

Positionering av enskilda träd vid avverkning med skördare

Erfarenheter från ett prototypsystem utvecklat av Komatsu Forest

Björn Hannrup, Johan J. Möller



Framsida: Markus Näsman, SCA, utför referensmätning av stubbpositioner.

Innehåll

Förord	3
Summary.....	4
Sammanfattning	5
Bakgrund.....	6
Mål	7
Material och metoder	8
Komatsus prototypsystem för positionering	8
Implementering i SCA:s maskin-GIS	8
Referensmätningar	9
Intervjuer	10
Loggning av rådata	11
Resultat och diskussion	12
Referensmätningar	12
Förarnas erfarenheter	14
Loggning av rådata	14
Referenser.....	18
Bilaga 1. Referensmätningar från försöksserie med fixerat utskjut.	19



Uppsala Science Park, 751 83 Uppsala
skogforsk@skogforsk.se
skogforsk.se

Kvalitetsgranskning (Intern peer review) har genomförts 14 februari 2022 av Maria Nordström, Bitr. programchef. Därefter har Magnus Thor, Forskningschef, granskat och godkänt publikationen för publicering den 11 mars 2022.

Redaktör: Hanna Andtbacka, hanna.andtbacka@skogforsk.se
©Skogforsk 2022 ISSN 1404-305X

Förord

I skogsmaskiner används satellitbaserad positionering för att underlätta navigering och för att koordinatsätta de produktionsdata som rapporteras från maskinerna. Maskintillverkaren Komatsu Forest har tagit fram ett prototypsystem för noggrann bestämning av maskinens position och dess färdriktning, samt bestämning av position för de avverkade träden. Systemet kan potentiellt komma att medföra en markant förbättring jämfört med den teknik för positionering och navigering som används idag. Denna studie sammanfattar resultat från uppföljande mätningar samt erfarenheter från användning av systemet under ordinarie avverkning. Studien har finansierats inom forskningsprogrammet Mistra Digital Forest samt av medel från Skogforsks ramprogram.

I studien har Komatsu bidragit med loggning och bearbetning av rådata från den använda GNSS-mottagaren, vilket möjliggjort en detaljerad analys av tillgänglighet och förväntad noggrannhet för GNSS-mottagarens bestämning av position och riktning under varierande produktionsförhållanden.

I studien monterades Komatsus prototypsystem för positionsbestämning på en slutavverkningsskördare tillhörande företaget Bröderna Gannbäck Skog AB, samt på en gallringsskördare ägd av SCA. Under studietiden kördes slutavverkningsskördaren av Jonny Gannbäck och gallringsskördaren av Tommy Holm Ödmark och Yngve Granlöf.

SCA har varit markvärd under studien. Företaget har också på olika sätt spelat en mycket aktiv roll för att stimulera utvecklingen i riktning mot en förbättrad positionering i skogsmaskinerna. Från SCA har Markus Näsman och Magnus Bergman varit kontaktpersoner.

I studien har Skogforsk ansvarat för uppföljande mätningar av noggrannhet vid positioneringen samt upprättande av denna rapport. Från Skogforsk har Johan J. Möller och Björn Hannrup medverkat.

Ett varmt TACK till alla som medverkat till studien.

/Björn Hannrup & Johan J. Möller

Summary

Satellite-based positioning is used in forest machines to facilitate navigation and to generate coordinates for the production data reported from the harvesters. The machine manufacturer Komatsu Forest has recently developed a prototype system that accurately determines harvester position and its direction of movement, and determines the positions of the cut trees. The system could therefore offer a distinct improvement compared with the positioning and navigation technology used today.

The aims of the study were to evaluate the accuracy of the prototype system and to document the operators' experiences of using the positioning and direction information generated. Another aim was to, over a longer period, log data from the system fitted on production machines, and to use this data to find out how well measurement with network-RTK works under varying forest conditions.

The Komatsu prototype system was fitted on a final felling harvester and two thinning harvesters to generate positioning information. Data from the system was logged continually over approximately six months of ordinary harvesting work. The operators' experiences of using positioning and direction information from the system were documented through interviews. The precision in the prototype system's positioning of individual trees was evaluated by taking reference measurements of the positions of around 60 stumps.

The results from the study can be summarised as follows:

- Correspondence was generally good between the tree position determined by the Komatsu prototype system and the manual reference measurements of stump positions. The average deviation between the two position determinations was 0.56 metres. Data from the study showed that the deviations could be reduced if supplementary sensor information for various parts of the crane was added.
- The operators were unanimous and positive about using the positioning information from the prototype system. The system consistently showed the right position, so the operators felt more confident when working close to sensitive areas such as conservation areas or boundaries.
- The operators felt that system information about the machine's direction of movement made navigation easier. This particularly applied when starting work on a new harvesting site. Generally, the operators reported that the new compass heading information helped in moving the machine in the right direction immediately, with no false starts.
- Logging of data from the final felling harvester showed that the positioning and direction of movement generated by network-RTK worked well under forest conditions corresponding to final felling. Position and direction could be determined with an accuracy corresponding to cm-level and ± 1 degree, respectively, for more than 93% of the six months' logging time.
- Positioning with network-RTK was also accurate in thinning forest, and the surrounding tree layer only caused disruptions during a limited part of the logging time. The picture was less clear for determining direction in thinning forest. Logging data indicated high precision most of the time, but uncertainty was considerably higher for about 20% of the time. Technology for determining direction in thinning forest is therefore an urgent area for further study.

In summary, our study shows that the Komatsu prototype system for positioning is a big step towards improving positioning and direction information in harvesters. In final felling, the system can be used directly to accurately determine tree position, which can be beneficial in a number of applications. One example is connecting data on individual trees with data from high-resolution laser scanning. The study also shows that the improved information helped operators feel more confident and comfortable in their everyday work. This would probably also have a positive effect on both productivity and precision.

Sammanfattning

Satellitbaserad positionering används i skogsmaskiner för att underlätta navigering och för att koordinatsätta de produktionsdata som rapporteras från maskinerna. Maskintillverkaren Komatsu Forest har nyligen tagit fram ett prototypsystem för noggrann bestämning av skördarens position och dess färdriktning, samt bestämning av position för de avverkade träden. Systemet kan potentiellt komma att medföra en markant förbättring jämfört med den teknik för positionering och navigering som används idag.

Målen med studien var att utvärdera prototypsystemets noggrannhet och dokumentera förarnas erfarenheter av att använda den genererade positions- och riktningsinformationen. Ett ytterligare mål var att under en längre tid logga data från systemet monterat på produktionsmaskiner och utifrån detta material analysera förutsättningarna för att mäta med nätverks-RTK under varierande skogliga förhållanden.

I studien monterades Komatsus prototypsystem för positionering på en slutavverkningsskördare och två gallringsskördare. Data från systemet loggades kontinuerligt under cirka sex månaders ordinarie avverkningsarbete. Förarnas erfarenheter av att använda positions- och riktningsinformationen från systemet dokumenterades genom intervjuer. För att utvärdera precisionen i prototypsystemets positionsbestämning av enskilda träd utfördes referensmätning av positionerna för ett 60-tal stubbar.

Resultaten från studien kan sammanfattas enligt följande:

- Det var generellt god överensstämmelse mellan trädposition från Komatsus prototypsystem för positionsbestämning och de manuella referensmätningarna av stubbpositioner. I genomsnitt var avvikelserna mellan de två positionsbestämningarna 0,56 meter. Data från studien visade att avvikelserna kan minskas ytterligare ifall kompletterande givarinformation för kranens olika delar tillförs.
- Förarnas erfarenheter av att använda positionsinformationen från prototypsystemet var entydiga och genomgående positiva. Man upplevde att systemet konsekvent visade rätt position vilket gjorde att man kände en större trygghet då man avverkade mot känsliga områden som hänsyn eller gränser.
- Förarna upplevde att informationen om maskinens aktuella riktning från systemet underlättade navigeringen. Speciellt gällde detta då arbete på en ny trakt påbörjades. Generellt uttryckte förarna det som att man "kom rätt direkt" och "slapp göra omtag" för att komma dit man ville.
- Loggning av data från slutavverkningsskördaren gav starkt stöd för att positions- och riktningsbestämning med nätverks-RTK fungerar väl under skogliga förhållanden motsvarande slutavverkning. Data från studien indikerade att position och riktning kunde bestämmas med en noggrannhet motsvarande cm-nivå, respektive +/- 1 grad under mer än 93 procent av sex månaders loggningstid.
- Positionsbestämning med nätverks-RTK fungerade väl även i gallringsskog, det omgivande trädskiktet gav enbart upphov till störningar under en begränsad del av loggningstiden. För riktningsbestämning i gallringsskog var bilden mer splittrad; loggningsdata indikerade en hög precision under huvuddelen av tiden men att osäkerheten i bestämningen varit betydligt högre under cirka 20 procent av tiden. Tekniken för riktningsbestämning i gallringsskog är därför ett angeläget område för vidare studier.

Sammanfattningsvis visar vår studie att Komatsus prototypsystem för positionering är ett stort steg framåt mot förbättrad positions- och riktningsinformation i skördarna. I slutavverkning kan systemet användas direkt för noggrann trädpositionering och därmed generera nytta inom en rad tillämpningar. Att koppla samman trädvis data från skördare med data från högupplöst laserskanning är ett sådant exempel. Vidare visar studien att den förbättrade informationen har en positiv påverkan på förarnas

trygghet och trivsel i det dagliga arbetet. Sannolikt medför detta också en positiv påverkan på såväl produktiviteten som precisionen i utförandet.

Bakgrund

Satellitbaserad positionering används i skogsmaskiner för att underlätta navigering och för att koordinatsätta de produktionsdata som rapporteras från maskinerna. I dagens skördare är antennen för GNSS¹-mottagaren monterad på basmaskinens hytt (figur 1). I skördarnas produktionsfiler (hpr-filer) registreras trädvis storleks- och kvalitetsinformation om de avverkade träden, inklusive koordinater för hyttens position vid fällning av stammarna. Detta innebär att man utifrån positionsinformationen i produktionsfilerna kan upprätta kartor som upplösningsmässigt beskriver stickvägarna maskinen avverkat från (figur 1).



Figur 1. Vänster bild: Antennen för GNSS-mottagare monterad på hyttens tak. Höger bild: Positionsinformation från skördarens produktionsfil som visar position för maskinen vid avverkning av träden.

Att tillföra information om de avverkade trädens position i skördarnas produktionsfiler erbjuder en rad potentiella förbättringsmöjligheter (se Lindroos m. fl. 2015 för sammanställning). Detta kan åstadkommas genom att informationen om hyttens position kombineras med information om; *i*) hyttens riktning uttryckt som riktning relativt den geografiska nordpolen, *ii*) geometrin mellan hyttens position och kranfotens placering, *iii*) kranens vridningsvinkel relativt framdelen på maskinen samt *iv*) kranens utsträckt längd. Nyligen genomförda studier visar att det är möjligt att positionera enskilda träd utifrån en sådan ansats med mycket hög noggrannhet, understigande +/- en meter (Hauglin m. fl. 2017, Noordermeer m. fl. 2021).

För satellitbaserad positionering i skog förekommer två alternativa tekniker: kodmätning respektive mätning med nätverks-RTK (Real Time Kinematic). I skördare används idag uteslutande kodmätning. Tekniken har en högre robusthet för störningar, till exempel trädskronor som skymmer satelliter, men har samtidigt begränsningar när det gäller noggrannheten som maximalt är på meter-nivå. Vid mätning med nätverks-RTK kombineras direkt mätning på satellitsignalens bärvåg med korrektionssignaler från ett nät av fasta basstationer (SwePos 2021). Den senare tekniken har mycket hög noggrannhet (cm-nivå) men är betydligt känsligare för störning och har tidigare varit orrealistisk att använda på skördare, framför allt i gallringsskog. Under senare år har dock antalet tillgängliga satelliter ökat dramatiskt efter att nya satellitsystem tillkommit. Detta innebär förbättrade

¹ GNSS är en förkortning för Global Navigation Satellite System vilket inbegriper samtliga satellitsystem. Tidigare användes begreppet GPS (Global Positioning System) vilket syftar på det amerikanska satellitsystemet som till en början var det enda system som fanns att tillgå.

förutsättningar för mätningar med nätverks-RTK i skogsmiljö vilket gör det angeläget att utvärdera möjligheten att använda tekniken under varierande skogliga förhållanden.

Nyligen har maskintillverkaren Komatsu tagit fram ett prototypsystem för noggrann bestämning av maskinens position och dess färdriktning samt bestämning av position för de avverkade träden.

Systemet kan potentiellt komma att medföra en markant förbättring jämfört med den positioneringsteknik som används idag. Denna studie sammanfattar resultat från uppföljande mätningar samt erfarenheter från användning av systemet under ordinarie avverkning.

Mål

Målen med studien var:

- Att utvärdera noggrannheten vid positionering av enskilda träd med Komatsus prototypsystem. Utvärdering har gjorts genom jämförelse med positionsinformation från ett antal stubbar som mätts in med mycket hög noggrannhet.
- Att dokumentera förarnas erfarenheter av att använda ett positioneringssystem som i jämförelse med dagens teknik potentiellt har en markant förbättrad bestämning av maskinens position och färdriktning.
- Att genom en kontinuerlig loggning av data från produktionsmaskiner utvärdera möjligheten att använda satellitpositionering med nätverks-RTK under varierande skogliga förhållanden.

Material och metoder

Komatsus prototypsystem för positionering

Huvudkomponenterna i Komatsus framtagna prototypsystem för positionering var:

- GNSS-mottagare som utnyttjade mätning med nätverks-RTK och baserade positioneringen på satelliter från samtliga tillgängliga satellitsystem, det vill säga GPS, Glonass, Galileo och BeiDou. Under studietiden inhämtades korrektionssignalen från HxGN SmartNet (Hexagon 2021). Korrektionssignalen distribuerades till maskinen via mobilt Internet.
- GNSS-mottagare som tog in information från två antenner monterade på vardera sida av hyttens tak. En av de två antennerna användes för positionsbestämning. Relationen mellan de två antennerna användes för bestämning av hyttens riktning, uttryckt i grader relativt riktningen mot den geografiska nordpolen.
- En ny givare monterad i kranens vipparm för bestämning av utsträckt kranlängd.
- Befintlig givare för bestämning av kranens svängningsvinkel relativt framdelen på maskinen.
- En beräkning av position för de avvercade träden implementerad i skördardatorn och där beräknade trädpositioner registrerades i produktionsfilen (hpr-filen).

Prototypsystemet monterades av Komatsu på en slutavverkningsskördare (Komatsu 951) i slutet av maj 2021 och på en gallringsskördare (Komatsu 901, nr 1) i slutet av juni. I oktober ersattes gallringsskördaren av en annan skördare som var utav samma modell (Komatsu 901, nr 2). Prototypsystemet flyttades då över till den nya skördaren. I samtliga maskiner användes Komatsus styrsystem MaxiXplorer.

Skördarna i studien avvercade inom ett område som i grova drag sträckte sig från Timrå i sydost och därifrån inom ett ellipsformat område som sträckte sig sex mil i nordvästlig riktning in i landet.

Implementering i SCA:s maskin-GIS

Information från GNSS-mottagaren i Komatsus prototypsystem för positionering implementerades i SCA:s maskin-GIS. Den information som överfördes var:

- Aktuell position för hytten.
- Aktuell riktning för hytten, uttryckt som riktning i förhållande till den geografiska nordpolen. På Komatsus skördare är hytt och kran parallellt sammankopplade, vilket innebär att hyttens riktning alltid är gemensam med kranens.

I SCA:s maskin-GIS illustrerades hyttens position i form av ett hårkors och hyttens riktning i form av en riktningspil (figur 2). Att förarna kontinuerligt kunde se aktuell riktning för hytten/kranen innebar att ny funktionalitet tillfördes. Riktningssinformationen medförde att de fick tillgång till en ”känslig kompass” som de kunde navigera efter.



Figur 2. Bild av SCA:s maskinGIS som användes i skördarna och där information från GNSS-mottagaren implementerats. Aktuell position för hytten representeras av hårkors-symbolen medan riktningspilen representerar aktuell riktning för hytten.

Referensmätningar

I syfte att utvärdera precisionen för prototypsystemets positionering av enskilda träd genomförde Skogforsk referensmätningar vid avverkning med slutavverkningsskördaren (Komatsu 951) på ett objekt beläget tre mil norr om Sundsvall. Mätningarna genomfördes vid ett tillfälle, 2021-08-25. Vid mätningarna användes ett upplägg enligt följande:

- Skördarföraren avverkade 62 träd och stubbarna märktes löpande med ett identitetsnummer.
- Stubbarnas position mättes in med hög noggrannhet (cm-nivå) med hjälp av en traditionell mätstav och en GNSS-mottagare som utnyttjade nätverks-RTK (figur 3). GNSS-mottagaren var inställd på att enbart registrera mätvärden med fix-lösning. Ingen utsträckt loggning av stubbarnas position tillämpades utan ifall fix-lösning erhållits registrerades den enskilda stubbens position direkt och mätning fortsatte på nästa stubbe.
- För bestämning av precisionen för prototypsystemets positionering av enskilda träd beräknades avvikelsen i markplanet mellan trädposition registrerad i hpr-filen och tillhörande stubbposition från referensmätningen.



Figur 3. Illustration av referensmätningarna av stubbarnas position.

I kranen på slutavverkningsskördaren finns ingen givare som ger information om hur långt den sista krandelen mot skördaraggregatet, teleskoputskjutet, skjutits ut. Vid beräkning av trädposition i prototypsystemet används ett medelavstånd för teleskoputskjutet (1,12 m). Eftersom utskjutets längd varierar under fällning kommer avsaknad av information om denna längd att påverka precisionen för prototypsystemets bestämning av trädposition.

För att undersöka effekten av denna felkälla genomfördes referensmätningarna i två försöksserier. I en första försöksserie fixerade föraren teleskoputskjutet så att utskjuten längd var 1,12 m, det vill säga samma längd som användes i prototypsystemets beräkning av trädposition. I en andra försöksserie varierade föraren utskjuten längd för teleskoputskjutet som brukligt vid ordinarie avverkning.

Under referensmätningarna positionsbestämdes totalt 62 stubbar. Vid efterföljande kontroll av mätvärdena ströks tre observationer på grund av att referensmätningarna misslyckats. Detta resulterade i att efterföljande analys baserades på positionsinformation från totalt 59 stubbar. 28 av observationerna härrörde från försöksserie 1 då utskjutet var fixerat och 31 observationer härrörde från försöksserie 2 då ett variabelt utskjut användes.

Intervjuer

I syfte att följa upp förarnas erfarenheter av att använda Komatsus prototypsystem för positionering genomfördes intervjuer med förarna av slutavverkningsskördaren (1 förare) och gallringsskördaren (2

förare). Frågorna som ställdes kretsade kring teknisk funktionalitet för systemet, upplevd nytta av positions- och riktningsinformationen i det dagliga arbetet samt förslag på förbättringar.

Loggning av rådata

I GNSS-mottagaren som användes i Komatsus prototypsystem för positionering finns möjlighet att separat logga en uppsjö av information som används i och genereras av mottagaren. Under studietiden genomförde Komatsu en sådan loggning på alla skördare som ingick i studien. Loggning skedde med frekvensen 5 Hz.

I syfte att analysera förutsättningarna för positionering och riktningsbestämning med teknik för nätverks-RTK under varierande skogliga förhållanden analyserades följande variabler:

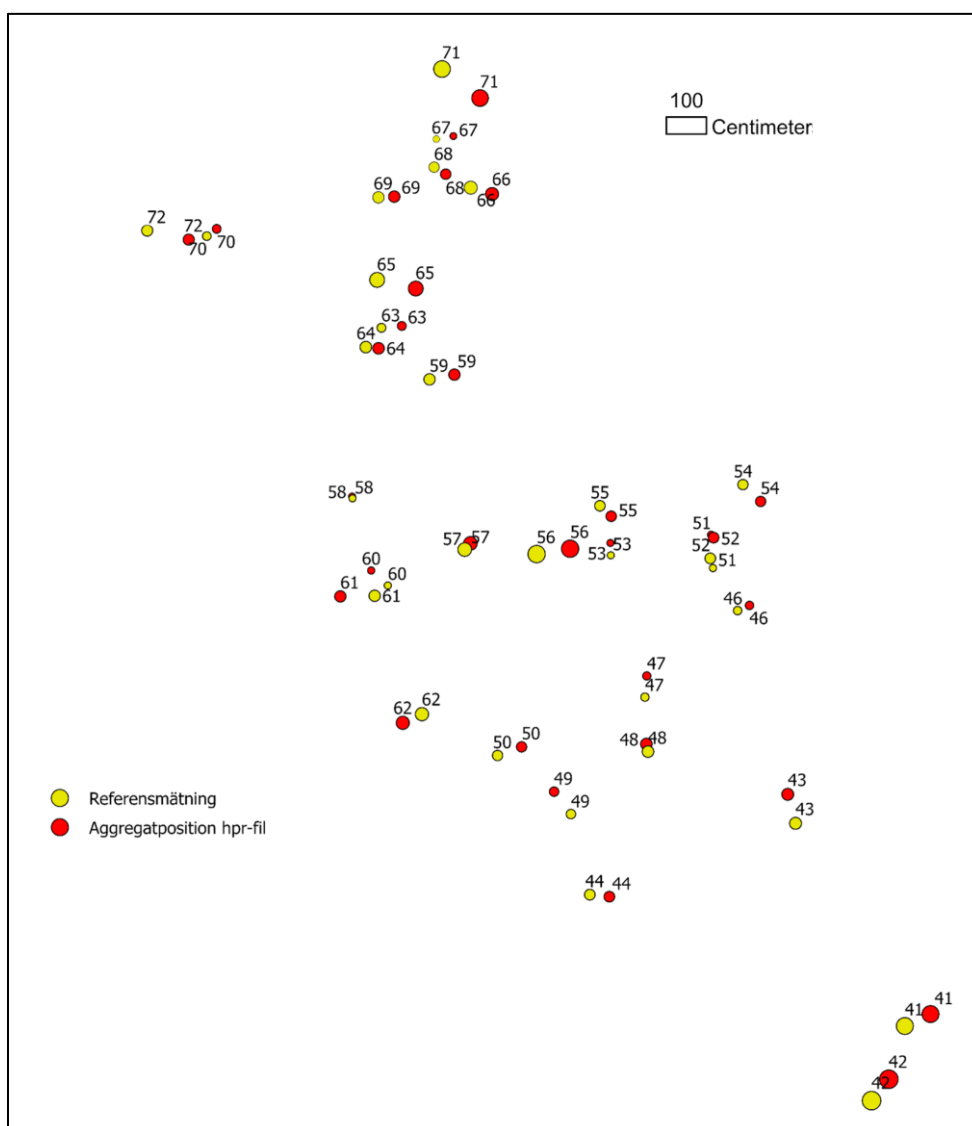
- Antalet satelliter som använts för positionsbestämning.
- Typ av fixlösning som använts vid *positionsbestämningen*. Informationen ger ett indirekt mått på den aktuella noggrannheten för positioneringen. Tre typer av lösning/mätteknik registrerades:
 1. Fix-lösning, vilket innebär att bärvågsmätning tillämpas och att full kontakt etablerats med ett antal satelliter. Då fix-lösning används erhålls den högsta graden av noggrannhet (cm-nivå) vid positionsbestämningen. Positionering med fix-lösning kan endast användas då det finns en tillgänglig korrektionssignal från nätet av fasta basstationer. Detta innebär att det krävs täckning för mobilt internet.
 2. Flyttals-lösning, vilket innebär att bärvågsmätning tillämpas men att antalet hela våglängder i satelliternas signaler ännu inte bestämts, det vill säga att full kontakt inte etablerats med satelliterna. Denna typ av lösning förekommer typiskt vid uppstart av mätning och då någon störning inträffar (till exempel tätt kronskikt). Noggrannheten vid flyttalslösning varierar i intervallet från några decimeter upp till metersnivå. Positionering med flyttals-lösning kan endast användas då det finns en tillgänglig korrektionssignal från nätet av fasta basstationer. Detta innebär att det krävs täckning för mobilt internet.
 3. Kodmätning, vilket är en alternativ teknik för satellitbaserad positionering som baseras på mätning av tiden det tar för kodade signaler att färdas från satellit till mottagare. Noggrannheten för avancerade mottagare är typiskt i intervallet 1 – 2 meter. I vår studie använde GNSS-mottagarna vanligen kodmätning då det inte fanns en tillgänglig korrektionssignal från nätet av fasta basstationer, det vill säga när det saknades täckning för mobilt internet.
- Typ av fixlösning som använts för *riktningsbestämningen*. Informationen ger ett indirekt mått på den aktuella noggrannheten i bestämningen av riktning på liknande sätt som vid positionsbestämningen. Vid fix-lösning kan noggrannheten för riktningsbestämning med det aktuella systemet skattas till cirka +/- 1 grad medan den är lägre vid flyttalslösning.

Skillnaden mot typ av fixlösning för positioneringen är att vid riktningsbestämning kan fix- och flyttalslösning erhållas utan tillgång till mobilt internet, det vill säga tillgång till korrektionssignal från nätet av fasta basstationer är inte nödvändig. Detta beror på att det är det inbördes förhållandet mellan antennerna som är grunden för riktningsbestämningen och att eventuella mätfel som korrektionssignalen justerar för är gemensamma mellan antennerna.

Resultat och diskussion

Referensmätningar

Det var generellt god överensstämmelse mellan trädposition från Komatsus prototypsystem för positionsbestämning och de manuella referensmätningarna av stubbpositioner (figur 4). I genomsnitt var avvikelsen mellan de två positionsbestämningarna 0,56 meter för försöksserien med variabel längd på teleskoputskjutet. Motsvarande avvikelse för försöksserien med fixerad längd på teleskoputskjutet var 0,41 meter (tabell 1, bilaga 1). Vi tolkar skillnaden i genomsnittlig avvikelse mellan de två försöksserierna som en skattning av det mätfel som avsaknaden av information om utskjuten längd för teleskoputskjutet tillför.

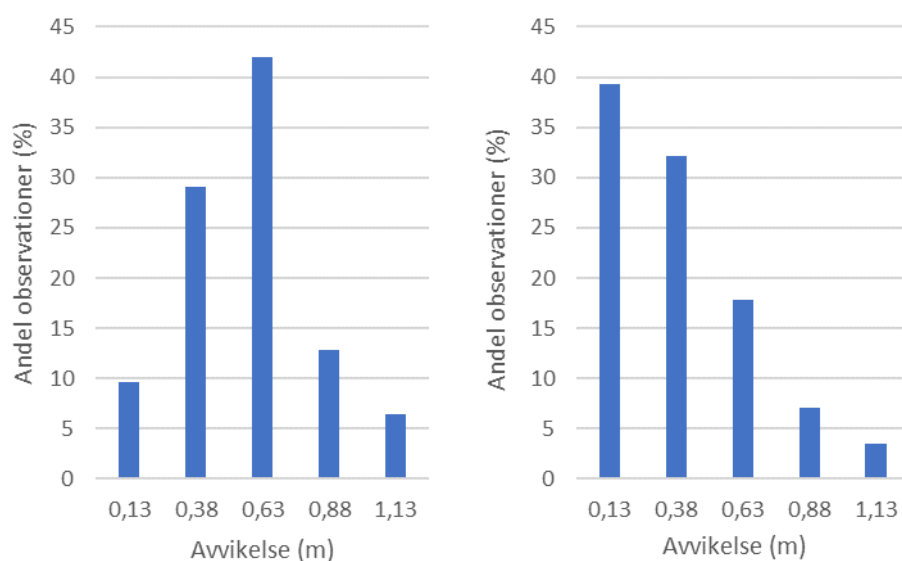


Figur 4. Aggregatposition vid fällning från skördarens hpr-fil (röda cirklar) respektive stubbposition från referensmätning (gula cirklar) för 31 positioner registrerade under den andra försöksserien med variabelt utskjut. Storleken på symbolerna är proportionell mot respektive träds diameter i brösthöjd.

Tabell 1. Antal observationer, använd enhet, medelvärde samt standardavvikelse till medelvärdet för trädens brösthöjdsdiameter (DBH) och för avvikelsen mellan trädposition från Komatsus prototypsystem för positionsbestämning och de manuella referensmätningarna av stubbpositioner.

Försöksled	Variabel	n	Enhet	Medel-värde	Standard avv.
Variabelt utskjut	Avvikelse trädposition	31	m	0,56	0,26
Variabelt utskjut	DBH	31	mm	152,5	64,1
Fixerat utskjut	Avvikelse trädposition	28	m	0,41	0,27
Fixerat utskjut	DBH	28	mm	163,0	56,1

I figur 5 redovisas fördelningen av avvikelser mellan trädposition från Komatsus prototypsystem och de manuella referensmätningarna från försöksserierna med variabelt respektive fixerat utskjut. Andelen av avvikelserna som understeg 0,5 meter var 39, respektive 71 procent för de två försöksserierna. För försöksserien med variabelt utskjut var avvikelserna ungefärligen normalfördelade medan avvikelserna från försöksserien med fixerat utskjut följde en annorlunda typ av fördelning.



Figur 5. Fördelningen av avvikelser mellan trädposition från Komatsus prototypsystem för positionsbestämning och de manuella referensmätningarna av stubbpositioner för försöksserien med variabel längd på teleskoputskjutet (vänster figur) och för försöksserien med fixerad längd på teleskoputskjutet (höger figur).

Informationen om utsträckt kranlängd är central för att möjliggöra en korrekt bestämning av trädposition. I den aktuella skördaren fanns ingen givare i kranens lyftarm eller i dess teleskoputskjut utan information om utsträckt kranlängd genererades enbart från en givare monterad i kranens vipparm. Avsaknaden av givarinformation från lyftarm och teleskoputskjut tillför osäkerhet och det är sannolikt att avvikelserna för prototypsystemets bestämning av trädposition huvudsakligen orsakades av osäkerhet i bestämningen av utsträckt kranlängd. En tidigare studie har visat att för skördare utrustade med tekniken för kranpetsstyrning är bestämningen av utsträckt kranlängd mycket exakt, med en precision som ligger på cm-nivå (Hannrup m. fl 2020). Utifrån ovanstående resonemang drar vi slutsatsen att precisionen i trädbestämningen för framtida skördare utrustade med

kranspetsstyrning och positioneringssystem motsvarande Komatsus prototypsystem kan förväntas vara mycket hög, med bestämmingar av trädpositioner som storleksmässigt rör sig i intervallet någon eller några decimeter från de sanna positionerna.

Förarnas erfarenheter

När det gäller den tekniska funktionaliteten upplevde föraren av slutavverkningsskördaren inte några problem med positionsangivelsen eller riktningsinformationen. Föraren uttryckte det som att tekniken fungerat "till 100 procent". På samma sätt hade förarna av gallringsskördarna inte upplevt några problem med positionsangivelsen. Däremot hade det förekommit att pilen i GIS-programmet som indikerade kranens riktning uppvisat ett "oroligt beteende" och uppenbarligen pekade i en felaktig riktning. Enligt föraren hade detta problem företrädesvis inträffat då maskinen befunnit sig i mycket tät gallringsskog. Det var dock ett problem som inträffat sällan.

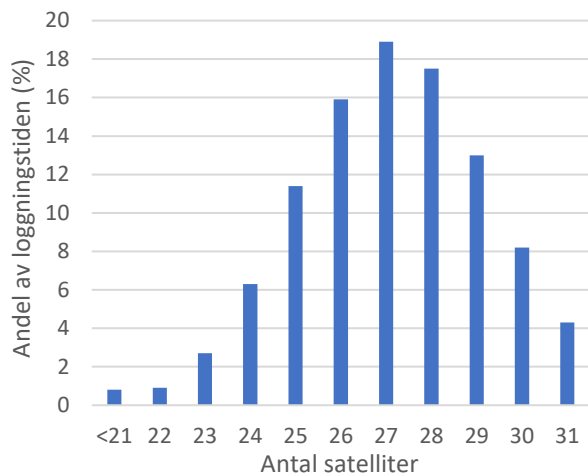
Samtliga förare hade upplevt en stor nytta av positions- och riktningsinformationen från Komatsus prototypsystem. När det gäller positionsinformationen kan nyttan sammanfattas som "ökad trygghet i det dagliga arbetet". Man upplevde att positionsinformationen var väldigt exakt och att den konsekvent visade rätt position. Spontant jämförde förarna med positionsinformationen från maskinernas tidigare GNSS-mottagare som hade betydligt lägre precision, men också tidvis kunde ange positioner som låg utanför det aktuella avverkningsobjektet. Förarnas höga tillit till den nya positionsinformationen medförde att de kände en mycket större trygghet då de avverkade i närheten av känsliga områden som gränser eller hänsynsobjekt. En ytterligare nytta som en förare av gallringsskördaren förde fram var att den högre noggrannheten i positionsinformationen medförde att kartorna över stickvägsnätet blev mer exakta vilket underlättade planeringen av skotningen.

Riktningsinformationen från Komatsus prototypsystem underlättade navigeringen av maskinerna och var nog det som förarna upplevde genererat störst påtaglig nytta i det dagliga arbetet. Förarna förmedlade att de litade på riktningsinformationen fullt ut och i både slutavverknings- och gallringsskördaren hade förarna börjat använda kranen som ett navigeringshjälpmedel. Man pekade med kranen, läste av dess riktning i SCA:s GIS-program och kunde på så vis navigera exakt dit man ville komma. Förarna framhöll speciellt nyttan av riktningsinformationen då arbete på ett nytt objekt påbörjades, till exempel då man högg upp en basväg till objektet, då man högg upp första slaget längs en ytterkant vid gallring och rent allmänt vid körning i mörker och dimma. Generellt uttryckte föraren det som att man "kom rätt direkt" och "slapp göra omtag" för att komma dit man ville.

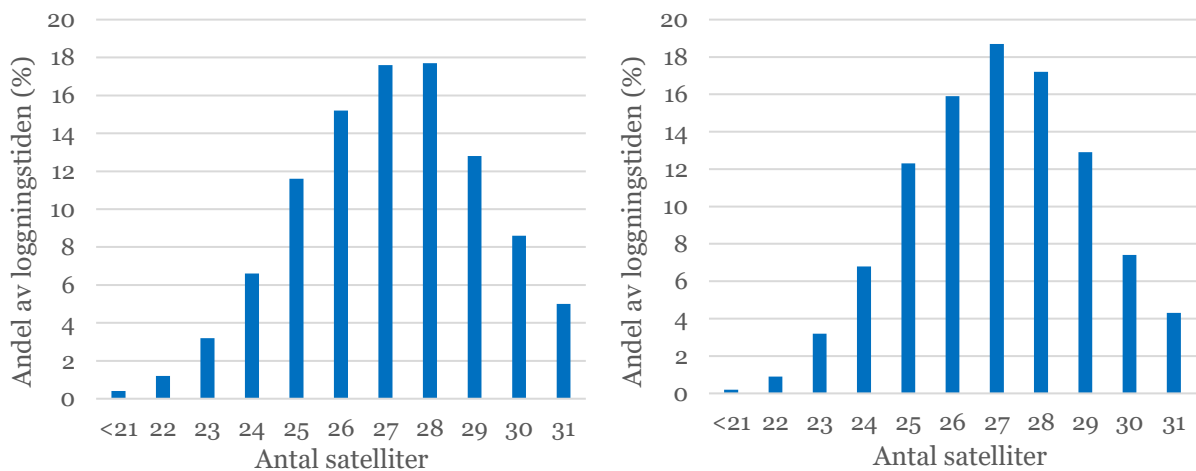
På frågan hur systemet skulle kunna förbättras förmedlade förarna behov att kunna se aggregatets position i GIS-programmet. Denna information skulle vara värdefull till exempel då man avverkar mot en gräns.

Loggning av rådata

Loggningen av information från Komatsus prototypsystem för positionering monterat på slutavverkningsskördaren omfattade totalt 1645 timmar (tabell 2). Motsvarande tid för positioneringssystemet monterat på gallringsskördaren uppgick till totalt 1298 timmar. Under drygt 78 procent av denna tid var positioneringssystemet monterat på den första gallringsskördaren (Komatsu 901, nr 1) och det flyttades därefter till den andra (Komatsu 901, nr 2) gallringsskördaren (tabell 2). Från både gallringsskördarna och slutavverkningsskördaren rymmer materialet alltså loggningsinformation inhämtad kontinuerligt under en längre tidsperiod och över ett större antal avverkningsobjekt. Sammantaget innebär det att materialet kan förväntas ge en god beskrivning av förutsättningarna för mätning med nätverks-RTK under skogliga förhållanden inom det aktuella geografiska området.



Figur 6. Fördelningen av antalet satelliter som använts vid positioneringen under den totala loggningstiden för slutavverkningsköraren (Komatsu 951). GNSS-mottagaren använde maximalt 31 satelliter vilket är anledningen till att fördelningen är trunkerad uppåt.



Figur 7. Fördelningen av antalet satelliter som använts vid positioneringen under den totala loggningstiden för gallringsskördarna; Komatsu 901, nr 1 (*vänster figur*) och Komatsu 901, nr 2 (*höger figur*). GNSS-mottagaren använde maximalt 31 satelliter vilket är anledningen till att fördelningarna är trunkerade uppåt.

I figur 6 och 7 redovisas fördelningen av antalet satelliter som använts vid positionsbestämningen under den totala loggningstiden. Fördelningarna av antalet använda satelliter var närmast identiska mellan slutavverkningsköraren (figur 6) och de två gallringsskördarna (figur 7). I samtliga fall hade mer än 20 satelliter använts under mer än 99 procent av loggningstiden vid positioneringen. Detta indikerar att Komatsus prototypsystem för positionering har förutsättning att nå hög tillgänglighet och precision, eftersom tillgång till ett relativt stort antal satelliter är en avgörande faktor vid satellitbaserad positionering i skogsmiljö (Hannrup m. fl. 2020).

Tabell 2. Summerad information från loggning av GNSS-mottagare för skördarna utrustade med Komatsus prototypsystem för positionering. För den totala loggningstiden per skördare anges procentuell fördelning av tid med fixlösning, flyttalslösning och kodmätning vid positions- respektive riktningsbestämning. Andelen tid med kodmätning vid positionsbestämningen är uppdelad på tid med internettäckning respektive utan internettäckning.

Maskin	Total tid loggning	Position				Riktning		
		Kodmätning		Flyttalslösning	Fixlösning	Kodmätning	Flyttalslösning	Fixlösning
		Internet-täckning	Ingen internet-täckning					
Komatsu 951	1645h	0,6%	5,2%	0,4%	93,8%	0,4%	0,3%	99,2%
Komatsu 901 nr 1	1019h	0,1%	3,8%	9,2%	87,0%	0,1%	24,9%	75,0%
Komatsu 901 nr 2	279h	0,1%	1,5%	5,1%	93,3%	<0,1%	15,4%	84,5%

För slutavverkningsskördaren erhöles fixlösning i 99,2 och 93,8 procent av loggningstiden vid riktnings- respektive positionsbestämningen (tabell 2). För positionsbestämningen utgjordes merparten av den återstående andelen av loggningstiden av kodmätning, vilken huvudsakligen initierats av avsaknad av internettäckning. Tillgång till internet krävs för distribution av korrektionssignalen från nätet av fasta basstationer. En mycket liten del av loggningstiden utgjordes av tid med flyttalslösning (0,4 procent). Flyttalslösning erhålls vid uppstart men också då signalerna från många av de använda satelliterna störs, till exempel av hindrande trädskronor. Våra data indikerar alltså att sådana störningar sällan inträffar.

Sammanfattningsvis ger data från vår studie starkt stöd för att positions- och riktningsbestämning med nätverks-RTK fungerar väl under skogliga förhållanden *motsvarande slutavverkning*. Indirekt indikerar den höga andelen fixlösning för både positions- och riktningsbestämningen att noggrannheten kan förväntas vara på cm-nivå respektive +/- 1 grad för bestämningarna av position och riktning. För positionsbestämningen kan noggrannheten dock försämrats ifall avverkning sker inom område med mycket dålig internettäckning.

Även för de två gallringsskördarna erhöles fixlösning vid positionsbestämningen för en stor andel av loggningstiden (87 respektive 93 procent). I jämförelse med loggningsinformationen från slutavverkningsskördaren utgjordes dock en markant högre andel av loggningstiden av flyttalslösning. Detta gällde speciellt vid riktningsbestämningen där andelen tid med flyttalslösning uppgick till 25 respektive 15 procent (tabell 2). Vid gallring är skördarna konstant omgivna av stående träd i alla riktningar och det är sannolikt att den högre andelen flyttalslösning orsakats av störningar på satellitsignalerna från de omgivande träden.

Loggningsinformationen från skördarna i vår studie ger starkt stöd för att *positionsbestämning* med nätverks-RTK fungerar väl vid slutavverkning men även vid avverkning under ett medelhögt trädskikt (tabell 2). Detta i kontrast till tidigare erfarenheter då mätning med nätverks-RTK i "tuffa" miljöer, som i skog eller bland högre byggnader, tenderat att vara svåra eller omöjliga att genomföra (Li m. fl 2015, Johansson & Tysk 2017). Under de senaste åren har antalet tillgängliga satelliter ökat dramatiskt genom tillkomsten av nya satellitsystem. Vi tolkar den höga tillgänglighet vid positionsbestämning med nätverks-RTK i vår studie som en effekt av att antalet satelliter ökat dramatiskt.

När det gäller *riktningsbestämningen* ger loggningsinformationen starkt stöd för att den använda tekniken med två antenner ger en genomgående hög precision i slutavverkning. I gallring är bilden mer splittrad; våra data indikerar en hög precision under huvuddelen av loggningstiden men att osäkerheten i riktningsbestämningen varit betydligt högre under cirka 20 procent av tiden. Denna bild

stöds av förarnas observationer (se diskussion ovan). Precisionen i riktningsbestämningen som observerats i vår studie är förmodligen fullt tillräcklig utifrån drivningstekniska aspekter men ska data om enskilda träd användas i olika tillämpningar krävs att både positions- och riktningsinformationen är mycket precis för att korrekta trädpositioner ska genereras. Tekniken för riktningsbestämning i gallringsskog är därför ett angeläget område för vidare studier.

Referenser

Hannrup, B. Ene, L., Johansson, F., Jönsson, P., Rossander, M. & Willén E. 2020. Utvärdering av nya möjligheter till förbättrad positionering med satellitbaserade system. Arbetsrapport 1047, Skogforsk.

Hauglin, M. Hofstad Hansen, E. Naasset, E. Even Busterud, B. Glenn Omholt Gjevestad, J. & Gobakken, T. 2017. Scand. J. For. Res. 8: 774–781.

Hexagon 2021. <https://hxgnsmartnet.com/sv-se>. Tillgänglig 211028.

Johansson, S. & Tysk, P. 2017. Galileos påverkan vid nätverks-RTK satellitpositionering i svåra miljöer. Examensarbete vid Avdelningen för industriell utveckling, IT och samhällsbyggnad. Högskolan Gävle. 33 s.

Li, X., Ge, M., Dai, X., Ren, X., Fritsche, M., Wickert, J., & Schuh, H. (2015). Accuracy and reliability of multi-GNSS real-time precise positioning: GPS, GLONASS, BeiDou, and Galileo. *Journal of Geodesy*, 89(6), 607–635.

Lindroos, O. Ringdahl, O. La Hera, P. Hohnloser, P. & Hellström, T. 2015. Estimating the position of the harvester head – a key step towards the precision forestry of the future? *Croat. J. For. Eng.* 36: 147–164.

Noordermeer, L., Sørngård, E., Atrup, R., Næset, E. & Gobakken, T. 2021. Coupling a differential global navigation satellite system to a cut-to-length harvester operating system enables precise positioning of harvested trees. *International J. For. Eng.* DOI: 10.1080/14942119.2021.1899686.

SwePos 2021. [Swepos Tjänsteportal \(lantmateriet.se\)](https://lantmateriet.se). Tillgänglig 211028.

Bilaga 1. Referensmätningar från försöksserie med fixerat utskjut.

Figur. Aggregatposition vid fällning från skördarens hpr-fil (röda cirklar) respektive stubbposition från referensmätning (gula cirklar) för 28 positioner registrerade under den första försöksserien med fixerat utskjut. Storleken på symbolerna är proportionell mot respektive träs diameter i brösthöjd.

