar hur kranrörelsen ska se ut för att positionera kranspetsen, vad gäller ledpositioner och de hastigheter och accelerationer som rörelsen ska innehålla. Den andra algoritmen är rörelsekontrollsystemet (Hera & Morales 2015) som utför kranrörelsen enligt rörelseplaneraren, genom att delge de signaler som krävs för att aktivera vridhusets, hydraulcylindrarnas och utskjutets rörelser. Algoritmerna har även en maskininlärningsaspekt vilket innebär att kranrörelserna förbättras med tiden (Hera et al. 2021). En UEISIM 1200 dator (UEISIM 2022) kopplar samman och styr rörelseplanerings algoritmen och rörelsekontroll algoritmen för att kontrollera kranen. Det vill säga alla ingående signaler från sensorerna och utgående styr signaler till kranen kommer passera UEISIM 1200 datorn. Detta kommer framgent benämnas som styrsystemet.

Koordinatsystemet som används är tredimensionellt där X-led är djupet rakt fram och rakt bak, Y-led är horisontellt och vinkelrätt mot körriktningen och Z-led är höjden som är vertikal. Värdena i det lokala koordinatsystemet ställdes upp utifrån kranens perspektiv dvs. utifrån att man tittar bakom maskinen. På kranens högra sida blir då värden i Y-led negativa och på kranens vänstra sida blir det positiva värden i Y-led (figur 4).



Figur 4. Styrsystemets lokala koordinatsystem.

Figure 4. The local coordinate system of the control system.

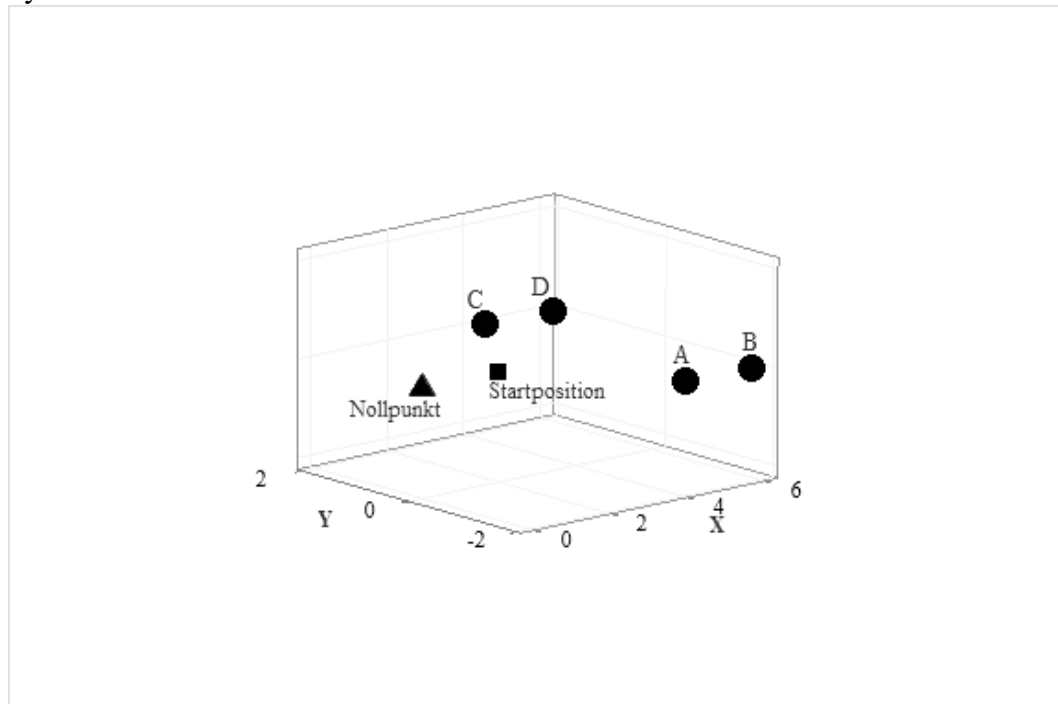
2.1.2. Försökuppställning

Vid insamling av data utför kranen en rörelse från startposition till målposition. Startpositionen var 3 meter rakt framför kranpelarcentrum (nollpunkten i koordinatsystemet) med koordinaterna $X=3,0$, $Y=0,0$ och $Z=1,0$ (figur 4). I studien

ingick två målpositioner på kranens högra sida respektive vänstra sida. Det euklidiska avståndet, dvs. avståndet i en rät linje mellan två punkter, från nollpunkten till de närmaste målpunkterna var 4,66 meter (målposition A och C) och till målpunkterna längst bort var det 6,28 meter, (målposition B och D). De närmsta målpunkterna (A och C) hade en rotationsvinkel i horisontalplanet på +24 respektive -24 grader från körriktningen och målpunkterna längst bort (B och D) hade en rotationsvinkel på +17 respektive -17 grader.

För varje målposition så gjordes 10 kranspetspositioneringen med last och 10 kranspetspositioneringar utan last i kranens grip.

Efter att data samlats in för alla 8 kombinationer av avstånd, vinkel och last så återupprepades tio kranspetspositioneringar för den första målpositionen. Detta gjordes för att utvärdera algoritmens eventuella inläring och förbättring under hela försökets genomförande. Den eventuella inläring och förbättring av återupprepade kranspetspositioneringar mot samma målpunkt utvärderades i den statistiska analysen.



Figur 5. Tredimensionell figur över försöksupställningen. A, B, C, D är de olika målpositionerna, triangeln är TFPens nollpunkt och kvadraten är startpositionen för kranen.

Figure 5. Three-dimensional figure of the experimental setup. A, B, C, D are the different target positions, the triangle is the forwarder's zero point and the square is the starting position for the crane.

2.1.3. Datainsamling

För att spara tid och variera mellan rörelse med och utan last så kunde kranen övergå mellan två målpositioner med last eller utan last. För exempelvis målposition A på en sida så började kranspetspositioneringen utan last för att sedan genomföra

kranspetspositionering med last. Därefter bibehölls lasten i gripen, och den första kranspetspositioneringen för målposition B på samma sida gjordes med last. Mätningarna med last innebar att två björkstockar placerades i gripen innan kranspetspositioneringen påbörjades. Stockarna vägdes inte, men deras total vikt skattades till 90-140 kg, baserat på en volym på 0,126-0,196 m³ och en densitet på 700 kg/m³, beräknat på en diameter på 20 centimeter i toppen på stocken och 25 centimeter i botten på stocken samt en längd på 2 meter. Kranen har en kapacitet att lyfta ungefär 1800 kg på 3,0 meter och 940 kg på 5,8 meter. Det innebär att vikten av stockarna motsvarade 5-8% av kranens lyftkapacitet på 3,0 meter och 10-15% på 5,8 meter.

Tabell 1. Försöksuppställning och ordning som datainsamlingen genomfördes

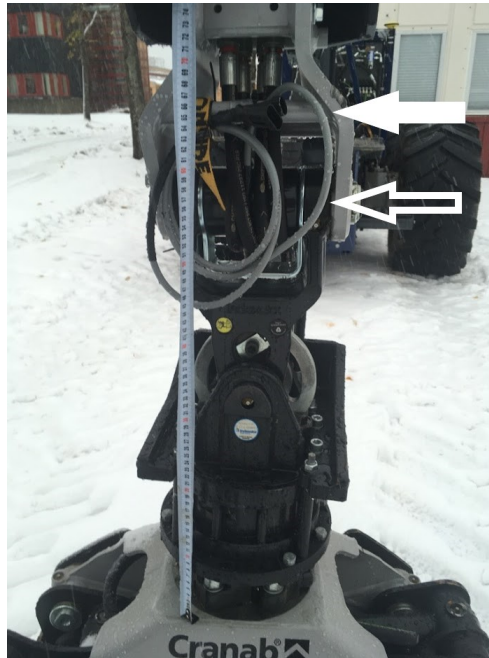
Table 1. Experimental setup and order in which the data collection was carried out

Test- ordning	Vinkel (°)	Avstånd (m)	Last	Uppprepningar (n)	Mål- position	Målkoordinat (m)		
						X	Y	Z
1	24	4,66	Nej	10	A	4,27	-	1,00
							1,86	
2	24	4,66	Ja	10	A	4,27	-	1,00
							1,86	
3	17	6,28	Ja	10	B	6,00	-	1,00
							1,86	
4	17	6,28	Nej	10	B	6,00	-	1,00
							1,86	
5	-24	4,66	Nej	10	C	4,27	1,86	1,00
6	-24	4,66	Ja	10	C	4,27	1,86	1,00
7	-17	6,28	Ja	10	D	6,00	1,86	1,00
8	-17	6,28	Nej	10	D	6,00	1,86	1,00
9	24	4,66	Nej	10	A	4,27	-	1,00
							1,86	

Det insamlade data bestod av två dataserier. Första serien var SWEREF 99 TM koordinater från GNSS-mottagaren, vilket är kranspetsens verkliga position och benämns framöver som verklig position. Andra serien var lokala koordinater från styrsystemet, vilket var kranspetsens position enligt styrsystemet.

Mätpunkten för insamling av den verkliga positionen av kranspetsen var av praktiska skäl på teleskoputskjutet (figur 6). Det innebär en förskjutning i Z-led med 10 centimeter från kranspetsens centrumpunkt, vilken är den punkt som styrsystemet positionerar. Gripen påverkades inte av något, t.ex. marken, utan hängde alltid fritt i luften vilket gjorde att förskjutningen blev lodrät i Z-led.

Stockarnas mittpunkt placerades mitt i gripen för att gripen inte skulle luta åt något håll. Detta kontrollerades visuellt vilket innebär att det kan funnits en viss lutning. Differens korrigerades i databehandlingen för att positioneringarna skulle göras mot samma punkt, genom att lägga till 10 centimeter i Z-led till den uppmätta, verkliga positionen. Positionsvärdet noterades efter några sekunders mätning, vilket var den tid det tog för mätutrustningen att konstatera den verkliga positionen med centimeterprecision.



Figur 6. Positionen för kranpetsens centrumpunkt visas med vit genomskinlig pil och positionen för insamling av koordinater visas som vit pil.

Figure 6. The position of the center point of the crane tip is indicated by a white transparent arrow and the position for collecting coordinates is shown as a white arrow.

2.2. Validering av mätutrustning

GNSS-mottagaren Trimble GeoXR 6000, som tog ut den verkliga positionen på kranpetsen, validerades för att kontrollera precision och noggrannhet. Valideringen genomfördes på studieområdet efter studiegenomförandet och skedde i två steg.

Först kontrollerades precisionen genom att fixera mätstaven i en position och genomföra tio upprepade mätningar. Resultatet från det var att mätutrustningen uppvisade centimeterprecision; standardavvikelsen var 1 centimeter i såväl X-, Y- som Z-led, och ett enskilt mätvärde avvek aldrig mer än 2 centimeter från medelvärdet (Tabell 2). Efter det fixerades mätstaven i en ny position lodrät ovanför den tidigare positionen och ytterligare tio upprepade mätningar genomfördes. Resultatet av det var att mätutrustningen uppgav ett avstånd mellan den första positionen och den andra positionen i Z-led på 26,7 centimeter när det faktiska

avståndet enligt måttbandet var 27,5 centimeter. Det innebar att mätutrustningen hade en noggrannhet på centimeternivå i Z-led. Slutligen kontrollerades noggrannheten mellan två positioner på en plan yta vilket kan ses som avstånd i X-led eller Y-led. Enligt mätutrustningen var avståndet mellan de två positionerna 75,2 centimeter och enligt måttbandet var avståndet 76,0 centimeter vilket även bekräftade noggrannhet på centimeternivå.

Tabell 2. Resultaten från valideringen av mätutrustningens precision; standardavvikelse samt högsta och lägsta differens mellan enskilt mätvärde och medelvärde för de 10 observationerna per position

Table 2. The results of the validation of the precision of the measuring equipment; standard deviation and the highest and lowest difference between individual measurement value and mean value for the 10 observations per position

Position	X-led (cm)			Y-led (cm)			Z-led (cm)		
	SD	Min	Max	SD	Min	Max	SD	Min	Max
1	1	1	1	1	-1	1	1	-2	2
2	1	-2	2	1	-2	2	1	-1	1

2.3. Databearbetning

För att genomföra statistisk analys konverterades SWEREF 99 TM koordinater från mätutrustningen till lokala koordinater. Konverteringen genomfördes genom att använda kranpelarens koordinater som nollpunkt.

2.3.1. Positionering av kranpelare i förhållande till SWEREF 99 TM

För att erhålla SWEREF 99 TM koordinater för kranpelarens nollpunkt krävdes en triangulering från två kända positioner till kranpelarens nollpunkt (figur 7). De två kända positionerna var SWEREF 99 TM koordinater på maskinens vänstra sida, L_1 , och högra sida, H_1 . De kända positionerna L_1 och H_1 togs fram med mätutrustningen. Mittpunkten, M_1 , mellan L_1 och H_1 , var en rätvinklig förskjuten position av kranpelarens nollpunkt. Mittpunkten, M_1 , användes för att räkna ut TFPs vinkel i det geografiska koordinatsystemet som bygger upp SWEREF 99 TM longitud och latitud. Terrängfordonsplattformen var vinklad med 14 grader vilket innebar att man kunde räkna ut 15,8 centimeter, Δy , och 63,9 centimeter, Δx , vilket adderades på H_1 koordinater för att erhålla kranpelarens nollpunkt. För att erhålla kranpelarens nollpunkts Z-värdet från de två kända positionerna L_1 och H_1 gjordes ett avdrag på 656,3 mm vilket var det lodräta avståndet ner till kranpelarens nollpunkt.

$$\angle \alpha = 90 - \left(\arctan \left(\frac{\text{Distance } M_1 - K_1}{\text{Distance } H_1 - M_1} \right) \times \frac{180}{\pi} \right) + \left(\arctan \left(\frac{\text{Distance } L_1 - H_1}{\text{Distance } L_1 - M_1} \right) \times \frac{180}{\pi} \right)$$

$$\Delta y = \sin\left(\angle\alpha \times \frac{\pi}{180}\right) \times \sqrt{(Distance_{M_1 - K_1})^2 + (Distance_{H_1 - M_1})^2}$$

$$\Delta x = \cos\left(\angle\alpha \times \frac{\pi}{180}\right) \times \sqrt{(Distance_{M_1 - K_1})^2 + (Distance_{H_1 - M_1})^2}$$

$$Latitude_{K_1} = H_1 - \Delta x$$

$$Longitude_{K_1} = H_1 - \Delta y$$

Där:

\angle = vinkel

H_1 = Utmätt position på maskinens högra sida

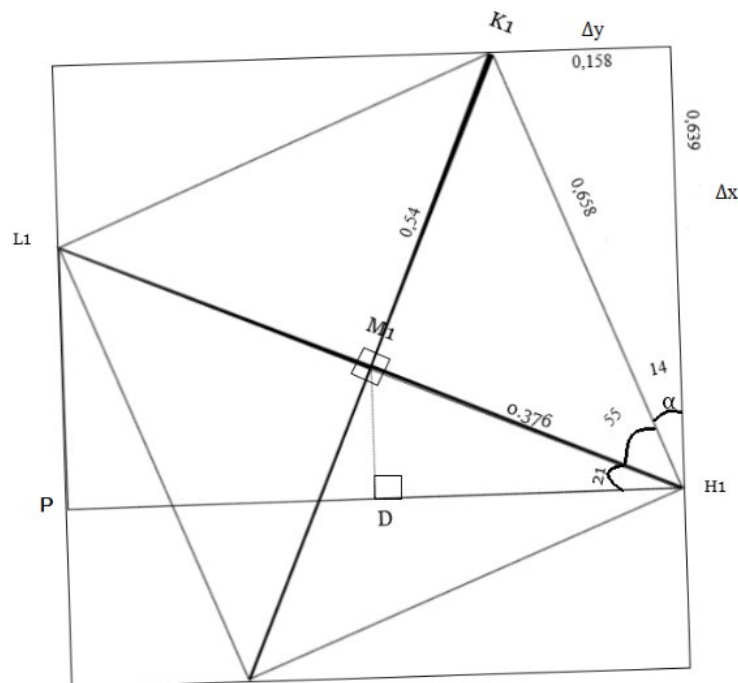
L_1 = Utmätt position på maskinens vänstra sida

M_1 = Mittpunkt mellan de två positionerna L_1 och H_1

K_1 = Kranpelarens position

Δy = avstånd i y-led kranpelaren är förskjuten från H_1

Δx = avstånd i x-led kranpelaren är förskjuten från H_1



Figur 7. Figur över positioneringen av kranpelaren sedd ovanifrån.

Figure 7. Figure of the positioning of the crane column seen from above.

2.3.2. Konvertering av SWEREF 99 TM koordinater till lokala koordinater

Konvertering av SWEREF 99 TM koordinater till lokala koordinatsystemet genomfördes enligt:

$$K_1 latitude = H_1 - \Delta X$$

$$K_1 longitude = H_1 - \Delta Y$$

$$\Delta X = \cos\left(\angle\alpha \times \frac{\pi}{180}\right) \times \sqrt{(\text{Distance}M_1 - K_1)^2 + (\text{Distance}H_1 - M_1)^2}$$

$$\Delta Y = \sin\left(\angle\alpha \times \frac{\pi}{180}\right) \times \sqrt{(\text{Distance}M_1 - K_1)^2 + (\text{Distance}H_1 - M_1)^2}$$

$$\angle\alpha = 90 - \left(\angle\text{ARCTAN}\left(\frac{\text{Distance}M_1 - K_1}{\text{Distance}H_1 - M_1}\right) \times \frac{180}{\pi}\right) + \left(\text{ARCTAN}\left(\frac{Y_{L1} - Y_{H1}}{X_{L1} - Y_{H1}}\right) \times \frac{180}{\pi}\right)$$

Där:

\angle = vinkel

H_1 = Utmätt position på maskinens högra sida

L_1 = Utmätt position på maskinens vänstra sida

M_1 = Centerpositionen mellan de två positionerna L_1 , H_1

K_1 = Kranpelarens position

Δy = avstånd i y-led kranpelaren är förskjuten från H_1

Δx = avstånd i x-led kranpelaren är förskjuten från H_1

2.4. Analys av inhämtad data

2.4.1. Statistiska analyser

Statistikprogrammet Minitab 19 användes för att analysera insamlat data. Variansanalys (ANOVA) användes för att jämföra differensen mellan verklig kranpetsposition och målposition samt styrsystemets indikering av kranpetsposition med målposition. Variansanalysen baserades på två olika avstånd och vinklar samt om gripen var lastad eller olastad. Den statistiska modellen innehöll alla interaktioner mellan behandlingarna, och exemplifieras nedan med differens i Y-led som responsvariabel. Därutöver analyserades även differens i X-led, Z-led och i euklidiskt avstånd. Detta gjordes för såväl differensen mellan verklig position och målposition som mellan sensorposition och målposition.

$$Y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \alpha_k + \gamma_{ij} + \theta_{jk} + \phi_{ik} + \delta_{ijk} + \epsilon_{ijkl}$$

Där:

Y_{ijkl} = differensen i Y-led för observation l med maskinsida i , avstånd j och last k .

μ = differensens medelvärde, oavsett avstånd, vinkel och last

τ_i = maskinsida i

β_j = avstånd j

α_k = last k

γ_{ij} = maskinsida i , på avstånd j

θ_{jk} = avstånd j , med last k

ϕ_{ik} = maskinsida i , med last k

δ_{ijk} = maskinsida i , på avstånd j , med last k

ϵ_{ijkl} = försöksfel, där $\epsilon \sim N(0, \sigma_\epsilon)$

Om ingen signifikant tvåvägsinteraktionseffekt kunde påvisas togs interaktionen bort från modellen, och på samma sätt togs icke-signifikanta tvåvägsinteraktioner därefter bort tills en slutlig modell med signifikanta effekter erhöles. Variansanalysen-modellerna analyserades genom en generell linjär modell (GLM) och skillnader mellan olika behandlingar har analyserats med hjälp av Tukey-test. Den eventuella förbättringen av upprepade kranspetspositioneringar inom omgången analyserades genom att kontrollera om upprepade kranspetspositioneringar minskade avståndet till målpunkten. Den eventuella förbättringen av upprepade kranspetspositioneringar genom testet jämfördes genom att jämföra resultatet från testordning 1 och testordning 9. Som gräns för signifikanta skillnader har 5% (dvs $p < 0.05$) använts.

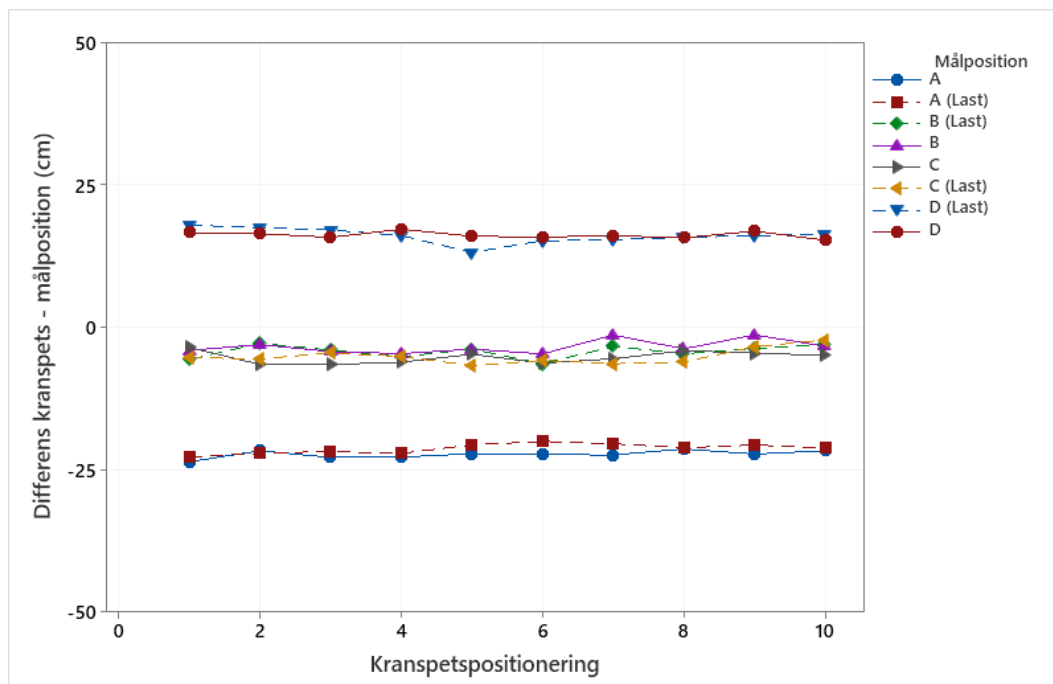
3. Resultat

Noggrannhet avser hur nära en kranspetspositionering är en målposition och precision refererar till hur nära flera kranspetspositioneringarna är varandra (figur 1). Förutsatt ett perspektiv från kranpelarens position innebär ett positivt medelvärde i X-led att kranspetsens verkliga position befinner sig bortom målpositionen. Ett negativt medelvärde i X-led innebär att kranspetsens verkliga position befinner sig innan målpositionen. Oavsett om kranspetsen arbetar på höger eller vänster sida om kranpelaren kommer ett positivt medelvärde i Y-led innebär att kranspetsens verkliga position befinner sig till vänster om målpositionen. Ett negativt medelvärde i Y-led innebär att kranspetsens verkliga position befinner sig till höger om målpositionen. Ett positivt medelvärde i Z-led innebär att kranspetsens verkliga position befinner sig över målpositionen och ett negativt medelvärde i Z-led innebär att kranspetsens verkliga position befinner sig under målpositionen. Fullständig information gällande studiens analyser redovisas under bilaga 1 och bilaga 2.

3.1. Kranspetsens verkliga position i förhållande till målposition

Positioneringen i X-, Y-, Z-led och det euklidiska avståndet varierade mellan -22 centimeter och 44 centimeter från målpositionen (tabell 3). För samtliga kranspetspositioneringar var precisionen mycket hög, med en standardavvikelse på 1-3 centimeter (figur 8-10). De mätningar som låg längst ifrån varandra, inom de tio upprepningarna mot en målposition, var 5 cm i X-led, 8 cm i Y-led, 4 cm i Z-led och 7 cm i euklidiskt avstånd.

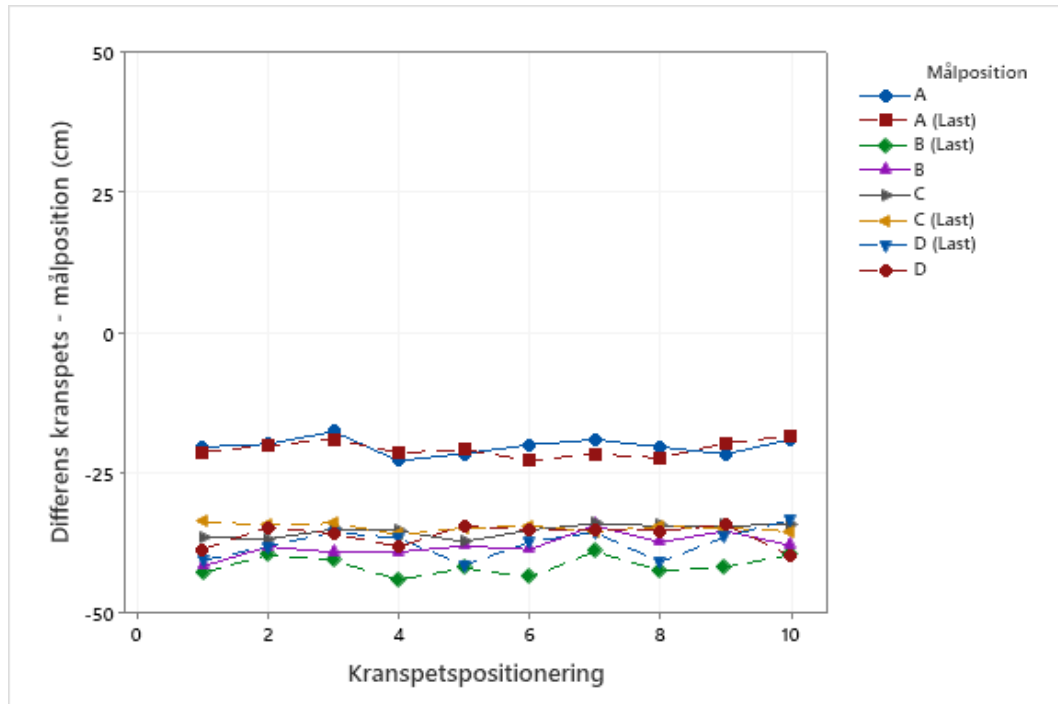
I X-led hade kranspetsen en standardavvikelse på 1 centimeter för samtliga målpositioner (tabell 3). Det innebär att när kranrörelsen positionerade kranspetsen mot målpositionen skilde sig kranspetsen 1 centimeter från medelvärdet i x-led (figur 8).



Figur 8. Differensen i X-led mellan kranpetsens verkliga position och målposition. Linjerna redovisas efter vilken målposition kranpetsen placerades mot och om gripen bar last eller ej (Tabell 1, Figur 5).

Figure 8. The difference for X-axis between the actual position of the crane and the target position. The lines refer to the target position according to which the crane is positioning itself towards and whether the crane is carried cargo or not (Table 1, Figure 5)

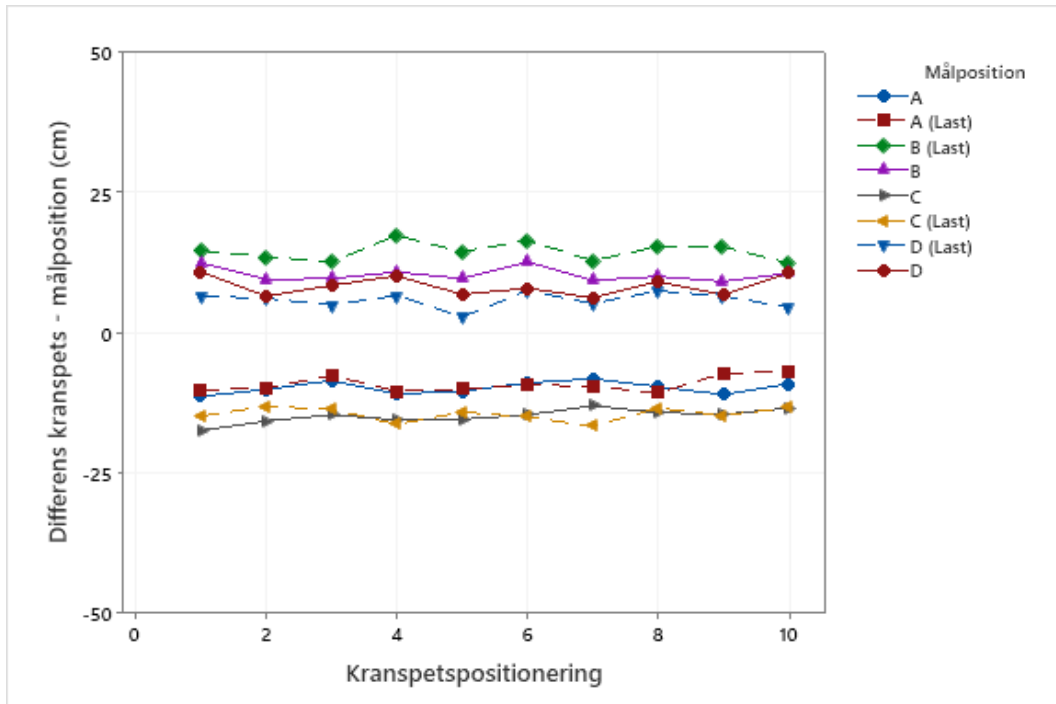
I Y-led placerade kranrörelsen kranpetsen med en precision på 1 centimeter till 3 centimeter på samtliga målpositioner, se standardavvikelse (tabell 3). Precisionen var något sämre på långt avstånd (Målposition B och D i figur 9) än på kort avstånd, där kranpetsen varierade med 2 centimeter och 3 centimeter från medelvärdet (tabell 3, figur 9).



Figur 9. Differensen i Y-led mellan kranpetsens verkliga position och målposition. Linjerna redovisas efter vilken målposition kranpetsen placerades mot och om gripen bar last eller ej (Tabell 1, Figur 5).

Figure 9. The difference for Y-axis between the actual position of the crane and the target position. The lines refer to the target position according to which the crane is positioning itself towards and whether the crane is carried cargo or not (Table 1, Figure 5).

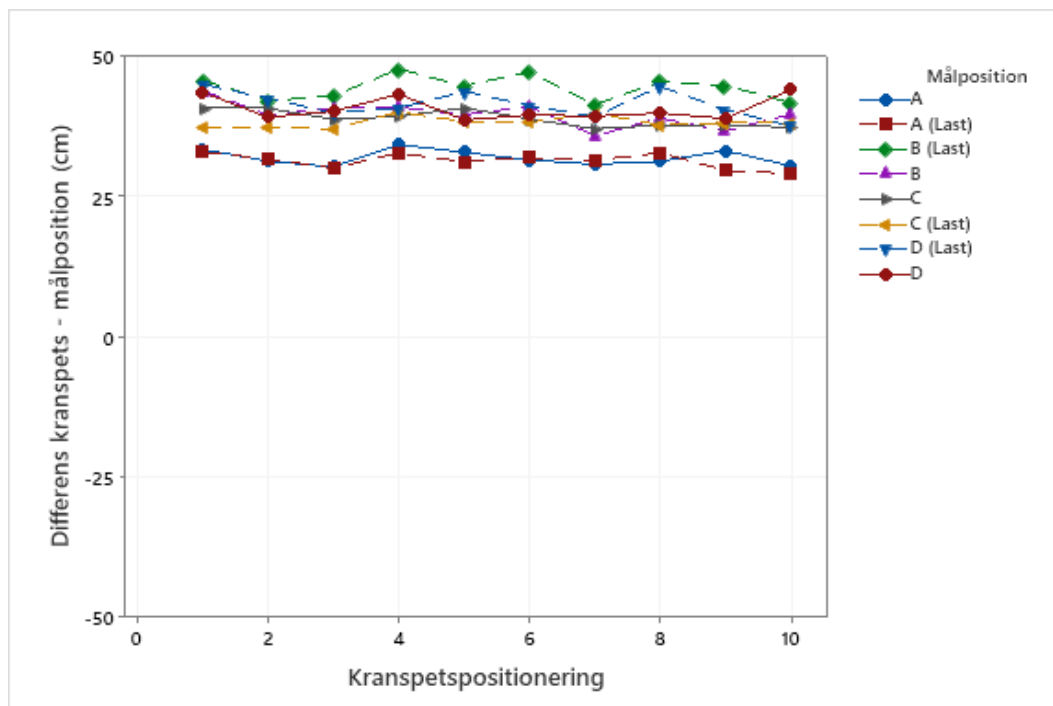
I Z-led var standardavvikelsen mellan 1 centimeter och 2 centimeter (tabell 3). På långt avstånd var precisionen något sämre än på kort avstånd (figur 10).



Figur 10. Differensen i Z-led mellan kranpetsens verkliga position och målposition. Linjerna redovisas efter vilken målposition kranpetsen placerades mot och om gripen bar last eller ej (Tabell 1, Figur 5).

Figure 10. The difference for Z-axis between the actual position of the crane and the target position. The lines refer to the target position according to which the crane is positioning itself towards and whether the crane is carried cargo or not (Table 1, Figure 5).

Det euklidiska avståndet hade en standardavvikelse på 1 centimeter på kort avstånd vid kranens vänstra sida och resterande målpositioner hade en standardavvikelse på 2 centimeter.



Figur 11. Differensen i euklidiskt avstånd mellan kranpetsens verkliga position och målposition. Linjerna redovisas efter vilken målposition kranpetsen placerades mot och om gripen bar last eller ej (Tabell 1, Figur 5).

Figure 11. The difference for Euclidean distance between the actual position of the crane and the target position. The lines refer to the target position according to which the crane is positioning itself towards and whether the crane is carried cargo or not (Table 1, Figure 5).

Kranpetsens positionering i X-led var i regel längre bort från målpositionen, med undantag på kort avstånd på kranens högra sida. Den korta kranpetspositioneringen uppvisade lägst noggrannhet, och var i genomsnitt 22 centimeter kortare än målpositionen (tabell 3). Det resultat med högst noggrannhet i X-led var 3 centimeter till 4 centimeter för långt bort från målpunkten, och detta var för rörelsen på kranens högra sida på långt avstånd. På kranens vänstra sida på långt avstånd befann sig kranpetsen 16 centimeter bortom målpositionen och på kranens vänstra sida vid kort avstånd befann sig kranpetsen 5 centimeter bortom målpositionen. Det fanns signifikant huvudeffekter av båda faktorerna avstånd och vinkel ($p \leq 0,001$), och dessutom en signifikant tvåvägsinteraktionseffekt mellan de två ($p < 0,001$). Däremot fanns det ingen signifikant huvudeffekt av last ($p = 0,812$), och detta syntes även tydligt genom att noggrannheten inte skilde sig signifikant för de olika kombinationerna av avstånd och vinkel som hade olika last (tabell 3). Men lasten hade en signifikant påverkan i form av en tvåvägsinteraktion tillsammans med avstånd ($p = 0,029$). Vad den interaktionen bestod i var dock inte lätt att förstå utifrån resultaten, eftersom den enda kombination av vinkel och avstånd som inte hade signifikant skilda noggrannhetsvärden i x-led omfattade olika kombinationer av såväl avstånd, vinkel och last (tabell 3). Variansanalysmodellen förklarade 99,4% (R^2_{adj}) av den observerade variationen.

Kranspetspositionering i Y-led var alltid höger om målpositionen. Kranspetspositioneringen med högst noggrannhet var 20 centimeter till 21 centimeter vilket var på kranens högra sida vid kort avstånd. På samma sida av maskinen, men på långt avstånd, kunde den sämsta noggrannheten uppmätas vilket var 42 centimeter. När kranspetspositioneringen utfördes på maskinens vänstra sida var noggrannheten 35 centimeter på kort avstånd och 36 centimeter till 38 centimeter på långt avstånd. Det fanns signifikant huvudeffekter av samtliga faktorer avstånd, vinkel och last ($p \leq 0,002$). Huvudeffekterna hade även signifikanta tvåvägsinteraktion ($p \leq 0,044$) varav avstånd och vinkel var mest signifikant ($p = 0,000$) följt av avstånd och last ($p = 0,002$). Det innebär att noggrannheten i Y-led även påverkades mest av målpositionens avstånd men att vinkel och last även hade en inverkan. Noggrannheten var mycket högre på kranens högra sida vid kort avstånd. För resterande målpositioner var noggrannheten sämre och likvärdig varandra. Last påverkade noggrannheten negativt på långt avstånd och när kranen opererade på höger sida. Variansanalysmodellen för Y-led förklarade 94,9% (R^2_{adj}) av den observerade variationen.

Kranspetsen positionerade sig i Z-led ovanför målpositionen på långt avstånd och under målpositionen på kort avstånd. På kort avstånd var noggrannheten 10 centimeter under målpositionen på kranens högra sida och 15 centimeter på kranens vänstra sida (tabell 3). På långt avstånd var noggrannheten 10 centimeter till 14 centimeter över målpositionen på kranens högra sida och 6 centimeter till 8 centimeter på kranens vänstra sida. Huvudeffekterna hade en signifikant påverkan; avstånd ($p = 0,00$), vinkel ($p = 0,00$) och last ($p = 0,045$). Av tvåvägsinteraktionen så var det bara kombinationen vinkel och last som hade en signifikant påverkan ($p = 0,00$). Dessutom hade tvåvägsinteraktionen mellan faktorerna en signifikant effekt ($p = 0,00$), vilket inte var fallet för X-led och Y-led. Det innebär att noggrannheten i Z-led påverkades olika vid de olika kombinationerna av målpositionens avstånd, vinkel och last. På långt avstånd hade kranspetsen en bättre noggrannhet utan last på kranens högra sida, men en bättre noggrannhet med last på kranens vänstra sida. På kranens högra sida var noggrannheten bättre på kort avstånd, medan på vänster sida var noggrannheten bättre på långt avstånd (tabell 3). Variansanalysmodellen för Z-led förklarade 98,5% (R^2_{adj}) av den observerade variationen.

Det euklidiska avståndet för skillnaden mellan kranspetsens positionering och målpositionen var 31 centimeter till 44 centimeter (tabell 3). Kranspetspositioneringar med högst noggrannhet var på kranens högra sida vid kort avstånd. På kranens vänstra sida vid kort avstånd befann sig kranspetsen i genomsnitt 38 centimeter till 39 centimeter bortom målpositionen. Som sämst befann sig kranspetsen 39 centimeter till 44 centimeter från målpositionen vilket var på kranens högra sida på långt avstånd. Enda tillfället när det var skillnad om kranspetspositioneringen utfördes med last eller inte var på långt avstånd på

kranens högra sida, där last hade en sämre noggrannhet på 44 centimeter och utan last en noggrannhet på 39 centimeter. Faktorernas huvudeffekter hade en signifikant påverkan ($p \leq 0,012$), liksom deras tvåvägsinteraktioner ($p=0,021$) och deras trevägsinteraktioner ($p=0,027$). Störst effekt hade faktorerna avstånd och vinkel samt tvåvägsinteraktionen mellan dem. Huvudeffekten av last hade även en signifikant påverkan ($p=0,012$) liksom dess tvåvägsinteraktion med avstånd ($p=0,000$). Det fanns även en signifikant effekt av tvåvägsinteraktionen mellan last och vinkel ($p=0,021$). Det innebär att noggrannheten av det euklidiska avståndet mellan kranpetsens verkliga position och målpositionen påverkades olika vid de olika kombinationerna av målpositionens avstånd, vinkel och last. Variansanalysmodellen för Z-led förklarade 97,6% (R^2_{adj}) av den observerade variationen.

Tabell 3. Medeldifferensen (noggrannheten) och standardavvikelsen (precisionen) mellan verklig position och målposition i X-, Y-, Z-led och euklidiskt avstånd. Inom kolumnerna så har signifikant skilda medelvärden olika upphöjda bokstäver (n=10)

Table 3. The mean difference (accuracy) and the standard deviation (precision) between actual position and target position in X-, Y-, Z-direction and Euclidean distance. Within the columns, significantly different averages have different raised letters (n = 10)

Test- ordning	Mål- position	Maskinsida	Avstånd (m)	Last	X-led (cm)		Y-led (cm)		Z-led (cm)		Euklidiskt avstånd (cm)	
					Medel	SD	Medel	SD	Medel	SD	Medel	SD
1	A	Höger	4,66	Nej	-22 ^D	1	-20 ^A	2	-10 ^E	1	32 ^D	2
2	A	Höger	4,66	Ja	-21 ^D	1	-21 ^A	1	-10 ^E	1	31 ^D	2
5	C	Vänster	4,66	Nej	5 ^C	1	-35 ^{BC}	1	-15 ^F	1	39 ^{BC}	1
6	C	Vänster	4,66	Ja	5 ^C	1	-35 ^B	1	-15 ^F	1	38 ^C	1
3	B	Höger	6,28	Ja	4 ^{BC}	1	-42 ^E	2	14 ^A	2	44 ^A	2
4	B	Höger	6,28	Nej	3 ^B	1	-38 ^D	2	10 ^B	1	39 ^{BC}	2
7	D	Vänster	6,28	Ja	16 ^A	1	-38 ^{CD}	3	6 ^D	1	41 ^B	2
8	D	Vänster	6,28	Nej	16 ^A	1	-36 ^{BCD}	2	8 ^C	2	40 ^{BC}	2

3.2. Styrsystemets indikering av kranspetsens position i förhållande till målposition

Styrsystemet indikerar en högre noggrannhet och precision än vad som tidigare uppvisats i förhållandet mellan kranspetsens verkliga position och målposition (tabell 3, tabell 4). Det innebär att enligt styrsystemet kan kranspetsen positioneras inom 3 centimeter i X-led, 6 centimeter i Y-led, 9 centimeter i Z-led och det euklidiska avståndet är som mest 10 centimeter ifrån målpositionen (Tabell 4). Det är närmare målpositionen än vad mätutrustningen visade att kranspetsens verkliga position var. Det fanns ingen signifikant skillnad i tvåvägsinteraktionen i X-led ($p=0,568$), Y-led ($p=0,396$) eller Z-led ($0,313$). Till skillnad från analyser mellan verklig position och målposition, indikerade inte styrsystemet någon skillnad i noggrannhet om gripen hade last eller ej.

I X-led indikerade styrsystemet att kranspetsen positionerades längre bort från målpositionen på långt avstånd, till skillnad från kort avstånd då positioneringen uppfattas bli innan eller exakt på målpositionen (tabell 4). För kranspetspositioneringar på höger sida indikerade styrsystemet att kranspetsen hamnade innanför målpositionen med 0 centimeter till 1 centimeter på kort avstånd och 3 centimeter bortanför målpositionen på långt avstånd. På kranens vänstra sida uppfattades kranspetsen positionera sig 1 centimeter bortanför målpositionen på kort avstånd och 3 centimeter innanför målpositionen på långt avstånd. Huvudeffekterna av avstånd och vinkel hade en signifikant effekt ($p \leq 0,001$), men inte deras tvåvägsinteraktion ($p=0,140$). Huvudeffekten av last hade ingen signifikant effekt ($p=0,909$), men däremot fanns en signifikant tvåvägsinteraktion mellan avstånd och last ($p=0,032$). Det innebär att det som främst påverkade noggrannheten i X-led var målpositionens avstånd och vinkel. Noggrannheten var bäst på höger sida på kort avstånd. Variansanalysmodellen för X-led förklarade 83,7% (R^2_{adj}) av den observerade variationen, vilket var lägre än förklaringsgraden vid jämförelse mellan verklig position i förhållande till målposition.

I Y-led indikerade styrsystemet att kranspetsen positionerade sig till höger bortom målpositionen. Som sämst var noggrannheten 6 centimeter för långt bort från målpositionen, vilket var på maskinens vänstra sida på långt avstånd. För de övriga målpositionerna var precisionen 3 till 4 centimeter (tabell 4). Huvudeffekterna av avstånd och vinkel hade en signifikant effekt ($p \leq 0,001$), samt deras tvåvägsinteraktion ($p=0,00$). Varken huvudeffekten av last hade signifikant effekt ($p=0,258$) eller tvåvägsinteraktionen mellan avstånd och last ($p=0,322$) samt vinkel och last ($p=0,122$). Det innebär att det som främst påverkade noggrannheten i Y-led var målpositionens avstånd och vinkel. Noggrannheten var sämst på

kranpelarens vänstra sida vid långt avstånd. Variansanalysmodellen för Y-led förklarade 37,6% (R^2_{adj}) av den observerade variationen.

I Z-led indikerade styrsystemet att kranspetsen positionerade sig under målpositionen med 3 centimeter till 9 centimeter (tabell 4). På kortare avstånd var noggrannheten lite bättre med 3 centimeter till 4 centimeter på kranens vänstra sida och 4 centimeter till 6 centimeter på kranens högra sida. På långt avstånd var noggrannheten 8 centimeter till 9 centimeter under målpositionen. Huvudeffekterna av avstånd, vinkel och last hade en signifikant effekt ($p \leq 0,005$), men inte deras tvåvägs- eller trevägsinteraktioner ($p \leq 0,077$). Det innebär att det som främst påverkade noggrannheten i Z-led var målpositionens avstånd, vinkel och last i kranen. Noggrannheten var bäst på kranpelarens vänstra sida på kort avstånd. Variansanalysmodellen för Z-led förklarade 64,4% (R^2_{adj}) av den observerade variationen.

Det euklidiska avståndet var 5 centimeter till 10 centimeter från målpositionen (Tabell 4). På kort avstånd var noggrannheten bättre med 6 centimeter på kranens vänstra sida och 5 till 7 centimeter på kranens högra sida. På långt avstånd var noggrannheten 9 centimeter till 10 centimeter på höger sida om kranpelaren och 10 centimeter på vänster sida om kranpelaren. Huvudeffekterna av avstånd och last hade en signifikant effekt ($p \leq 0,025$), men inte deras tvåvägsinteraktion ($p = 0,414$). Huvudeffekten av vinkel hade ingen signifikant effekt ($p = 0,820$) eller tvåvägsinteraktionen avstånd och vinkel ($p = 0,158$) eller vinkel och last ($p = 0,102$). Det euklidiska värdet var lägre på kort avstånd, 5 centimeter till 7 centimeter ifrån målpositionen, och högre på långt avstånd, 9 centimeter till 10 centimeter ifrån målpositionen. Variansanalysmodellen för euklidiskt avstånd förklarade 61,6% (R^2_{adj}) av den observerade variationen.

Tabell 4. Medeldifferensen (noggrannheten) och standardavvikelsen (precisionen) mellan styrsystemet och målposition i X-, Y-, Z-led och euklidiskt avstånd. Inom kolumnerna så har signifikant skilda medelvärden olika upphöjda bokstäver (n=10)

Table 4. The mean difference (accuracy) and the standard deviation (precision) between the control system and the target position in the X-, Y-, Z-direction and Euclidean distance. Within the columns, significantly different averages have different raised letters (n = 10)

Test- ordning	Maskinsida	Avstånd (m)	Last	X-led (cm)		Y-led (cm)		Z-led (cm)		Euklidiskt avstånd (cm)	
				Medel	SD	Medel	SD	Medel	SD	Medel	SD
1	Höger	4,66	Nej	0 ^{BC}	1	4 ^{BC}	1	-6 ^{BC}	1	7 ^{BC}	1
2	Höger	4,66	Ja	-1 ^C	1	3 ^C	2	-4 ^{AB}	2	5 ^C	1
5	Vänster	4,66	Nej	-3 ^D	1	3 ^C	1	-4 ^{AB}	2	6 ^C	1
6	Vänster	4,66	Ja	-3 ^D	1	3 ^C	1	-3 ^A	1	6 ^C	1
3	Höger	6,28	Ja	3 ^A	1	3 ^C	2	-8 ^{CD}	1	9 ^{AB}	2
4	Höger	6,28	Nej	3 ^A	1	3 ^C	2	-9 ^D	1	10 ^A	1
7	Vänster	6,28	Ja	1 ^B	1	6 ^{AB}	1	-8 ^{CD}	2	10 ^A	1
8	Vänster	6,28	Nej	1 ^{BC}	1	6 ^A	2	-8 ^{CD}	2	10 ^A	2

3.2.1. Utvärdering av algoritmens utveckling under studiegenomförandet

Vid jämförelse mellan verklig position och målposition av de tio första kranspetspositioneringarna och de tio sista kranspetspositioneringarna påvisades statistik signifikanta skillnader i Y-led och Z-led ($p < 0,001$) samt det euklidiska avståndet ($p = 0,043$) men inte i X-led ($p = 0,34$) (tabell 5). Noggrannheten av de tio sista kranspetspositioneringar hade försämrats med 1 centimeter i X-led, förbättrats 5 centimeter i Y-led, försämrats 3 centimeter i Z-led och förbättrats 1 centimeter i euklidiskt avstånd (tabell 5). Detta innebär att det finns en förbättring med 1 centimeter efter 90 upprepade kranspetspositioneringar.

Vid utvärdering av den eventuella förbättringen inom de tio upprepade kranspetspositioneringarna genomfördes en analys av figur 8-10. Det kunde inte konstateras någon tydlig linjär trend av upprepade kranspetspositioneringar mot en målposition. Det innebär att positioneringen mot målpositionen inom en testordning inte förbättrades av upprepade kranspetspositioneringar.

Tabell 5. Medeldifferensen (noggrannheten) och standardavvikelsen (precisionen) mellan verklig position och målposition i X-, Y-, Z-led och euklidiskt avstånd för de tio första kranspetspositioneringarna och de tio sista kranspetspositioneringarna. Inom kolumnerna så har signifikant skilda medelvärden olika upphöjda bokstäver (n=10)

Table 5. The mean difference (accuracy) and the standard deviation (precision) between the control system and the target position in the X-, Y-, Z-direction and Euclidean distance for de first 10 crane tip positioning's and the last 10 crane tip positioning's. Within the columns, significantly different averages have different raised letter (n=10)

Test- ordning	Mål- position	Vinkel (°)	Avstånd (m)	Last	X-LED		Y-LED		Z-LED		Euklidiskt	
					Medel	SD	Medel	SD	Medel	SD	Medel	SD
1	A	24	4,66	Nej	-22 ^A	1	-20 ^B	2	-10 ^A	1	32 ^A	1
9	A	24	4,66	Nej	-22 ^A	1	-15 ^A	1	-13 ^B	1	31 ^B	1

4. Diskussion

4.1. Resultatdiskussion

Studiens resultat visar att kranen har en hög precision och en låg noggrannhet vilket innebär att kranspetspositioneringarna hamnar på ungefär samma position men att positionen inte är på målpositionen. Kranspetsen tenderar att positionera sig till höger bortanför målpositionen. Den förskjutning som uppstår i X-, Y-, Z-led kan justeras i styrsystemet relativt enkelt. Att kranspetsen kan upprepa samma kranspetspositionering med en hög precision är det viktigaste. Noggrannheten blir sämre på långt avstånd bland annat för att påfrestningar ökar på TFP konstruktion vilket gör att kranens delar sviktar mer. Endast på kranens högra sida på långt avstånd kan en signifikant skillnad urskiljas av att gripen bär last eller inte. Skillnaden återfanns i Y-led, Z-led och det euklidiska avståndet men inte i X-led.

Den uppmätta precisionen visar skillnader med 1-3 centimeter där X-led har bäst precision med 1 centimeter standardavvikelse. I Z-led var precisionen 1 centimeter till 2 centimeter på långt avstånd och 1 centimeter på kort avstånd. Slutligen i Y-led är precisionen 1 centimeter på kort avstånd och 2-3 centimeter på långt avstånd. Givet att kranen har en max gripvidd på 1443 mm skulle en positionering som felar med 1-3 centimeter inte ha någon betydande inverkan på möjligheten att gripa stockar. Precisionen skulle däremot kunna påverka manövreringen av kranen i trånga utrymmen t.ex. i gallringar där det finns en risk att träd blir kantstötta. Med det sagt är det viktigt att poängtera att GNSS utrustning har ett naturligt mätfel och kan påverkat resultatet.

Noggrannheten och precisionen på den autonoma TFPs kranen har tidigare endast kunna utvärderats baserat på styrsystemets angivna resultat (Hera et al. 2021). I studien konstaterades även att några millimeters skillnader mellan målpositionen och verklig position inte har någon praktiskt betydelse för att kunna utföra ett framgångsrikt skotningsarbete. Resultatet i den här studien visar dock större skillnader i noggrannheten för verklig position vilket kan vara problematiskt. Detta är dock möjligt att justera styrsystemet för att korrigera noggrannheten.

Styrsystemet indikerar att kranspetsen positioneras inom 3 centimeter från målpositionen i X-led, 6 centimeter i Y-led och 8 centimeter i Z-led. Styrsystemet visa inte samma resultat som den verkliga positionen, att differensen mellan

kranpetsen och målpositionen blir större på långt avstånd i X-led och Y-led. Det kan bero på att styrsystemet inte tar hänsyn till kranens mekaniska uppbyggnad och att påfrestningen på lederna blir större på långt avstånd vilket verklig position uppvisar.

Studien visar att det var främst avståndet som påverkade hur bra noggrannheten blev i X-led och Y-led där det bästa resultatet för X-led återfinns vid långt avstånd på maskinens högra sida och för Y-led är det kort avstånd på maskinens högra sida. I Z-led handlar avstånd om kranpetsen placerar sig ovanför eller under målpositionen där vid långt avstånd hamnar den ovanför och vid kort avstånd hamnar den under. Beroende på vilken sida kranen opererar på, är höger sida något bättre för X-led och Y-led. Z-led går det inte att dra några slutsatser om sida eftersom de inte fanns några signifikanta skillnader. På långt avstånd är kranen noggrannare utan last i Y-led. På höger sida är kranens positionering noggrannare utan last än med last medan det finns ingen skillnad utan last och med last på vänster sida i Y-led. På långt avstånd i Z-led blir noggrannheten bättre utan last på höger sida och sämre utan last på vänster sida.

Samtliga variansanalyser hade R^2 adj över 94% vilket innebär att faktorerna avstånd, vinkel och last förklarade i princip allt av den observerade variationen i studien.

4.2. Metoddiskussion

Försöksdesignens uppbyggnad var förenklad eftersom det rörde sig om två avstånd, två vinklar från kranpelaren och lasten utgjorde endast knappt 20 % av kranens totala lyftkapacitet. Trots det har resultatet gett en bra bild över TFPens precision och noggrannhet. Med fyra målpositioner utplacerade på två vinklar och två avstånd från kranpelaren kunde man få en bra uppfattning över den autonoma TFPens kapacitet i kranarbetet. Med resultatet går det att urskilja om det är någon skillnad på kranens precision och noggrannhet på kort och långt avstånd, på höger och vänster sida av kranen samt en kran med eller utan last. Detta ger en god uppfattning om kranarbetet men för att få ut ett mer detaljerat resultat kan fler avstånd och vinklar från kranpelaren samt antalet upprepningar adderas till studien.

Varje kranpetspositionering som upprepades tio gånger inom en testordning visade ingen tydlig förbättring av precisionen eller noggrannheten. Om differensen mellan verklig position och målposition skulle förbättras inom de tio upprepade kranpetspositioneringarna hade maskininläringen påverkat resultatet. Detta är inte fallet för den här studiens försöksdesign. Det kan bero på att kranpetspositioneringen bara upprepades tio gånger för att sedan byta målposition eller lägga på last.

Valet av mätutrustning skulle kunna ändras för att minimera den mänskliga påverkan på resultatet. Mätutrustningen kunde mäta på centimeternivå vilket även

var den nivå kranspetsen hade. Det resulterade till att resultatet blir i centimeter vilket kanske inte är det optimala om man vill justera kranens programmering men trots det är centimeternivå rimligt när det kommer till skotningsarbetet. Det krävdes tre personer för att stabilisera mätutrustningen så att den kunde utföra datainsamlingen med hög precision. En person bar stegen fram till kranen och stabiliserade den, en annan person klättrade upp på stegen för att positionera mätutrustningen rätt och trycka på mätknappen och slutligen höll den tredje personen fast mätutrustningen på kranen. Mätutrustningen var monterad på en 2 meter lång teleskopisk stång vilket innebar en potentiell felmarginal om stången inte var vinkelrät. Stången kunde antas vara vinkelrät under datainsamlingen då stångens placering justerades mot ett fastmonterat vattenpass. Detta skulle kunna ersättas med mätutrustning som kan monteras på kranen. Ett annat alternativ skulle kunna vara att endast mäta det euklidiska avståndet från målpositionen till kranspetsen med en måttstock.

I studien användes variansanalys, vilket möjliggör att se statistiska relationer mellan flera variabler. Den statistiska analysen var mest lämpad mot den faktoriella försöksdesignen som användes.

4.3. Tillämpning och vidare forskning

Den här studien har visat att autonom kranstyrning behöver justeras för att ta hänsyn till de positioneringsfel som uppstod på grund av avstånd, vinkel och last. Om en mer omfattande studie skulle genomföras kan det vara intressant att undersöka fler avstånd, vinklar och med tyngre last. Avstånd har visats vara den faktor som påverkar noggrannheten mest därför skulle det vara av intresse att göra studien på olika avstånd från maskinen. Noggrannheten visade sig vara lite sämre på maskinens vänstra sida vilket skulle kunna studeras närmare om fler målpositioner lades till. Lasten kan utökas från två björkstockar till fler stockar för att se om precision påverkas på ett annat sätt. Den här studien upprepas endast tio kranspetspositioneringar vilket var tillräckligt för att dra slutsatser om precisionen och noggrannheten samt om last hade en inverkan.

En annan intressant aspekt skulle vara att kontrollera hela skotningsarbetet från att TFPn upptäcker stockarna till att TFPn placerar stocken i vagnen. Det förfarandet skulle vara att nyttja TFPns lidar system för att upptäcka stockar som i sin tur berättar för styrsystemet vart kranen ska gå för att gripa stocken.

Det skulle även vara intressant att kontrollera hela rörelsen med en separat mätutrustning i stället för kranens inbyggda sensorer. Olika kranrörelser skulle kunna användas för olika ändamål såsom bränsleförbrukning, produktivitet eller maskinslitage. Eftersom personalkostnader är en stor del av totala kostnaderna för entreprenörer kan det vara av intresse att studera om och i så fall när en autonom skotare blir mer lönsamt än sin föregångare.

Referenser

- Adelhult, S. & Hennersson, T. (2014). Att skörda en skog. Umeå: Västerbottens läns hembygdsförbund. https://www.vbm.se/wp-content/uploads/2017/09/2014_1.pdf
- Ager, B. (2016). *Strukturell och organisatorisk förnyelse i skogsbrukets operativa system*. (2016:16). Umeå: Institutionen för skogens biomaterial och teknologi. <https://pub.epsilon.slu.se/13909/> [2021-09-20]
- Albrektson, A., Elfving, B., Lundqvist, L. & Valinger, E. (2012). *Skogsskötselns grunder och samband*. (Skogsskötselserien nr 1). Jönköping.
- Andersen, H.-E., Clarkin, T., Winterberger, K. & Strunk, J. (2009). An Accuracy Assessment of Positions Obtained Using Survey- and Recreational-Grade Global Positioning System Receivers across a Range of Forest Conditions within the Tanana Valley of Interior Alaska. *Western Journal of Applied Forestry*, 24, 128–136. <https://doi.org/10.1093/wjaf/24.3.128>
- Andersson, S. (2004). Skogsteknik förr och nu. *Skogshistoriska Sällskapetets Årsskrift*, (102–116). <https://skogshistoria.se/wp-content/uploads/2018/03/%C3%85rsskrift-2004-s-102-116-Stig-Andersson-Skogsteknik-f%C3%B6rr-och-nu.pdf> [2022-01-07]
- Barry, A.J. & Tedrake, R. (2015). Pushbroom stereo for high-speed navigation in cluttered environments. *Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Seattle, WA, USA, maj 2015. 3046–3052. Seattle, WA, USA: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2015.7139617>
- Bergkvist, I., Nordén, B. & Hagos, L. (2006). *Besten med två virkeskurirer - studier av prestation och bränsleförbrukning*. (616). Uppsala: Skogforsk. <https://www.skogforsk.se/kunskap/kunskapsbanken/2006/besten-med-tva-virkeskurirer/> [2022-02-16]
- Berkvens, R., Rymenants, W., Weyn, M., Sleutel, S. & Loockx, W. (2012). Autonomous Wheelchair: Concept and Exploration. *Proceedings of Ambient 2012: The Second International Conference on Ambient Computing*, Antwerpen, 2012. Antwerpen. https://www.researchgate.net/publication/236882346_Autonomous_Wheelchair_Concept_and_Exploration [2021-12-26]
- Bingham, B., Foley, B., Singh, H., Camilli, R., Delaporta, K., Eustice, R., Mallios, A., Mindell, D., Roman, C. & Sakellariou, D. (2010). Robotic Tools for Deep Water Archaeology: Surveying an Ancient Shipwreck with an Autonomous Underwater Vehicle. *Journal of Field Robotics*, 27, 702–717. <https://doi.org/10.1002/rob.20350>
- Björheden, R. (2014). Drivkrafterna bakom den tekniska utvecklingen i skogen. *Skogshistoriska Sällskapetets Årsskrift*, 52–59
- Christensen, H.I. (2016). *A Roadmap for US Robotics From Internet to Robotics*. 2016. uppl. San Diego: University of California San Diego. <https://www.hichristensen.com/pdf/roadmap-2016.pdf> [2022-02-14]
- Cranab (2015). *Forwarder cranes with world leading technology*. [Broschyr]. Vindeln: Cranab. <https://www.cranab.com/downloads/Forwarder-Cranes/Cranab-FC-brochure-EN.pdf> [2021-12-06]

- Englund, M., Mörk, A., Gelin, O. & Eliasson, L. (2018). *Påverkan av kranspetsstyrning på nya skogsmaskinförarens utveckling*. (968). Uppsala: Skogforsk.
<https://www.skogforsk.se/contentassets/58179ee4fe374aacb3143faf6fae33de/arbetsrapport-968-2018.pdf>
- FPInnovations (2020). Autonomous trucks: First promising tests in a mill yard. *FPInnovations*. [Blogg]. 18 mars.
<https://web.fpinnovations.ca/autonomous-trucks-first-promising-tests-in-a-mill-yard/> [2022-02-15]
- Gellerstedt, S. (1998). A Self-Leveling and Swiveling Forestry Machine Cab. *Journal of Forest Engineering*, 9 (1), 7–16.
<https://doi.org/10.1080/08435243.1998.10702706>
- Hawker, C. (2008). Laboratory Automation: Total and Subtotal. *Clinics in laboratory medicine*, 27, 749–70, vi.
<https://doi.org/10.1016/j.cll.2007.07.010>
- Heinimann, H. (1999). *Ground-based harvesting technologies for steep slopes*. (Proceedings of the International Mountain Logging and 10th Pacific Northwest Skyline Symposium, Sessions and Chung (editors), March 28 - April 1). Corvallis, Oregon, USA: Department of Forest Engineering.
https://www.researchgate.net/publication/292203811_Ground-based_harvesting_technologies_for_steep_slopes [2022-01-11]
- Hellström, T., Lärkeryd, P., Nordfjell, T. & Ringdahl, O. (2008). *Autonomous forest machines - Past present and future*. (UMINF 08.06). Umeå: Umeå Universitet.
https://www.researchgate.net/publication/251742297_AUTONOMOUS_FOREST_MACHINES_-_PAST_PRESENT_AND_FUTURE [2021-11-12]
- Hera, P.L. & Morales, D.O. (2015). Model-Based development of control systems for forestry cranes. *Journal of Control Science and Engineering*, 2015, 27:27. <https://doi.org/10.1155/2015/256951>
- Hera, P.L., Morales, D.O. & Mendoza-Trejo, O. (2021). A study case of Dynamic Motion Primitives as a motion planning method to automate the work of forestry cranes. *Computers and Electronics in Agriculture*, 183, 106037. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106037>
- Häggström, C. (2015). *Human Factors in Mechanized Cut-to-Length Forest Operations*. (2015:59). Umeå: Institutionen för skogens biomaterial och teknologi.
https://www.researchgate.net/publication/305278836_Human_Factors_in_Mechanized_Cut-to-Length_Forest_Operations [2022-01-10]
- Häggström, C., Öhman, M., Burström, L., Nordfjell, T. & Lindroos, O. (2016). Vibration Exposure in Forwarder Work: Effects of Work Element and Grapple Type. *Croat. j. for. eng.*, 37 (1), 107–118
- Intel (2022). *Autonomous Mobile Robot*. Intel.
<https://www.intel.com/content/www/us/en/robotics/autonomous-mobile-robots/overview.html> [2022-02-28]
- Kuka (2022). *Automation food industry*. Kuka. <https://www.kuka.com/en-de/industries/consumer-goods-industry/automation-food-industry> [2022-02-28]
- La Hera, P.X. & Ortíz Morales, D. (2019). What Do We Observe When We Equip a Forestry Crane with Motion Sensors? *Croatian journal of forest engineering*, 40, 259–280. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2019.501>
- Lideskog, H., Karlberg, M. & Bergsten, U. (2015). Development of a Research Vehicle Platform to Improve Productivity and Value-extraction in Forestry. *Procedia CIRP*, 38, 68–73. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.07.014>

- Lindroos, O., Hera, P.L. & Häggström, C. (2017). Drivers of Advances in Mechanized Timber Harvesting – a Selective Review of Technological Innovation. *Croatian journal of forest engineering*, 38 (2), 243–258
- Lindroos, O., Mendoza-Trejo, O., La Hera, P.X. & Ortíz Morales, D. (2019). Advances in using robots in forestry operations. 233–260. <https://doi.org/10.19103/AS.2019.0056.18>
- Lindroos, O., Ringdahl, O., Pedro, L.H., Hohnloser, P. & Hellström, T. (2015). Estimating the position of the harvester head: a key step towards the precision forestry of the future? *Croatian Journal of Forest Engineering*, 36 (2), 147–164
- Lundbäck, M., Häggström, C. & Nordfjell, T. (2020). Worldwide trends in methods for harvesting and extracting industrial roundwood. *International Journal of Forest Engineering*, <https://www.tandfonline.com/doi/epub/10.1080/14942119.2021.1906617?needAccess=true> [2021-09-06]
- Löfgren, B., Bergkvist, I., Brunberg, T., Hallonborg, U., Norin, K. & Thorsén, Å. (2002). *Temaprojekt – delautomatisering*. (512). Uppsala: Skogforsk. <https://www.skogforsk.se/kunskap/kunskapsbanken/2002/temaprojekt--delautomatisering-fas-1-behov-och-mojligheter/> [2021-12-13]
- Löfgren, B. & Egermark, T. (2005). *Kranspetsstyrning ger snabbare inläring*. (24). Uppsala: Skogforsk. <https://www.skogforsk.se/kunskap/kunskapsbanken/2005/Kranspetsstyrning-ger-snabbare-inlarning/> [2021-10-11]
- Manner, J., Gelin, O., Mörk, A. & Englund, M. (2017). Forwarder crane’s boom tip control system and beginner-level operators. *Silva Fennica*, 51 (2). <https://doi.org/10.14214/sf.1717>
- Manner, J., Mörk, A. & Englund, M. (2019). Comparing forwarder boom-control systems based on an automatically recorded follow-up dataset. *Silva Fennica*, 53 (2). <https://doi.org/10.14214/sf.10161>
- Manner, J., Nordfjell, T. & Lindroos, O. (2013). Effects of the number of assortments and log concentration on time consumption for forwarding. *Silva Fennica*, 47. <https://doi.org/10.14214/sf.1030>
- Manner, J., Palmroth, L., Nordfjell, T. & Lindroos, O. (2016). Load level forwarding work element analysis based on automatic follow-up data. *Silva Fennica*, 50. <https://doi.org/10.14214/sf.1546>
- Meaclem, C.V., Gutschmidt, S., Chen, X. & Parker, R. (2015). Kinematic and dynamic analysis of a brachiating tree-to-tree machine. *Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, 2015. 1311–1316. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ROBIO.2015.7418952>
- Milliken, P., Lamborn, D. & Keast, A. (2014). *Remote Control of a John Deere 909 Feller Buncher*. (Harvesting Technical Note, HTN07-04). Rotorua: Future Forests Research Ltd. <https://fgr.nz/documents/remote-control-john-deere-909-feller-buncher/> [2022-02-14]
- Milliken, P., Lamborn, D. & Keast, A. (2015). *Concept Design for Teleoperation of a John Deere 909 Feller Buncher*. (Harvesting Technical Reports, H024). Rotorua: Future Forests Research Ltd. <https://fgr.nz/documents/concept-design-teleoperation-john-deere-909-feller-buncher/> [2022-02-18]
- Morales, D.O., Hera, P.L., Westerberg, S., Freidovich, L.B. & Shiriaev, A.S. (2015). Path-Constrained Motion Analysis: An Algorithm to Understand Human Performance on Hydraulic Manipulators. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 45 (2), 187–199. <https://doi.org/10.1109/THMS.2014.2366873>
- Murphy, R.R. (2019). *Introduction to AI Robotics*. Second Edition. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press. <https://books.google.se/books?hl=sv&lr=&id=TmquDwAAQBAJ&oi=fnd>

- &pg=PR7&dq=robotics&ots=RrvetuDaIa&sig=avfx_xJDUZ5bv78tuTAG4jELL1s&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false [2021-09-15]
- Möller, J. & Arlinger, J. (2016). *Byte av prislistor på två minuter istället för tre veckor*. Skogforsk. <https://www.skogforsk.se:443/kunskap/kunskapsbanken/2016/byte-av-prislista-pa-tva-minuter-istallet-for-tre-veckor/> [2021-10-04]
- Nationalencyklopedin (2021). *Nationalencyklopedin, automatisering*. <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/automatisering> [2021-12-26]
- New Holland Agriculture (2016). *The New Holland NHDrive concept autonomous tractor shows a vision into the future of agriculture*. <https://agriculture.newholland.com/nar/en-us/about-us/whats-up/news-events/2016/new-holland-nh-drive-new-concept-autonomous-tractor> [2021-09-08]
- Nordfjell, T., öhman, E., Lindroos, O. & Ager, B. (2019). *The technical development of forwarders in Sweden between 1962 and 2012 and of sales between 1975 and 2017*. <https://www.tandfonline.com/doi/epub/10.1080/14942119.2019.1591074?needAccess=true> [2021-12-20]
- Parker Hannifin Corporation (2010). K170LS Mobile Directional Control Valve Proportional, Load Sensing, Pre-compensated. Parker. https://www.parker.com/literature/Mobile%20Controls%20-%20Europe/HY17-8557-UK_K170.pdf [2022-03-01]
- PSA International (2017). PSA to Start Truck Platooning Trials in Singapore. *PSA International*. <https://www.globalpsa.com/psa-to-start-truck-platooning-trials-in-singapore/> [2022-02-15]
- Purfürst, T. & Erler, J. (2006). The precision of productivity models for the harvester-do we forget the human factor? In: Precision Forestry in Plantations, Semi-Natural and Natural Forests. Proceedings of the International Precision Forestry Symposium. Stellenbosch University, South Africa, 5-10 March, 2006, 465–475
- Rexroth Bosch Group (2017). Axial piston variable pump A10V(S)O Series 31. https://dc-us.resource.bosch.com/media/us/products_13/product_groups_1/industrial_hydraulics_5/pdfs_4/re-a92701.pdf [2022-03-01]
- Ringdahl, O., Lindroos, O., Hellström, T., Bergström, D., Athanassiadis, D. & Nordfjell, T. (2011). Path tracking in forest terrain by an autonomous forwarder. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 26, 350–359. <https://doi.org/10.1080/02827581.2011.566889>
- Sandvik AB (2022). *Gruvindustri*. Sandvik Group. <https://www.home.sandvik/se/om-oss/industrierbjudanden/gruvindustri/> [2022-02-13]
- Scania AB (2016). *Autonomous transport solutions open up a world of opportunities*. Scania. <https://www.scania.com/ux-library/en/home/components/C031/autonomous-transport-solutions-open-up-a-world-of-opportunities.html> [2022-02-15]
- Skogsstyrelsen (2021). *01. Brutto- och nettoavverkad volym (milj. m3sk och m3fub) efter år och sortiment av stamved*. http://pxweb.skogsstyrelsen.se/pxweb/sv/Skogsstyrelsens%20statistikdatabas/Skogsstyrelsens%20statistikdatabas_Bruttoavverkning/JO0312_01.px/table/tableViewLayout1/?loadedQueryId=e88918c7-871b-4d7a-b2e7-78cbf581e9f6&timeType=from&timeValue=0 [2021-09-06]
- Thorsén, Å. & Thor, M. (2015). *Effektivt skogsbruk: ett långsiktigt miljöarbete*. (91). Uppsala: Skogforsk.

- <https://www.skogforsk.se/kunskap/kunskapsbanken/2014/effektivt-skogsbruk---ett-langsiktigt-miljoarbete/> [2021-09-06]
- UEISIM (2022). *UEISIM 1200R*. <https://www.ueidaq.com/products/powerful-flexible-12-slot-rack-mountable-3u-simulink-rtw-target-i-o-chassis-ideal-for-hil-applications> [2022-03-09]
- Valentini teleferiche (2022). *Special machines*. *ValentiniTeleferiche*. <http://www.valentini-teleferiche.it/en/soluzioni/special-machines> [2022-02-14]
- Visser, R. & Obi, O. (2021). Automation and Robotics in Forest Harvesting Operations: Identifying Near-Term Opportunities. *Croatian journal of forest engineering*, 42. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2021.739>
- Ward, T. (2019). *Custom Autonomous Cargo Vans to Deliver Groceries in Walmart's Pilot with Udelv*. *Corporate - US*. <https://corporate.walmart.com/newsroom/2019/01/08/custom-autonomous-cargo-vans-to-deliver-groceries-in-walmarts-pilot-with-udelv> [2022-02-18]

Bilagor

Bilaga 1. Variansanalys och Tukey-test för differensen mellan verklig position och målposition i X-, Y- och Z-led samt euklidiska avstånd.

X-led fullständig variansanalys

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Avstånd	1	7699,1	7699,11	6562,02	0,000
Vinkel	1	6672,5	6672,50	5687,03	0,000
Last	1	0,1	0,07	0,06	0,812
Avstånd*Vinkel	1	56,2	56,19	47,89	0,000
Avstånd*Last	1	5,8	5,81	4,95	0,029
Vinkel*Last	1	0,0	0,03	0,03	0,869
Avstånd*Vinkel*Last	1	3,0	3,02	2,58	0,113
Error	72	84,5	1,17		
Total	79	14521,2			

X-led fullständiga variansanalysmodellens sammanfattade R-sq värde

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1,08318	99,42%	99,36%	99,28%

X-led reducerade variansanalys

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Avstånd	1	7699,1	7699,11	6508,96	0,000
Vinkel	1	6672,5	6672,50	5641,04	0,000
Last	1	0,1	0,07	0,06	0,813
Avstånd*Vinkel	1	56,2	56,19	47,50	0,000
Avstånd*Last	1	5,8	5,81	4,91	0,030
Error	74	87,5	1,18		
Lack-of-Fit	2	3,1	1,53	1,30	0,278
Pure Error	72	84,5	1,17		
Total	79	14521,2			

X-led reducerade variansanalysmodellens sammanfattade R-sq värde

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1,73953	95,36%	94,91%	94,27%

X-led variansanalys tukey-test

Avstånd*Vinkel*Last	N	Mean	Grouping
6,28 Vänster Nej	10	16,1478	A
6,28 Vänster Ja	10	16,0154	A
6,28 Höger Nej	10	-3,4449	B
6,28 Höger Ja	10	-4,2749	B C
4,66 Vänster Ja	10	-5,1308	C
4,66 Vänster Nej	10	-5,2988	C
4,66 Höger Ja	10	-21,2914	D
4,66 Höger Nej	10	-22,3168	D

Y-led fullständig variansanalys

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Avstånd	1	2213,69	2213,69	731,56	0,000
Vinkel	1	674,26	674,26	222,83	0,000
Last	1	30,43	30,43	10,06	0,002
Avstånd*Vinkel	1	1513,15	1513,15	500,06	0,000
Avstånd*Last	1	32,23	32,23	10,65	0,002
Vinkel*Last	1	12,67	12,67	4,19	0,044
Avstånd*Vinkel*Last	1	1,39	1,39	0,46	0,499
Error	72	217,87	3,03		
Total	79	4695,70			

Y-led variansanalysmodellens summering

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1,73953	95,36%	94,91%	94,27%

Y-led reducerad variansanalys

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Avstånd	1	2213,69	2213,69	737,01	0,000
Vinkel	1	674,26	674,26	224,48	0,000
Last	1	30,43	30,43	10,13	0,002
Avstånd*Vinkel	1	1513,15	1513,15	503,78	0,000
Avstånd*Last	1	32,23	32,23	10,73	0,002
Vinkel*Last	1	12,67	12,67	4,22	0,044
Error	73	219,26	3,00		
Lack-of-Fit	1	1,39	1,39	0,46	0,499
Pure Error	72	217,87	3,03		
Total	79	4695,70			

Y-led reducerad variansanalysmodellens summering

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1,73310	95,33%	94,95%	94,39%

Y-led variansanalys tukey-test

Avstånd*Vinkel*Last	N	Mean	Grouping
4,66 Höger Nej	10	-20,2603	A
4,66 Höger Ja	10	-20,7563	A
4,66 Vänster Ja	10	-34,7289	B
4,66 Vänster Nej	10	-35,2966	B C
6,28 Vänster Nej	10	-36,1138	B C D
6,28 Vänster Ja	10	-37,5567	C D
6,28 Höger Nej	10	-37,9457	D
6,28 Höger Ja	10	-41,5086	E

Z-led fullständig variansanalys

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Avstånd	1	9504,8	9504,80	4813,57	0,000
Vinkel	1	553,4	553,35	280,24	0,000
Last	1	8,2	8,19	4,15	0,045
Avstånd*Vinkel	1	0,1	0,14	0,07	0,788
Avstånd*Last	1	0,5	0,48	0,24	0,623
Vinkel*Last	1	59,5	59,51	30,14	0,000
Avstånd*Vinkel*Last	1	49,9	49,93	25,29	0,000
Error	72	142,2	1,97		
Total	79	10318,6			

Z-led fullständig variansanalysmodellens summering

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1,40520	98,62%	98,49%	98,30%

Z-led variansanalys tukey-test

Avstånd*Vinkel*Last	N	Mean	Grouping
6,28 Höger Ja	10	14,37	A
6,28 Höger Nej	10	10,27	B
6,28 Vänster Nej	10	8,23	C
6,28 Vänster Ja	10	5,72	D
4,66 Höger Ja	10	-9,25	E
4,66 Höger Nej	10	-9,88	E
4,66 Vänster Ja	10	-14,57	F
4,66 Vänster Nej	10	-14,91	F

Euklidisk avstånd fullständig variansanalys

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Avstånd	1	824,66	824,660	240,74	0,000
Vinkel	1	177,05	177,045	51,68	0,000
Last	1	23,01	23,011	6,72	0,012
Avstånd*Vinkel	1	309,44	309,444	90,33	0,000
Avstånd*Last	1	56,80	56,801	16,58	0,000
Vinkel*Last	1	19,19	19,193	5,60	0,021
Avstånd*Vinkel*Last	1	17,43	17,425	5,09	0,027
Error	72	246,64	3,426		
Total	79	1674,22			

Euklidiskt avstånd fullständig variansanalys summering

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1,85082	85,27%	83,84%	81,81%

Euklidiskt avstånd tukey-test

Avstånd*Vinkel*Last	N	Mean	Grouping	
6,28 Höger Ja	10	44,1552	A	
6,28 Vänster Ja	10	41,2840	B	
6,28 Vänster Nej	10	40,4391	B	C
6,28 Höger Nej	10	39,4843	B	C
4,66 Vänster Nej	10	38,7031	B	C
4,66 Vänster Ja	10	38,0443	C	
4,66 Höger Ja	10	31,7482	D	
4,66 Höger Ja	10	31,1818	D	

Bilaga 2. Variansanalys och Tukey-test för differensen mellan sensorposition och målposition i X-, Y- och Z-led samt euklidiska avstånd.

X-led fullständig variansanalys

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Avstånd	1	262,812	262,812	277,05	0,000
Vinkel	1	122,512	122,512	129,15	0,000
Last	1	0,013	0,013	0,01	0,909
Avstånd*Vinkel	1	2,112	2,112	2,23	0,140
Avstånd*Last	1	4,513	4,513	4,76	0,032
Vinkel*Last	1	0,313	0,313	0,33	0,568
Avstånd*Vinkel*Last	1	0,312	0,312	0,33	0,568
Error	72	68,300	0,949		
Total	79	460,887			

X-led fullständig variansanalysmodellens sammanfattning

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,973967	85,18%	83,74%	81,70%

X-led reducerad variansanalys

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Avstånd	1	262,812	262,812	277,47	0,000
Vinkel	1	122,512	122,512	129,35	0,000
Last	1	0,013	0,013	0,01	0,909
Avstånd*Last	1	4,512	4,512	4,76	0,032
Error	75	71,037	0,947		
Lack-of-Fit	3	2,737	0,912	0,96	0,416
Pure Error	72	68,300	0,949		
Total	79	460,887			

X-led reducerad variansanalysmodellens sammanfattning

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,973225	84,59%	83,76%	82,46%

X-led variansanalys tukey-test

Avstånd*Vinkel*Last	N	Mean	Grouping		
6,28 Höger Ja	10	3,4	A		
6,28 Höger Ja	10	2,7	A		
6,28 Vänster Ja	10	1,0	B		
6,28 Vänster Nej	10	0,8	B	C	
4,66 Höger Nej	10	0,0	B	C	
4,66 Höger Ja	10	-0,5	C		
4,66 Vänster Nej	10	-2,8	D		
4,66 Vänster Ja	10	-3,3	D		

Y-led fullständig variansanalys

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Avstånd	1	33,800	33,800	13,72	0,000
Vinkel	1	39,200	39,200	15,91	0,000
Last	1	3,200	3,200	1,30	0,258
Avstånd*Vinkel	1	48,050	48,050	19,50	0,000
Avstånd*Last	1	2,450	2,450	0,99	0,322
Vinkel*Last	1	6,050	6,050	2,46	0,122
Avstånd*Vinkel*Last	1	1,800	1,800	0,73	0,396
Error	72	177,400	2,464		
Total	79	311,950			

Y-led fullständiga variansanalysmodellens sammanfattning

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1,56968	43,13%	37,60%	29,79%

Y-led reducerad variansanalys

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Avstånd	1	33,800	33,800	13,51	0,000
Vinkel	1	39,200	39,200	15,66	0,000
Last	1	3,200	3,200	1,28	0,262
Avstånd*Vinkel	1	48,050	48,050	19,20	0,000
Error	75	187,700	2,503		
Lack-of-Fit	3	10,300	3,433	1,39	0,252
Pure Error	72	177,400	2,464		
Total	79	311,950			

Y-led reducerad variansanalys modell

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1,58198	39,83%	36,62%	31,54%

Y-led variansanalys tukey-test

Avstånd*Vinkel*Last	N	Mean	Grouping	
6,28 Vänster Nej	10	6,1	A	
6,28 Vänster Ja	10	5,6	A	B
4,66 Höger Nej	10	3,6	B	C
6,28 Höger Nej	10	3,4		C
4,66 Vänster Ja	10	3,4		C
4,66 Vänster Ja	10	2,7		C
4,66 Höger Nej	10	2,6		C
6,28 Höger Ja	10	2,4		C

Z-led variansanalys modell

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Avstånd	1	255,612	255,612	124,77	0,000
Vinkel	1	17,112	17,112	8,35	0,005
Last	1	19,013	19,013	9,28	0,003
Avstånd*Vinkel	1	5,512	5,512	2,69	0,105
Avstånd*Last	1	6,613	6,613	3,23	0,077
Vinkel*Last	1	1,512	1,512	0,74	0,393
Avstånd*Vinkel*Last	1	2,113	2,113	1,03	0,313
Error	72	147,500	2,049		
Total	79	454,987			

Z-led variansanalysmodellens sammanfattning

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1,43130	67,58%	64,43%	59,98%

Z-led reducerad variansanalys modell

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Avstånd	1	255,61	255,612	119,00	0,000
Vinkel	1	17,11	17,112	7,97	0,006
Last	1	19,01	19,013	8,85	0,004
Error	76	163,25	2,148		
Lack-of-Fit	4	15,75	3,937	1,92	0,116
Pure Error	72	147,50	2,049		
Total	79	454,99			

Z-led reducerad variansanalysmodellens sammanfattning

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1,46561	64,12%	62,70%	60,24%

Z-led variansanalys tukey-test

Avstånd*Vinkel*Last	N	Mean	Grouping		
4,66 Vänster Ja	10	-2,7	A		
4,66 Vänster Ja	10	-4,2	A	B	
4,66 Höger Nej	10	-4,3	A	B	
4,66 Vänster Nej	10	-5,7		B	C
6,28 Höger Ja	10	-7,5		C	D
6,28 Vänster Nej	10	-7,5		C	D
6,28 Vänster Ja	10	-7,7		C	D
6,28 Höger Nej	10	-8,5			D

Euklidiskt avstånd variansanalys

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Avstånd	1	243,759	243,759	123,01	0,000
Vinkel	1	0,103	0,103	0,05	0,820
Last	1	10,401	10,401	5,25	0,025
Avstånd*Vinkel	1	4,036	4,036	2,04	0,158
Avstånd*Last	1	1,340	1,340	0,68	0,414
Vinkel*Last	1	5,437	5,437	2,74	0,102
Avstånd*Vinkel*Last	1	0,379	0,379	0,19	0,663
Error	72	142,678	1,982		
Total	79	408,132			

Euklidiskt avstånd variansanalysmodellens sammanfattning

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1,40771	65,04%	61,64%	56,84%

Euklidiskt avstånd reducerad variansanalys

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Avstånd	1	243,759	243,759	120,40	0,000
Vinkel	1	0,103	0,103	0,05	0,822
Last	1	10,401	10,401	5,14	0,026
Error	76	153,870	2,025		
Lack-of-Fit	4	11,192	2,798	1,41	0,239
Pure Error	72	142,678	1,982		
Total	79	408,132			

Euklidiskt avstånd reducerad variansanalysmodellens sammanfattning

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1,42289	62,30%	60,81%	58,23%

Euklidiskt avstånd variansanalys tukey-test

Avstånd*Vinkel*Last	N	Mean	Grouping	
6,28 Vänster Nej	10	9,81062	A	
6,28 Vänster Ja	10	9,73197	A	
6,28 Höger Nej	10	9,67323	A	
6,28 Höger Ja	10	8,82723	B	
4,66 Höger Nej	10	7,02788	B	C
4,66 Vänster Nej	10	5,99135		C
4,66 Vänster Ja	10	5,67051		C
4,66 Höger Ja	10	5,38883		C

Bilaga 3. Variansanalys och Tukey-test för differensen mellan verklig position och målposition i X-, Y- och Z-led samt euklidiska avstånd för utvärdering av algoritmens utveckling under studiegenomförande.

X-led fullständig variansanalys

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Omgång	1	0,6174	0,6174	0,96	0,340
Error	18	11,5641	0,6425		
Total	19	12,1816			

X-led fullständig variansanalysmodellens sammanfattning

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,801531	5,07%	0,00%	0,00%

X-led variansanalys tukey-test

Avstånd*Vinkel*Last	N	Mean	Grouping
4,66 Höger Nej	10	-22,3	A
4,66 Höger Nej	10	-22,7	A

Y-led fullständig variansanalys

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Omgång	1	122,09	122,089	81,30	0,000
Error	18	27,03	1,502		
Total	19	149,12			

Y-led fullständig variansanalysmodellens sammanfattning

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1,22542	81,87%	80,87%	77,62%

Y-led variansanalys tukey-test

Avstånd*Vinkel*Last	N	Mean	Grouping
4,66 Höger Nej	10	-15,3	A
4,66 Höger Nej	10	-20,3	B

Z-led fullständig variansanalys

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Omgång	1	63,37	63,368	54,56	0,000
Error	18	20,90	1,161		
Total	19	84,27			

Z-led fullständig variansanalysmodellens sammanfattning

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1,07765	75,19%	73,82%	69,38%

Z-led variansanalys tukey-test

Avstånd*Vinkel*Last	N	Mean	Grouping
4,66 Höger Nej	10	-9,9	A
4,66 Höger Nej	10	-13,4	B

Euklidiskt avstånd fullständig variansanalys

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Omgång	1	7,775	7,775	4,72	0,043
Error	18	29,632	1,646		
Total	19	37,407			

Euklidiskt avstånd variansanalysmodellens sammanfattning

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1,28305	20,78%	16,38%	2,20%

Euklidiskt avstånd variansanalys tukey-test

Avstånd*Vinkel*Last	N	Mean	Grouping
4,66 Höger Nej	10	-31,7	A
4,66 Höger Nej	10	-30,5	B