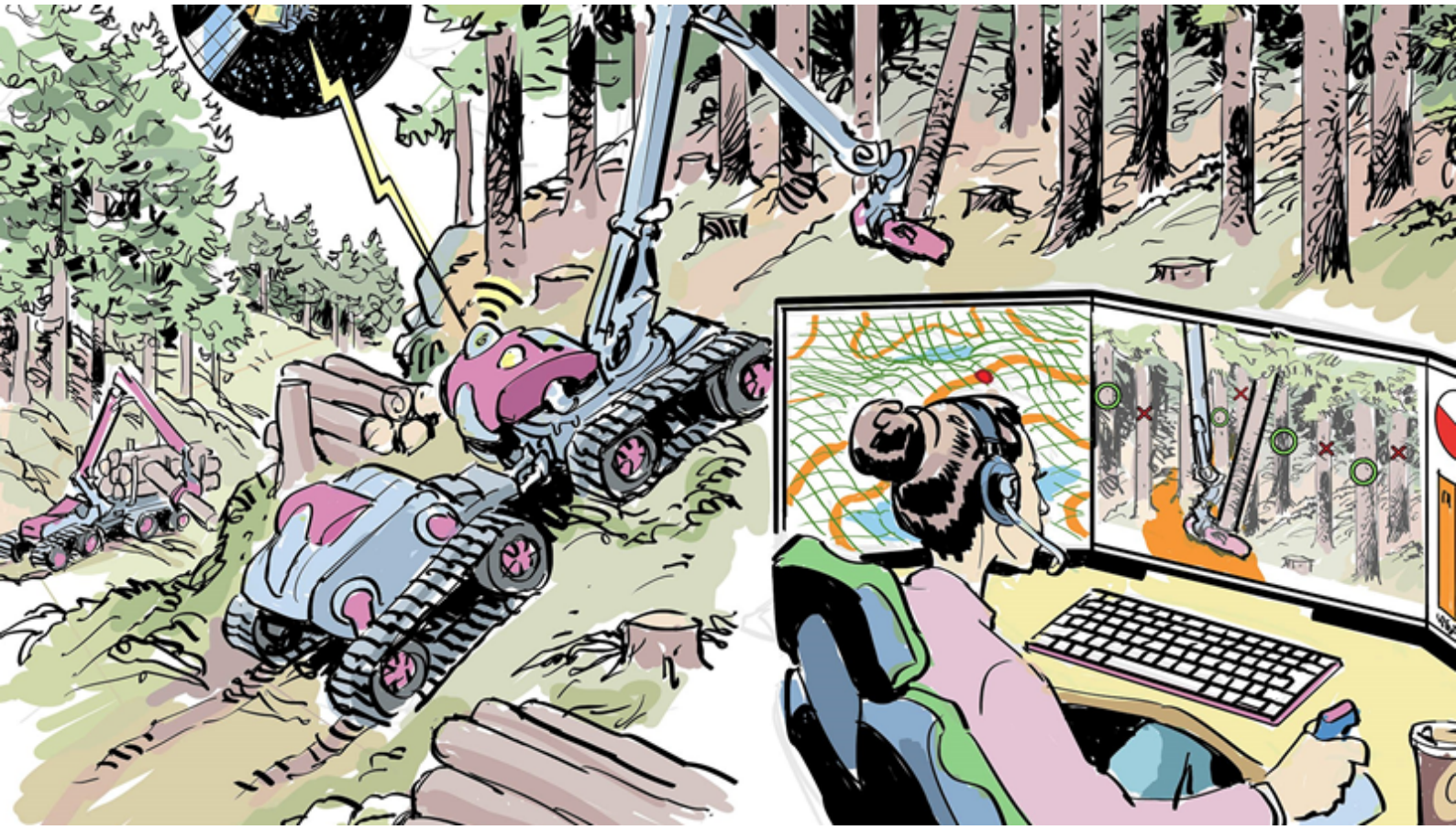
ARBETSRAPPORT 1077-2021

Automation för autonom terrängmobilitet (AUTO2)

SLUTRAPPORT – STEG 2

Automation for autonomous terrain mobility (AUTO2)
Final Report – Stage 2



ILLUSTRATÖR: GÖSTA LINDWALL

Författare: Olle Gelin, Morgan Rossander, Tobias Semberg, Martin Englund & Mikael Andersson

Externa författare och granskare:
Peter Assarsson, Carola Häggström, Magnus Karlberg, Håkan Lideskog, Ola Lindroos, Anneli Lundmark, Björn Möller, Gustav Sten & Eddie Wadbro

skogforsk

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

Kvalitetsgranskning (Intern peer review) har genomförts 26 mars 2021 av
Petrus Jönsson, Bitr. programchef. Därefter har Magnus Thor, Forskningschef Skogforsk,
granskat och godkänt publikationen för publicering den 30 mars 2021.

Redaktör: Anna Franck, anna@annafranck.se
©Skogforsk 2021 ISSN 1404-305X

Förord

Den här rapporten är en sammanfattning av steg två i projekt Automation för autonom terrängmobilitet (AUTO2), som genomförts under perioden december 2018–2020. Projektet ingår i Vinnovas UDI-program (UDI = Utmaningsdriven innovation) – en satsning på samverkansprojekt som långsiktigt arbetar med att lösa samhällsutmaningar för att bidra till hållbarhetsmålen i Agenda 2030. Projektet som finansierats av Vinnova och skogsbranschen har genomförts i bred samverkan med universitet, skogsmaskintillverkare, it-bolag och skogsföretag. Skogforsk har haft en projektledande och koordinerande roll. Ett stort tack till alla er som på ett eller annat sätt medverkat i projektet.

Uppsala i mars 2021

Olle Gelin, Morgan Rossander,
Tobias Semberg, Martin Englund
& Mikael Andersson

Innehåll

Förord 3

Sammanfattning 5

Summary 7

Bakgrund 9

Mål 9

Metod 10
- Inledande workshop 10
- Definiering av parametrar 10
- Global och lokal planering 10
- Fjärrmanövrering från operatörsstation 10
- Lagar och regler 11

Resultat och diskussion 12
- Tekniken används i nya utvecklingsprojekt 12
- Möjligheter och hinder 12
- Få liknande initiativ i världen 13
- Seminarier och pressvisning 13
- Projektet har genererat nya projekt 14
- Måluppfyllelse 14
- Kvantifiering av mål 15

Slutsatser 16

Referenser 17

Bilaga 1. Slutrapport för AP1 Systemanalyser 18

Bilaga 2. Slutrapport för AP2 AutoSafety 24

Bilaga 3. Slutrapport för AP3 AutoDrive 28

Bilaga 4. Slutrapport för AP4 AutoRemote 45

Bilaga 5. Slutrapport för AP5 Säkerhet, lagar och regler 52

Bilaga 6. Slutrapport för AP6 Testplattformar 54

Sammanfattning

Automatiseringen av uppgifter som sköts av människan går snabbt. Inom transportsektorn och industrin har denna utveckling redan kommit långt. Det här projektet har utvecklat förutsättningar för att använda liknande teknik i skogen. Målet har varit att ta ett rejält kliv mot ökad automation i skogsbruket och på så sätt skapa en säkrare och mindre fysiskt belastande arbetssituation samt ökad produktivitet på systemnivå.

Arbetet genomfördes i sex delprojekt, fyra med fokus på att realisera teknik och metoder för autonom terrängnavigering och två med fokus på att skapa förutsättningar för tekniken att kommersialiseras. I det första delprojektet genomfördes systemanalyser samt workshops med branschen och slutanvändarna för att se vilka behov som kan uppfyllas med en ökad automation. Resultatet mynnade ut i sex rapporter – allt ifrån vad skogsbranschen tror om framtida automation till förarlösa skogsmaskiner ur ett socialt hållbarhetsperspektiv.

Delprojekt två, tre och fyra jobbade med att realisera autonom terrängnavigering. Projektet definierade tidigt ett arbetssätt som möjliggör parallell utveckling mellan flera olika organisationer, där alla delar bildar ett ekosystem med noder som löser olika uppgifter för att köra autonomt. Noderna integrerades sedan i en övergripande arkitektur baserad på det öppna ramverket Robot Operating System (ROS). Den autonoma terrängnavigeringen fungerar i grunden på två nivåer. I nivå ett optimerar en global planerare en körrutt baserad på några nyckelparametrar så som ytstruktur, markfuktighet, trädvolym m.m. Maskinen följer sedan den föreslagna rutten genom GNSS-styrning. Denna första nivå är en grov lösning som inte tar hänsyn till lokala förutsättningar. I nästa nivå finjusterar en lokal planerare styrningen, undviker hinder och objekt på plats och styr maskinen på framkomlig bana. Den lokala planeraren tar även hjälp av en objektidentifieringsnod som ska skilja överkörningsbara hinder från ej överkörningsbara hinder, till exempel buske från sten och rishög från snödriva. Att identifiera objekt är en av projektets största utmaningar, där djupinlärning av neurala nätverk baserat på stora datamängder av beskrivna bilder används. Här återstår arbete för en robust lösning som kan klara den variation som finns i skogsmark.

För att möjliggöra autonom körning krävs ett säkerhetssystem. En lösning för persondetektion och aktiv säkerhet runt maskinen har utvecklats och utvärderats i projektet. RGB- och IR-kameror visar att tekniken har hög detektionsgrad, men att det finns behov av skogliga träningsdata. En väl utvecklad och testad persondetektion kan, i kombination med ett varningssystem, tillgodose säkerheten i form av ett virtuellt stängsel eller säkerhetszon. På grund av utebliven leverans av kritiska delkomponenter kunde varningssystemet inte testas enligt framtagen testplan.

Då vissa delar inte är helt automatiserade behövs en fjärroperatör som kan gå in och hjälpa maskinen att utföra vissa åtgärder. Projektet har byggt och utvärderat en operatörstation för att fjärrstyra och övervaka skogsmaskinen. Fjärrstyrning möjliggör en bättre arbetsmiljö då maskinföraren inte behöver utsättas för de risker och obehag som det innebär att vara ombord på maskinen. Fjärrstyrningen ger också ökade möjligheter till operatörsstöd, som till exempel implementering av “augmented reality” på skärmar, samt mer ergonomisk utformning av styrdonen. Med fjärrstyrning möjliggörs också en social samvaro med kollegor och kunskapsöverföring mellan erfarna och nya operatörer.

Projektet har jobbat med flera testplattformar och denna testinfrastruktur kommer efter projektet att fortsätta tjäna forskning och utveckling för ökad automation. Testplattformarna har också skapat samarbeten med flera andra forskningsutövare utanför projektet som vill utveckla och validera automationslösningar på fysisk hårdvara.

För att möjliggöra tekniken har projektet arbetat med lagar och regler samt tagit fram underlag som beskriver vilka regulatoriska hinder som finns och analyserat risker. Detta har genererat två publika rapporter som beskriver det regulatoriska läget för autonom teknik inom skogsbruk. Arbetsgruppen har även jobbat mot Kommittén för teknologisk innovation & etik (KOMET) och projektets bidrag ingår nu i en förstudie om förarlösa maskiner i terräng och lantbruk.

Intresset för projektet har varit stort från både media och branschen och resultatet har skapat nya möjligheter till att göra skogsbruket mer hållbart och effektivt.

Summary

Automation of work tasks currently performed by humans is proceeding rapidly. Within the transport sector and industry, this development has already come a long way. This project has advanced the possibilities for using similar technology in the forest. The objective has been to take a major step towards increased automation in forestry, thereby creating a safer and less physicially demanding work situation, and increased productivity at system level.

The work was carried out in six sub-projects, four with a focus on implementing technology and methods for autonomous terrain navigation, and two focusing on commercialisation of the technology. In the first sub-project, system analyses were carried out, and workshops were held with the sector and final users to see what needs could be fulfilled with increased automation. The results were presented in six reports, ranging from what the forest sector believes about future automation to self-driving forest machines from a social sustainability perspective.

Sub-projects 2, 3 and 4 worked on implementing autonomous terrain navigation. At an early stage, the project defined a method of working that enables parallel development between several different organisations, where all parts form an ecosystem with nodes that solve various tasks relating to autonomous operation. The nodes were then integrated in an overarching architecture based on the open framework, Robot Operating System (ROS).

Autonomous terrain navigation basically works on two levels. At the first level, a global planner optimises a driving route based on some key parameters, such as surface structure, soil moisture, and tree volume. The machine then follows the proposed route through GNSS steering. This first level is a rough solution that does not consider local conditions. At the next level, a local planner tunes the steering, avoids obstacles and objects in situ, and steers the machines on an accessible track. The local planner is also helped by an object identification node, which identifies obstacles that can be driven over and those that cannot; for example, the node distinguishes bushes from rocks and brushwood piles from snowdrifts. Identifying objects is one of the project's biggest challenges, and deep learning of neural networks based on large quantities of data of described images is used. Here, work remains to find a robust solution that can cope with the variation in forest land.

To enable autonomous driving, a safety system is needed. A solution for person detection and active safety around the machine has been developed and evaluated in the project. RGB and IR cameras show that the technology has a high level of detection, but that forest training data is needed. A well-developed and tested person detection system, in combination with a warning system, may satisfy the need for safety in the form of a virtual fence or safety zone. However, due to the lack of delivery of critical components, the warning system could not be tested according to the test plan.

As certain parts are not completely automated, a remote operator is needed who can intervene and help the machine perform certain activities. The project has built and evaluated an operator station for remote control and monitoring of the forest machine. Remote control enables a better work environment, as the machine operator is not exposed to the risks and discomfort linked with being onboard the machine. Remote control also increases opportunities for operator support, such as implementation of augmented reality on screens, and more ergonomic design of control equipment.

Remote control also enables social interaction between colleagues, and knowledge transfer between experienced and new operators.

The project has worked with several test platforms and, after the project, this test infrastructure will continue to serve research and development for increased automation. The test platforms have also generated collaborations with many other researchers outside the project who are seeking to develop and validate automation solutions on physical hardware.

As part of enabling the technology, the project has considered laws and regulations, and produced documentation that describes the regulatory barriers and analysed risks. Two public reports were prepared that describe the regulatory position regarding automonous technology in forestry. The working group has also worked in relation to the Committee for Technological Innovation and Ethics (KOMET), and the project's contribution is now part of a pre-study on self-driving machines in terrain and agriculture.

Both the media and the forest sector have shown great interest in the project, and the results have created new opportunities to improve sustainability and efficiency in forestry.

Bakgrund

Arbetsmiljön för maskinförare som kör skördare, markberedare och skotare är fysiskt påfrestande, både vad gäller buller och helkroppsvibrationer då maskinerna förs fram i ojämn terräng. Genom att öka automationen i skogsbruket kan en säkrare och mindre fysiskt belastande arbetssituation skapas. Samtidigt kan produktiviteten öka i och med att beroendet av operatörens erfarenhet och förmåga att manövrera i terrängen minskar. En ökad automation underlättar också rekrytering av nya maskinoperatörer via sänkt arbetsbelastning och i förlängningen genom möjlighet att övervaka och styra på distans. Med automatisering blir det dessutom lättare att optimera och planera rutter med digitala kartstöd, vilket minskar markpåverkan i känsliga områden och sänker bränsleförbrukningen. Långsiktiga effekter av automatisering är således ökad hållbarhet i skogsbruket och stärkt nyttjande av skogsråvara som alternativ till fossila material. Samtidigt stärks Sveriges roll som världsledande inom terrängmaskinteknologi.

Mål

Målet med det här projektet var att utveckla förutsättningar för att öka automationen i skogsbruket och på så sätt skapa en säkrare och mindre fysiskt belastande arbetssituation för skogsmaskinförare samt ökad produktivitet på systemnivå.

Metod

INLEDANDE WORKSHOP

Projektets lösningar utvecklades och testades hos respektive part som jobbade med de specifika lösningarna. Då flera delar ska integreras i en gemensam lösning arrangerades kontinuerliga arbetsmöten. För att enas om ett arbetssätt och grundramverk gjordes i början av projektet en workshop med syfte att definiera systemkrav, hårdvara och mjukvaruarkitektur. Projektet utgick från en metod som KTH under längre tid jobbat med i automationsprojekt mot fordonsbranschen. Samma metod är väl använd inom robotik runtom i världen och baseras på det öppna robotramverket ROS (Robot Operating System). ROS möjliggör att systemet kan delas upp i noder, delapplikationer, som hämtar och skickar information i ett nätverk.

DEFINIERING AV PARAMETRAR

Projektet definierade vilken information som ska finnas i systemet. Exempel på information är hastighet, styrvinkel, maskinlutning, GPS-position, detekterat hinder, detekterad person m.m.; all information som behövs för att framföra en maskin autonomt. Alla parametrar är väl definierade, vilket öppnar upp för andra forskargrupper att integrera sina lösningar i AUTO2. Flera samarbeten har inletts med externa forskargrupper som använder sig av AUTO2:s ramverk. Det är planerat att de ska kunna testa sina algoritmer för terrängkörning på AUTO2:s infrastruktur och på så vis kunna jämföra olika lösningar mot varandra.

Under hösten 2020 integrerades och utvärderades AUTOdrive (Autonom terrängkörning), AUTOsafety (Säkerhetssystem runt autonoma maskiner) och AUTOremote (Fjärrstyrning av skogsmaskiner) med lyckade resultat. Alla lösningarna utvecklades från den arkitektur som definierades i början av projektet.

GLOBAL OCH LOKAL PLANERING

Systemet testades med en global plan, som är en föreslagen rutt som optimeras utifrån satellitdata, markmodeller och annan tillgänglig information som finns i molntjänster. Global planering utvecklades av UMIT och Skogforsk. Maskinen styrs efter den globala rutten och finjusteras lokalt med en lokal planerare som till största delen utvecklats av KTH. Utöver att följa den föreslagna rutten bygger den lokala planeraren upp terrängen digitalt med hjälp av stereokameror och gör ruttjusteringar optimerade efter maskinens egenskaper. Ovanpå den grundläggande styrningen finns en objektidentifiering utvecklad av LTU, som klassificerar terrängen och markerar ut vad sensorerna ser, såsom sten, stubbe och rishög.

FJÄRRMANÖVRERING FRÅN OPERATÖRSSTATION

I systemet ligger en säkerhetsnod, som utvecklats av Komatsu Forest och utvärderats fristående av Unibap. Den skannar omgivningen efter personer i maskinens riskområde. Om det finns personer i området stoppas den autonoma körningen. Allt detta kan övervakas på distans från en operatörsstation som Skogforsk utvecklat. Från operatörsstationen kan maskinen fjärrmanövreras med hjälp av ett kamerasystem som ger möjlighet att se i stereo med VR-glasögon framåt och längs kranen för att få djupseende och kunna bedöma avståndet.

LAGAR OCH REGLER

Utöver själva automationskörningen och de grundläggande funktionerna för att få det att fungera har projektet jobbat med att påverka policys. Två rapporter publicerade på Skogforsks kunskapsbank beskriver det aktuella regelverket samt vilka hinder i regelverk som finns idag. Projektet har också skickat in förslag till Kommittén för teknologisk innovation & etik (KOMET) som under våren 2020 hade en öppen ingång där organisationer fick möjlighet att berätta om upplevda regelhinder som man stött på i den tekniska utvecklingsprocessen. Kommittén har ett regeringsuppdrag för att jobba med policyutveckling som kan möjliggöra att Sverige blir ledande på användning och utveckling av framtidens teknologier. Projektets bidrag ingår i en förstudie om förarlösa maskiner i terräng och lantbruk.

Resultat och diskussion

TEKNIKEN ANVÄNDS I NYA UTVECKLINGSPROJEKT

Resultatet från projektet har gett upphov till nya utvecklingsprojekt för autonoma system där tekniken kommer att används för att utveckla planteringsrobotar. Även Komatsu Forest och andra aktörer jobbar med att ta lösningarna till kommersialisering och kommer att genomföra tester av varnings- och indikationssystem i anslutning till projektet – dock inte som en del av det. Skogforsk har etablerat samarbete med Ericsson och Telia för att utveckla tjänster för telekommunikation för teleoperation av autonoma fjärrstyrda maskiner.

MÖJLIGHETER OCH HINDER

Det ges stora möjligheter att återanvända teknik från andra branscher som jobbat med automation under längre tid. Mycket av den teknik som utvecklats hos självkörande bilar går att applicera med viss anpassning. Hårdvara, datorkraft och sensorer möter applikationens behov och då kostnaden för kvalitetssäkrad hårdvara som kan lösa uppgifterna pressas och kvalitetssäkras av bilindustrin finns det i en nära framtid konkurrenskraftiga sensorer att tillhandahålla. Branschen har idag stora utmaningar att rekrytera maskinförare och efterfrågan på ökad effektivitet gör att användarna står och väntar på att ny teknik ska bli tillgänglig. I ett första steg bör tekniken förenkla maskinkörningen så att fler maskinförare kan rekryteras och prestera på en bra nivå. Automatiserade vägval och automatiserad körning av maskinerna kan sänka ribban för att framföra maskinerna och jämna ut produktivitetsnivåer mellan olika operatörer som idag varierar med ca 50 procent. Studenter som går ut maskinförarutbildningen på gymnasiet har idag inte heller den skogliga bakgrund som var vanlig för 20 år sedan. Detta gör att förarna under sina första år i produktion måste lägga mycket fokus på att läsa av den skogliga miljön och därmed inte har samma möjlighet att identifiera faror för människor i närmiljön. Nyttan med automatisk detektion och varning för människor i arbetsområdet har därmed även potential att förenkla och höja säkerheten i maskinförararbetet så som det är idag.

Hinder som finns är främst säkerhet som regleras av lagar och regler. Även då skogen kan tyckas vara tom på folk vistas en hel del människor runt maskinerna. Till skillnad från gruv- och anläggningsbranschen som ofta kan jobba på inhägnat område delar skogsmaskinerna område med t.ex. bärplockare, jägare och vandrare. Därför måste tekniken bevisa att en virtuell säkerhetszon kan upprättas med hjälp av sensorer för att kunna ändra lagstiftningen som kräver att maskinen måste ha en förare som i varje ögonblick har kontroll över maskinen.

Ett annat hinder är kommunikationen i skogen. Autonoma och fjärrstyrda maskiner behöver bra radiokommunikation. Därför har projektet utvärderat olika radiolodningar och etablerat ett samarbete med Ericsson för att fortsätta utvärdera möjligheterna med 5G. Det kommer också andra alternativ som kan lösa denna fråga såsom lågt flygande satelliter med LTE-lösningar (LTE = Long Term Evolution).

En teknisk aspekt med terrängnavigering är att den skogliga miljön är utmanande att läsa med sensorer. Dels består terrängen av objekt som kan vara visuellt kompakta samtidigt som de är maskinellt forcerbara, exempelvis gräs och buskar. Samtidigt kan faktiska hinder som gropar och stenar gömma sig i samma till synes forcerbara objekt. Vidare finns kraftiga årliga variationer i hur miljön ser ut ur ett sensorperspektiv och fungerar vid maskinbelastning. Ett sätt att hantera detta är att arbeta i steg där miljöer

och tidpunkter som är mindre komplexa angrips först. Projektet har även noterat framtida radarteknik som kan ge nya möjligheter.

För att utveckla tekniker som kan hantera de variationer som finns i skoglig miljö kan tillgång till bra träningsdata ge bättre möjligheter. De som kommer att kommersialisera tekniken behöver på något sätt hantera den utmaningen och här skulle forskningsinstitut och akademi kunna hjälpa till att utveckla och tillhandahålla träningsdata för persondetektion i skoglig och lantlig miljö samt data på olika typer av terrängmiljöer och trädslag. Det finns dock möjlighet att påskynda utvecklingen innan sådana träningsdata finns tillgängliga genom att använda träningsdata från en virtuell miljö. VR-träningsdata kan på ett enkelt sätt anpassas till ovan nämnda scenarios med variationer i ljus, färg, form, storlek och rörelsemönster.

Skogliga operationer i samband med skörd av virke i Sverige omsätter 11 miljarder och små effektivitetsökningar kan förbättra lönsamheten och konkurrenskraften för träråvara. Samtidigt som vi stärker Sverige som ledane skogstekniskt land.

FÅ LIKNANDE INITIATIV I VÄRLDEN

Då Sverige är världsledande på skogsteknik så finns det inte så många andra initiativ i resten av världen. Det bästa liknande initiativ som projektet känner till drivs av kanadensiska FPInnovations, som är ett privat forskningsinstitut. FPinnovations lanserade ungefär samtidigt som det här projektet en satsning på automation för skogsbruket som går under namnet Forestry 4.0. Projekt AUTO2 har haft halvårsavstämning med Forestry 4.0 för att maximera nyttan för skogsbruket. AUTO2 och projektparterna har till skillnad från det kanadensiska initiativet ett mycket starkare samarbete med maskintillverkare, vilket gör att AUTO2 kan gå snabbare framåt med relevanta lösningar som är närmare implementation. Ett annat initiativ är det svenska forskningsprogrammet Mistra Digital Forest (MDF) som indirekt jobbar med system för att möjliggöra tekniken, men också på en mer grundforskande nivå om hur AI kan tränas i digitala skogar. Flera grundläggande frågor för att möjliggöra tekniken i AUTO2 har lyfts in till MDF. MDF har även en längre tidshorisont och många av aktörerna i AUTO2 är del av MDF, där flera outredda frågor behandlas vidare. Utanför skogen pågår också en automationsresa inom jordbruket, där AUTO2 samarbetar med RISE jordbruk och livsmedel som forskar på autonoma traktorer. I det samarbetet gjordes studiebesök i Bolidens gruva i Garpenberg där projektet fick möjlighet att lära av gruvindustrin och intervjua fjärroperatörer som övervakade och styrde gruvtruckar. Studiebesöket är beskrivet i ett examensarbete.

SEMINARIER OCH PRESSVISNING

Projektet AUTO2 har fungerat som en katalysator för forskning på automation inom skogsbruket. Tre seminarier har arrangerats i projektet. Det första var ett uppstartsseminarium för parter från skogsindustrin, där ca 40 personer deltog under en heldag. Då presenterade parterna bakrundsforskning och omvärldsspaning i angränsande tekniker, vilket gav en bra grund och start för att påbörja arbetet med ökad automation för skogsbruket. Seminarium två pågick under en halvdag där dellösningarna presenterades. Fjärrstyrningslabbet hade då invigts och en fjärrstyrd skogsmaskin visades. Det sista seminariet var slutredovisning för skogsindustrin med 50 deltagare live och redovisningen har sedan funnits tillgänglig som inspelning på Youtube där över 800 visningar genomfördes dagarna efter. Projektet har även haft pressvisning där SVT, SR-Uppland, Land, ATL, m.fl. rapporterat om projektets resultat.

Projektet har också deltagit på externa seminarier och skapat nya samarbeten och möjligheter. Hårdvara och testutrustning som byggts inom projektet är med i Samnordisk Skogsforsknings (SNS) nätverk nordiska testbäddar.

PROJEKTET HAR GENERERAT NYA PROJEKT

Projektkonstellationen har varit intakt under hela projektet. Däremot har vissa samarbeten sträckts och fortsatt in i nya gemensamma projekt. Ett exempel är projektet AUTOplant som sökt och fått beviljat stöd i ett nytt UDI steg två-projekt. Flera av forskningsutförarna KTH, LTU och Skogforsk kommer att fortsätta bygga kompetens inom automation och nyttiggöra delösningarna i en applikation som är lämplig att använda tekniken som utvecklats i AUTO2.

MÅLUPPFYLLELSE

Projektets hade fyra resultatmål och samtliga av dessa har uppfyllts väl:

- **Automatisk detektion av obehöriga inom säkerhetsområde i terräng**. Ett system för detektion av människor har utvecklats och utvärderats. Säkerhetssystemet visar stor potential att kunna detektera personer i arbetsområdet med hög precision.
- **Självlärande system med förflyttning och hinderigenkänning. Rutten ska kunna ges från externt system**. Lösningar för att identifiera typ, position och storlek av relevanta hinder (till exempel stenar, stubbar och stockar) har utvecklats och testats med bra utfall. Dessutom har lösningar för att skatta terrängtopologin utvecklats där experiment indikerar tillräcklig noggrannhet för autonom förflyttning i terräng där marken är väl synlig. Styrsystemarkitekturen kan utökas med återkoppling av sensorinformation så att funktionaliteten löpande kan förbättras, så kallat självlärande. Arkitekturen är även utformad så att rutter kan appliceras på maskinen från en extern källa, till exempel från en operatör eller ett optimeringssystem.
- **Teknisk lösning för fjärrstyrning med likvärdig tidsprestation för lastningsmomentet**. Fjärrstyrningsteknik har utvecklats och implementerats i en fullskalig testanläggning. Resultaten visar att lastning och lossning kan göras med god effektivitet på distans. Projektet har även noterat en god potential för terrängnavigering. Detta möjliggör även för nya typer av maskinkoncept där operatörsutrymmen kan exkluderas.
- **Köra autonomt i terräng med samma medelhastighet (±5%) som dagens terrängmaskiner**. Genom att integrera olika dellösningar i en gemensam styrarkitektur som sedan implementerats på en testplattform (eXtractor Ab:s XT28) har autonom körning i terräng kunnat genomföras. Testerna visar på god precision, även om medelhastigheten ännu är något låg i förhållande till förarstyrda maskiner.

Den goda måluppfyllelsen skapar mycket bra förutsättningar för att även nå resultatmålen i ett kommande steg tre i Vinnovas UDI-program, där det handlar om att arbeta med finjusteringar och därefter inleda kommersialisering av dessa system.

Befintligt säkerhetssystem kommer i det autonoma fallet under steg tre att kunna optimeras för att tillräckligt väl upprätthålla säkerheten runt arbetsmaskinen vid arbete i terräng. Nödvändig teknologi för framdrift har nått en mognadsnivå som gör att autonom framdrift i terräng kan testas i större skala och i relevant miljö. Systemen kommer även kunna optimeras för att minska körskador och reducera CO_2-utsläpp och dessutom kommer dessa system kunna vidareutvecklas för att innefatta fler miljöer såsom transport på väg m.m. Med den flexibla styrarkitekturen kan även systemen vidareutvecklas till att inkludera andra operationer såsom markberedning, plantering, lastning, lossning etc.

Avseende **effektmålen** kan nämnas att projektet redan har demonstrerat att maskiner utan hytt är möjliga. Genom den smarta styrarkitekturen som utvecklats kan framförandet av maskiner i terräng energioptimeras, vilket kommer leda till väsentlig reduktion i CO_2-utsläpp (dessutom kommer säkerligen nya mer miljövänliga drivlinor att finnas tillgängliga på marknaden).

Till följd av fjärrstyrning och automation kommer de arbetsmiljöutmaningar som följer av att sitta i en maskinhytt att upphöra. Arbetsmiljöskador på grund av vibrationer, fallolyckor och fallande objekt kan dessutom elimineras. Operatörerna kan med tekniken som utvecklas välja varifrån maskinen ska styras, t.ex. från en station där operatörer kan styra en eller fler maskiner. Operatörsstationen öppnar upp för ett mer inkluderande arbete där social samvaro och bättre ergonomi möjliggörs varvid operatörerna kan fokusera på att öka kvaliteten och värdet i produktionen av bioråvara. Denna förändring av yrket skogsmaskinoperatör förutspås även ge en större rekryteringsbas och därmed goda möjligheter att öka attraktionskraften och jämställdheten på dessa arbetsplatser. Genom de tester som genomförts inom projektet har det påvisats att operatörer kan fjärrmanövrera maskinen nästan lika effektivt som om de satt i maskinen. Detta tillsammans med de lovande automationsresultaten indikerar att det i framtiden går att producera bioråvara på ett mer hållbart sätt.

KVANTIFIERING AV MÅL

För utveckling av de olika delarna av det externa perceptionssystemet (detektion av människor och hinder i terräng) har olika typer av prestationsmått (till exempel precision och recall) använts för utvärdering. Säkerhetssystemet ställer speciellt höga krav på noggrannhet, medan beslut för vägval kan tillåta lägre noggrannhet. En stor del av utvärderingen har genomförts baserat på förinspelade sensorsignaler där olika objekt taggats för att skapa en så kallad ”ground truth”, det vill säga delar av detta material används för att träna detektorer medan andra delar används för validering. När det gäller fjärrstyrning har framför allt kranhantering bedömts som ett kritiskt moment och studerats experimentellt med förare i en övning. Resultaten visar på likvärdig prestation vid fjärrkörning som körning från hytten, vilket även var målet.

För att lyckas med autonom terrängkörning krävs att flera olika delsystem integreras i en lämplig styrarkitektur. Även här har olika dellösningar först testats separat för att säkerställa att de genererar rätt information, med tillräcklig noggrannhet och tillräcklig hastighet (realtid). Här har batch-simuleringar i ren virtuell miljö använts i tidiga skeden och allt eftersom mognadsgraden för olika algoritmer har ökat har tester även genomförts med korrekt styrhårdvara (HIL-simuleringar). När tillfredsställande resultat uppnåtts med stöd av virtuella tester har slutligen fysiska tester i olika skala genomförts med hjälp av de olika plattformarna tillgängliga i projektet.

Slutsatser

Insikten i mängden data som krävs för att nå en helt autonom maskin har tydliggjorts. Det är svårt att använda samma metoder som fordonsindustrin för att träna neurala nätverk då den mängd data och körtid som genereras från fordon i trafik inte finns i terrängen på samma sätt. Det har gjort att projektet undersökt andra metoder och hittat alternativa vägar där skannade skogar kan byggas upp virtuellt och där maskinlärningen kan träna om och om igen med olika typer av positiva feedbackloopar. Det har i projektet etablerats samarbeten med UMIT datavetenskap på Umeå universitet som forskar på den tekniken, samt planer på samarbeten med Algoryx som är ledande på maskinsimuleringsplattformar främst för att träna traditionella maskinoperatörer att använda nya maskiner. De har identifierat att samma simulatorplattform kan användas för att träna AI.

Detektion av alla personer inom en 90-meters säkerhetszon för skördare är svår att uppnå med hjälp av kombinationen IR-kameror och färgbilder. Fortsatt forskning på ytterligare metoder måste till för att säkerställa hela säkerhetszonen. Därför är ett första steg att implementera detektions- och varningssystemet som ett beslutsstöd i skördaren. För skotare och markberedare däremot finns goda möjligheter att stödja autonomt arbete. Detta på grund av dessa maskiners kortare säkerhetszon samt att det ofta är färre visuella hinder som blockerar kamerornas detektionsområde vid skotning och markberedning jämfört med huggning.

Referenser

Wahlberg, D., Svensson, G., Assarsson, P., Gelin, O. & Lundmark, A. 2020. Regelverk för terrängtransporter kopplat till automation. Arbetsrapport 1062 Skogforsk.

Slutrapport för AP1 Systemanalyser i projektet Automation för autonom terrängmobilitet (AUTO2)

Ola Lindroos, Petrus Jönsson.

Syftet med arbetet i AP 1 var att ta fram ramar för hur skogsarbete kommer att utföras i Sverige i framtiden, baserat på förväntad utveckling inom teknik, it, skogsbaserade produkter, klimat och regelverk. Enligt planeringen vid ansökningsarbetet så skulle arbetet inom AP1 resultera i två rapporter, en om framtidens behov och tillgång på data för skogsarbete och en om framtidens maskinsystem för skogsarbete.
Detta har införlivats med råge, och aktiviteter och resultat redovisas nedan, med komplett lista över leverabler (publikationer) i slutet.

1. Bokkapitel och utmaningar, behov och utgångsläge (state-of-the-art)

I bokkapitlet Advances in using robots in forestry operations (som ingår i boken Robotics and automation for improving agriculture) sammanställdes och beskrevs utmaningar, behov och nuläge vad gäller automation av skogsarbete. Några av slutsatserna var att den skogsmiljön är extremt utmanande för automationsutveckling, och faktiskt i linje med utmaningar inom rymd- och militärforskningen som har liknande utmaningar. Finansieringen för de olika forskningsfälten är dock väldigt olika. För att skogsindustrin ska ha incitament att gå in och finansiera krävs det att man kan visa på lönsamhet jämfört med nuvarande teknik.
Det poängteras också att trots att det återstår ett bra tag innan vi har en nivå av helt automatiserade maskiner i det svenska skogsbruket, så är vägen dit är minst lika relevant och intressant. Framsteg i metoder för att samla in, hantera och använda data är viktiga steg på vägen till smarta maskiner och så småningom automatisering. Vägen dit kommer att gynna maskinförare genom att förbättra arbetsmetoder och underlätta arbetsutförandet.

2. Rapport om framtidens behov och tillgång på data för skogsarbete

Introduktion till StanForD2010

StanForD 2010 är skogsbrukets standard för hantering av data till och från skogsmaskiner. Standarden är global och används av alla större tillverkare av skogsmaskiner för avverkning enligt kortvirkesmetoden.
StanForD 2010 är den uppdaterade versionen av StanForD-standarden som har funnits sedan slutet av 1980-talet.
De största skillnaderna mellan StanForD 2010 och tidigare version är:
• StanForD 2010 inför ett koncept för att ange identiteter för maskiner, avverkningsobjekt, stammar, stockar m.m. med Keys och UserIds. En Key sätts automatiskt i maskinen (vanligen ett löpnummer) och ett UserId anges av t.ex. avverkningsorganisationen. Systemet gör det teoretiskt möjligt att särhålla varje stock som producerats globalt samt ger spårbarhet för varje modifiering som görs av maskinens inställningar.

• Det nya systemet för identiteter lägger även grunden för en flexibel styrning av avverkningen, dvs. förändringar av vilka produkter som apteras och hur de ska apteras (längd, pris etc.) blir möjliga att genomföra vid vilken tidpunkt som helst, även under pågående avverkning. StanForD 2010 introducerar även ett separat meddelande för styrning av skotare, vilket inte fanns i den tidigare versionen.
• Produktionsrapportering från skördare sker per individuellt producerad stock, vilket ger stora möjligheter att presentera och analysera produktionen utifrån specifika önskemål hos t.ex. avverkningsorganisation och kund. Strukturen öppnar även för en framtida rapportering av varje stock on-line. Den detaljerade skördarinformationen fungerar också som underlag för prognoser för skogsbränsleuttag och beräkning av produktegenskaper som densitet, kärnvedsinnehåll och kviststruktur. StanForD 2010 introducerar även ett meddelande för återrapportering av geografisk information.
• Driftsuppföljningen sker genom att varje individuellt arbetsmoment (upparbetning, reparation, underhåll, rast, stillestånd etc.) registreras för förare och maskin separat. Systemet är oberoende av vilket avverkningsobjekt maskinen befinner sig på för tillfället. Detta gör det möjligt att jämföra olika tidsperioder på ett enkelt sätt och därmed kunna analysera olika maskinsystem, arbetslag etc.
• Formatet i StanForD 2010 är XML, ett öppet, generellt och väletablerat format, vilket både underlättar för systemutvecklarna och minskar behovet av konverteringar till andra format när data enligt StanForD 2010 ska hanteras i olika datasystem. StanForD 2010 strukturerar data i ett antal meddelanden för styrning, produktionsrapportering, kvalitetssäkring och driftsuppföljning.

StanForD och fjärrstyrning

StanForD standarden är primärt uppbyggd för att uppfylla krav på informationsutbyte mellan skogsmaskinen och en extern part (primärt ägaren eller uppdragsgivare). Om man utgår från att fjärrstyrninsgmodulen och maskinen levereras av samma tillverkare bör det mesta av informationsutbytet ske baserat på proprietärt format snarare än StanForD. Detta eftersom krav på detaljeringsgrad, snabbhet och säkerhet är väldigt mycket högre än vad StanForD är konstruerad för idag.
Om man dock antar att skotare och skördare är separata enheter som styrs av olika fjärrstyrningsmoduler så kan mycket väl StanForD standarden vara relevant för informationsöverföring från skördare till skotare. De mest relevanta områdena handlar främst om hur stickvägsnätet är placerat och dess kvalitet (bärighet) samt var de avverkade volymerna är lokaliserade och sammansatta (volym/längd diameter per produkt). Dessutom kan man med hjälp av produktionsfilen göra en automatiserad gallringsuppföljning som på beräkningsytenivå (0,7-2.0 ha ytor) beskriver hur skogen ser ut efter gallring med hjälp av vissa nyckeltal.
Den standardiserade skotarinstruktionen kan också vara högst relevant då den kan ange exakt var en viss produkt skall lagras vid bilväg. Om dessa koordinater skall vara relevant krävs ett väl genomfört planeringsarbete för avverkning. Att, som idag ofta sker, sätta

avläggskoordinater utan att fysiskt ha besökt platsen gör dom nog mer eller mindre oanvändbara ur ett fjärrstyrningsperspektiv.
Vad gäller grundläggande GIS information såsom objektsgränser, planerad hänsyn, överträdelselarm m.m. så bör detta i stor utsträckning kunna hanteras med hjälp av StanForDs geografiska avverkningsdirektiv alternativt med hjälp av Forestand. Möjlighet att gå mellan dessa standarder har testats och verifierats.
Tittar man närmare på skördarens produktionsdata så ger den redan idag:

- Loggspår med koordinater och ev. tider som kan användas för att beskriva stickvägarnas placering.
- Koordinater för varje stam (normalt basmaskinens position) som ger en ungefärlig position på virket.
- Detaljerade mätdata om varje stock (längd, diameter, volym, produkt m.m.)
- Möjlighet att per beräkningsyta beskriva kvarvarande skog med nyckeltal (grundyta, stamantal, trädslagsblandning m.m.)

Påtagliga förbättringsmöjligheter till en utökning och förbättring av produktionsdata från skördaren skulle kunna vara att:

- Lägga till möjligheten att registrera koordinat för varje stock vid kapningstidpunkten. Den bör kunna beräknas med god tillförlitlighet i skördaren baserat på maskinens position och kunskap om aggregatets position.
- Lagring av data om t.ex. skjuvning (se finsk Efforte rapport) kopplat till loggspårets koordinater bör kunna ge information om markens faktiska bärighet efter avverkningarbetet.

Övriga "öppna" data-källor

Vad gäller enbart markens höjd (terrängmodell) existerar troligen vedertagna format och metoder för att kommunicera dessa data. Men när det gäller att kommunicera komplexa data som t.ex. beskriver grundstruktur, ytstruktur, lutning, bärighet, mark och träd så finns det nog mycket begränsad erfarenheter.
Om de fjärrstyrda maskinerna är utrustade med markbunden laserskannrar (TLS/Lidar) krävs säkerligen en djupare analys av lämpligt format och innehåll för att vidarebefordra informationen till andra aktörer än aktuell kombination av maskin och fjärrstyrningsmodul.

Fjärrstyrning av arbetsmaskiner har på senare tid kommit att användas inom flera olika branscher. I skogsbruket har HIAB:s system HiVision gjort ett avtryck på vägtransportsidan. Där använder chauffören för timmerbilen VR-glasögon för att styra lastbilens kran inifrån lastbilshytten. Videoströmmen kommer från ett kamerasystem placerat på kranen och skickas till VR-glasögonen via kabel. För föraren innebär det en bättre arbetsmiljö och att riskfyllda arbetsmoment som att klättra upp till kranhytten minskar. HiVision-systemet är ett exempel på att avancerat kranarbete genom fjärrstyrning är möjligt att genomföra.
Den trådlösa kommunikationen ska klara att skicka videosignaler till operatören och kontrollsignaler tillbaka till maskinen. Det är viktigt att bilden som operatören ser är av hög kvalitet och med kort fördröjning. Likaså måste styrsignalerna nå maskinen på ett pålitligt sätt och med minimal

fördröjning. Utmaningarna för att åstadkomma detta är stora då avstånden mellan en operatörsstation och maskinen kommer att bli långa samt att det ofta inte är fri sikt mellan maskinen och den tänkta operatörsstationen.
Det pågår en utveckling i skogsbruket med allt mer avancerade förarstöd och delautomation. Inom AUTO2-projektet utvecklas funktioner för att skogsmaskiner automatiskt ska kunna köra längs med en stickväg. Maskinerna ska också kunna detektera om människor kommer in i arbetsområdet för att undvika att någon utsätts för fara.
Det är sannolikt att människor också framöver kommer att vara direkt inblandade i delar av maskinstyrningen. Fjärrstyrning kan användas som ett medel för att låta automatiseringen gå stegvis, där föraren fortfarande kan göra de moment som är mest komplicerade att automatisera. Fjärrstyrningen ger möjlighet att samtidigt utnyttja många viktiga fördelar med att föraren frigörs från maskinen, som bättre arbetsmiljö, att hytten kan elimineras och att en förare kan styra flera maskiner.
Nedan listas några forskningsfrågor som bör studeras mer i detalj för att säkerställa att korrekt/tillräcklig datainformation sparas och delas. Dessa kan både vara tester av tekniska system och utvärderingar av olika aspekter i interaktionen mellan operatören och maskinen.

- Information från video och kontrollsignaler lagras för att efterföljande skogsbruksåtgärder.
- Maskininformation som t.ex maskinlutning, vridmoment på drivlina kopplat till koordinater.
- Behov av nya stödsystem som hanteras av operatörer i dagens maskiner.
- Vilken ytterligare delautomation av maskinarbetet är viktig för att fjärrstyrningen/Automation ska fungera bättre.

3. Mastersarbeten

Det har genomförts totalt fyra mastersarbeten som på olika sätt belyser olika aspekter av hur skogsarbete kan komma att utföras i framtiden beroende på utveckling inom teknik och it, skogsbaserade produkter etc. Samtliga mastersarbeten har genomförts av jägmästarstudenter. De två arbetena av Anton Henriksson och Ida Kihlgren belyser möjligheter och potential till att implementera ett alternativt sätt att skörda träd i Sverige. Nuvarande kortvirkesmetod går ut på att träden apteras till stockar direkt vid avverkningen. Detta har många fördelar, men i en framtid kan det finnas anledning att senarelägga beslut om uppdelning och särhållning av trädstammens olika delar. Henrikssons arbete visar att för en omfattande andel (48-83%) av sågtimmervolymen skulle kunna apteras i längre stockar än i dagsläget, och han visade också på hur andelen varierade över landet. Kihlgren visade på att om apteringsbeslutet senarelades och baserades på information från skanning i datortomograf så skulle både virkesvärdet och volymen sågad vara kunna öka med ca 9-17%.
Utifrån dessa potentialer med att använda alternativa sätt att skörda träd jämförde Aron Långberg dagens kortvirkessystem med det så kallade ”helstamssystemet” i teoretiska systemanalyser, och hur deras respektive konkurrenskraft påverkades då träden apteras i ett ökat antal sortiment. Jämförelserna omfattade hela försörjningskedjan, från skog till industri, och också effekterna av ökad automationsgrad i maskinsystemen. Resultatet visade att vid modellens grundscenario hade nuvarande system (kortvirkessystemet) lägst kostnader om 18 eller färre sortiment sorteras ut. Det innebär att det finns utrymmer för utsortering av betydligt fler sortiment det antal som tas ut i dagsläget innan helstamssystemet blir mer lönsamt. Automationsscenariona ledde till minskade kostnader, men påverkade systemen ungefär lika

mycket. Detta leder till att om systemen har samma typ och nivå av automation så påverkades inte förhållandet i kostnadseffektivitet mellan dem nämnvärt.
Det fjärde masterarbetet belyste skogsägares syn på autonoma skogsmaskiner. Baserat på drygt 300 enkätsvar visar Hanna Kankainen att skogsägare kände sig nyfikna oavsett inställning till förarlösa skogsmaskiner. Skogsägarna såg ekologiska, ekonomiska och sociala möjligheter med utvecklingen men att det samtidigt fanns en oro över att utvecklingen inte skulle resultera i positiva utfall för allt och alla. Nästan samtliga trodde att utvecklingen skulle ha en uteslutande ekonomisk agenda. Slutledningen studien var att hänsyn behöver tas till social hållbarhet om samtliga av ekologiskt, ekonomiskt och socialt betingade parametrar ska beaktas i automationsutvecklingen.

4. Doktorandstudie

Denna studie är nära kopplad till AP 4 AutoRemote, i form av att ge underlag kring hur de tekniska framstegen i fjärrstyrning ska tas till vara när de implementeras.
I en av sina studier fokuserar doktoranden Mikael Lundbäck på hur framtidens (del)automatiserade maskinarbete bör organiseras. Studien fokuserar på den ekonomiska potentialen med fjärrstyrning av skotare, under antagandet att delautonoma skotare kan köra själva men behöver fjärrstyras för att lastas och lastas av. I studien simulerades skotning av 1100 bestånd (1,6 miljoner m^3) med 10 skotare, som fjärrstyrdes av upp till 10 operatörer. Simuleringen gjordes på enskilda lass, och belyste bland annat den väntetid som uppstod när förare inte fanns tillgänglig när skotare behövde fjärrstyrning eller när ingen skotare behövde fjärrstyras. De preliminära resultaten visar att under de studerade förutsättningarna så är det mest kostnadseffektivt om 7 operatörer tillsammans fjärrstyrde 10 skotare. Den kombinationen var knappt 8% billigare än om 10 operatörer nyttjades (dvs i princip som när skotarna är bemannade).
De preliminära resultaten presenterades på den vetenskapliga konferensen NB-NORD 2020 i Helsingør den 22-24 September 2020; Mikael Lundbäck, Economic potential of tele-extraction of roundwood in the Nordic CTL system. https://nordicforestresearch.org/nb-nord/
Studien kommer att presenteras som en vetenskaplig artikel, och är för närvarande i manusform (Lundbäck mfl. (manus)). Doktoranden är föräldraledig, men kommer att färdigställa och skicka in manuset till en vetenskaplig tidskrift under 2021.

5. Enkät och workshop om skogssektorns förväntningar

Automation är ett koncept som har potential att förändra skogsbruket radikalt, men förändringarna är inte enkla och beslut kring investeringar inom automation måste vara välgrundade för att minska risken för att den planerade automationen får oväntade och negativa konsekvenser. Vad personer inom skogsbranschen tror och tänker om en framtid med automation är därför intressanta. Syftet med den här studien är att sammanställa de drivkrafter, förhoppningar och prioriteringar som ligger bakom svenskt skogsbruks framtida automationssatsningar. En webbaserad enkätstudie genomfördes, med en efterföljande digital workshop för fördjupade diskussioner. Företrädare för entreprenörer, skogsbolag,

maskintillverkare och forskare deltog, och totalt besvarade 64 personer enkäten medan 26 personer deltog i workshopen.
I princip alla deltagare ansåg att framtidens maskinsystem bör vara mer automatiserade. De flesta trodde dock inte att framtidens skogsbruk kommer att vara helt autonomt, där forskare och maskintillverkare hade stört tilltro till automationsmöjligheterna. Merparten trodde att det nuvarande sättet att skörda träd (kortvirkessystemet) kommer att vara kvar, men oavsett inställning så ansåg man att det är viktigt att fortsatt utforska och utvärdera alternativen.
Studien visar att det finns stor variation i uppfattningar om prioriteringar, utmaningar och behov. Samtidigt visar det på ett stort behov av samsyn för att orka med utvecklingen. Detta talar för vikten av att hitta former för fortsatt automationssamverkan mellan forskning, brukare, ägare (skogsbolag), kunder (skogsägare, industrier, konsumenter), maskintillverkare samt andra näringar och kompetenser (tekniskt kunniga)
Studien är sammanställd som en intern projektrapport (Anerud mfl. 2020), och planeras att också presenteras som en vetenskaplig artikel.

6. Publikationer från AP1 (i alfabetisk ordning)

- Anerud, E., Häggström, C. & Lindroos, O. 2020. Vad tror skogsbranschen om framtida automation? Internrapport Auto2.
- Henriksson, Anton 2019. Längre stocklängder i svenskt skogsbruk - potential och förutsättningar. Rapport från Institutionen för skogens biomaterial och teknologi, 2019:7. Sveriges lantbruksuniversitet.
- Kihlgren, Ida 2020. Optimerad aptering av sågtimmer efter skanning av trädstammar i datortomograf. Rapport från Institutionen för skogens biomaterial och teknologi, 2020:11. Sveriges lantbruksuniversitet..
- Kankainen, Hanna 2019. Förarlösa skogsmaskiner ur ett socialt hållbarhetsperspektiv – Nutida uppfattningar om ett framtida tillstånd. Rapport från Institutionen för skogens biomaterial och teknologi, 2019:10. Sveriges lantbruksuniversitet.
- Lundbäck, M., Häggström, C., Fjeld, T. & Nordfjell,T. (manus). Economic potential of tele-extraction of roundwood in the Nordic CTL system. Manus till vetenskaplig artikel, som är under färdigställande
- Långberg, Aron 2020. Modellering av helstamssystemets teoretiska potential i Sverige vid uttag av fler sortiment : kan automation påverka systemets potential? Rapport från Institutionen för skogens biomaterial och teknologi, 2020:13. Sveriges lantbruksuniversitet.

Slutrapport för AP2 AUTOSafety i projektet Automation för autonom terrängmobilitet (AUTO2)

Carola Häggström, Peter Assarsson

Behovet av säkerhetssystem för persondetektion i kombination med ett varningssystem ökar i takt med att kraven på produktivitet och ständig produktion ökar. Studenter som går ut maskinförarutbildningen på gymnasiet har idag inte den skogliga bakgrund som var vanlig för 20 år sedan. Detta gör att förarna under deras första år i produktion måste lägga mycket av sin fokus på att läsa av den skogliga miljön och därmed inte har samma möjlighet att identifiera faror för människor i närmiljön, dessa kognitiva processer är starkt kopplat till fenomen som change blindness och cognitive overload. Syftet med AutoSafety var att hjälpa föraren att upprätthålla en säkerhetszon runt maskinen utan att använda sig av mekaniska hinder, t.ex. inhägnad, och därmed minska den kognitiva belastningen och riskerna kopplade till att inte uppmärksamma förändringar utanför den huvudsakliga arbetsuppgiften (change blindness). Kraven på en operatör i en skogsmaskin idag är att ingen person får befinna sig i säkerhetszonen under aktivt arbete. Detta krav kommer från dels maskinens arbete som lyfter och jobbar med fallande träd och de verktygen som behandlar träden i skogen.

AutoSafety ska automatiskt informera obehörig personal och föraren om intrånget inom för var maskin uppsatt säkerhetsområde genom ljud- och ljussignaler. Detta arbete var tänkt att genomföras i två steg 1) framtagande av AI för detektion av människor i säkerhetsområdet, och 2) varningssystem som uppmärksammar faran. Persondetektion i färgbilder i kombination med IR har uppvisat lovande resultat inom ett arbetsområde. Utvärdering av ett indikationssystem för både operatören och personerna i omgivningen blev tyvärr inte genomfört på grund av utebliven leverans av kritiska delkomponenter i kombination med svårigheter att få tillgång till testpersoner under covid-restriktionerna. Detta kommer dock genomföras i anslutningen till projektet – dock inte som del av det.

AutoSafety kan tillämpas på alla större terrängarbetsmaskiner, som skotare och skördare men har även potential inom andra branscher, som gruv- och anläggningsmaskiner.

1. Detektion av människor

Det initiala arbetet med effektlogiken bestod i att definiera arbetsområdet, vilket för skotaren är 20 m och för skördare 90m. Resultatet kan appliceras på även på andra maskiner som befinner sig i skogen, men som har kortare och inte lika tydligt definierade arbetsområden - så som såsom markberedning och plantering. Därefter utvärderades prestandan hos ett par djupinlärningsalgoritmer för detektering av människor i skogsmiljö för att undersöka hur väl säkerhetsområdet kring skogsmaskiner kan upprätthållas utan närvaro av en maskinoperatör.

I syfte att identifiera människor inom skogsmaskinförarens arbetsområde så har persondetektion med metoderna Faster R-CNN ResNet[i] (101) samt YOLOv3[ii] testats, vilket gett lovande resultat och förslag till vidare utveckling. Båda algoritmer som testats är dokumenterat högpresterande detekteringsalgoritmer, vilka ger möjlighet att i realtid detektera objekt i videoströmmar med bra detekteringsprestanda. Resnet är en något långsammare

algoritm men har dokumenterat mycket bra detekteringsprestanda. De neurala nätverken är alla tränade på publika bild-databaser, med personer som typiskt sett inte vistas i skogliga miljöer. Ett av delmålen har därför varit att försöka fastställa om publika bild-databaser trots avsaknad av skogsmiljöer kan användas ändamålet.
Testerna i skoglig miljö har genomförts på data från traditionella kameror med bildsensorer känsliga för synligt ljus (färgbilder) samt kameror med termiska sensorer (IR). Som mått används andelen verkliga objekt som upptäcks, samt andelen upptäckta objekt som motsvarar verkliga objekt. Enkelt uttryckt så mäts hur stor del av andelen människor som upptäcks av algoritmen som faktiskt var en verklig människa, och hur många verkliga människor algoritmerna missade. Det vi kunna observera är att prestandan hos algoritmerna för detektering av människor i urbana miljöer, som de typiskt sett är tränade på, inte skiljer sig avsevärt från den skogliga miljön som vi utvärderat dem i, under förutsättning att det finns en kontrast mellan de objekt som ska identifieras och bakgrunden. Utöver denna observation har Unibap gjort ett försök med ett dataset från skogsmiljö som lagts till i träning till urban miljö utan nämnvärd förbättring. Man kan dra slutsatsen att bakgrundsmiljön inte är kritisk för prestandan så länge träningsdata är tillräckligt omfattande och vidare också att detekteringen därför bör fungera under olika årstider och i olika vegetationer.
Det finns problemområden för detektering med vanliga kameror i synligt ljus, varav ett är kamouflerande kläder i skoglig miljö. Därför har vi också utvärderat detektering med termiska (IR) sensorer som, till skillnad från en vanlig kamerasensor för synligt ljus, inte är beroende på ljusförhållanden eller färg på kläderna. Nackdelen är att det inte finns lika många publika databaser med träningsdata, har lägre upplösning och betingar ett högre pris. Vi har kunnat fastslå att detektering med IR kamera genererar ett mera konsistent resultat, som förväntat, men att vanliga sensorer har bättre prestanda i optimala förhållanden. Resultaten tyder på att en komplett lösning för att detektera människor i arbetsområdet kräver båda typer av sensorer för tillfredställande prestanda. Kravet på detektion i realtid i kombination med att högre bildupplösning ger bättre resultat, ställer prestandakrav på hårdvaran.

Studier behövs dock för att kunna göra en mera heltäckande analys av prestandan i mer varierande skogliga miljöer. Resultaten kan förbättras genom att träna metoder på fler bilder, och bilder mer typiska för tillämpningen. För säker verifiering av resultaten behöver därför en stor bildbank upprättas, som ger en fullständig representation av förhållandena under vilka systemet ska användas (se Steg 3). Kravet på 90m detektion av person inom säkerhetszonen för skördare är också svårt att uppfylla med hjälp av kameror, ytterligare metoder och sensorer måste till innan skördarens säkerhetszon kan säkerställas.

Komatsu Forest har även implementerat ett prototypsystem för insamling och övervakning av flera simultana videoströmmar av både IR och traditionell typ som därmed kan täcka upp en stor del av arbetsområdet. Detta system är inte beroende av en specifik detekteringsalgoritm utan kan uppdateras närhelst bättre metoder utvecklas. Objektdetektering är ett område med snabb teknisk utveckling och sedan studien startades har det kommit flera nya metoder och förbättringar av redan existerande.

Detta identifieringssystem är essentiellt för att kunna skapa framtida autonoma fordon med bättre ekonomisk tillväxt i branschen. Identifieringssystemet möjliggör en framtid då vi kan flytta operatören till en bättre miljö med mindre vibrationer samt möjlighet för personer med olika fysiska funktionshinder att arbeta som skogsmaskinförare. Identifieringssystemet sätter samtidigt grunden för en bättre arbetsmiljö för skogsmaskinföraren så som arbetet ser ut idag,

med minskad negativ stress genom att stödja arbetet med identifiering av människor inom arbetsområdet.

2. Varningssystem

En försöksplan med tester tillsammans med användare inomhus och utomhus i olika ljusförhållanden har tagits fram för att utvärdera ett indikationssystem (varningssystem) för både operatören och personerna i omgivningen. Försöksplanen innehåller:

- Mock-up tester med maskinförare om vad som behövs för att påkalla förarens uppmärksamhet i rätt tidpunkt och i rätt riktning.
- Utvärdering hur personer i säkerhetszonen upplever tänkta larm system och vad som behövs för att påkalla deras uppmärksamhet i rätt riktning.

Tyvärr kunde dessa tester inte genomföras på grund av utebliven leverans av kritiska delkomponenter samt behovet av att använda försöksdeltagare under gällande restriktioner kring resande och distansering. Studien kommer dock genomföras i anslutningen till projektet, dock inte som del av det.

3. Generella lärdomar och misslyckandeåtervinning

Integrations-jobbet mot övriga delar i Auto2 som försvårades av att inte ha gemensamma aktiviteter pga COVID, precis i fel fas i projektet.

ROS är ett bra verktyg då det delar upp jobbet i olika modul så att olika delar inom ett projekt an arbeta samtidigt mot samma mål. Användandet av ROS har underlättat väldigt mycket i arbetet trots att många av projektdeltagarna aldrig använt systemet förut.

4. Steg 3 – Fortsatt utveckling

Till följd av den goda resultatmåluppfyllelsen i detta arbetspaket ges mycket goda förutsättningar att även nå resultatmålen i steg 3. Genom detta “Proof of Concept” som genomförts avseende detektion av personer har förbättringsområden identifierats varpå ett steg 3-projekt kan arbeta med finjusteringar och därefter inleda kommersialisering av dessa system. Nya säkerhetssystem kommer i det autonoma fallet under steg 3 att kunna optimeras för att tillräckligt väl upprätthålla säkerheten runt arbetsmaskinen vid arbete i terräng. Befintligt säkerhetssystem kommer kunna underlätta för operatören och ta bort delar av stressen att vara maskinförare då det hjälper föraren att detektera personer i omgivningen av maskin.

I steg 3 behöver en bättre bilddatabas tas fram. Eftersom detta är ett arbetsintensivt moment så finns stor potential i att samtidigt arbeta med en VR-bilddatabas. Detta tar inte bort behovet av riktiga bilder från riktiga miljöer men tillåter snabbare framsteg med mindre bilddata. Träning av AI med hjälp av virtuell verklighet (VR) medger att miljöer kan byggas upp på ett mycket realistiskt sätt och ”snabba på” inlärningen eftersom VR miljön mycket enklare kan anpassas till olika förhållanden. Steg 2 har identifierat behov av bilddata för träning under följande förhållanden:

- Olika ljusförhållanden som motsvarar dagsljus, skymning, direkt motljus, strålkastarljus, etcetera
- Olika nivåer av dimma

- Olika typer av nederbörd i form av regn, snö, hagel, etcetera
- Olika poser och kroppstorlekan, samt olika kläder som personerna bär
- Olika typer av trädslag och terräng som finns förgrund och bakgrund.

Under steg 3 blir ett viktigt steg att genomföra tester med maskinförare om hur dessa upplever varningssystemet under arbete.

---

[i] He, Kaiming, et al. "Deep residual learning for image recognition." *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2016.

[ii] Redmon, Joseph, et al. "You only look once: Unified, real-time object detection." *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2016.

Slutrapport för AP3 AUTODrive i projektet Automation för autonom terrängmobilitet (AUTO2)

Björn Möller, Magnus Karlberg, Gustav Sten, Håkan Lideskog, Eddie Wadbro

1. Inledning

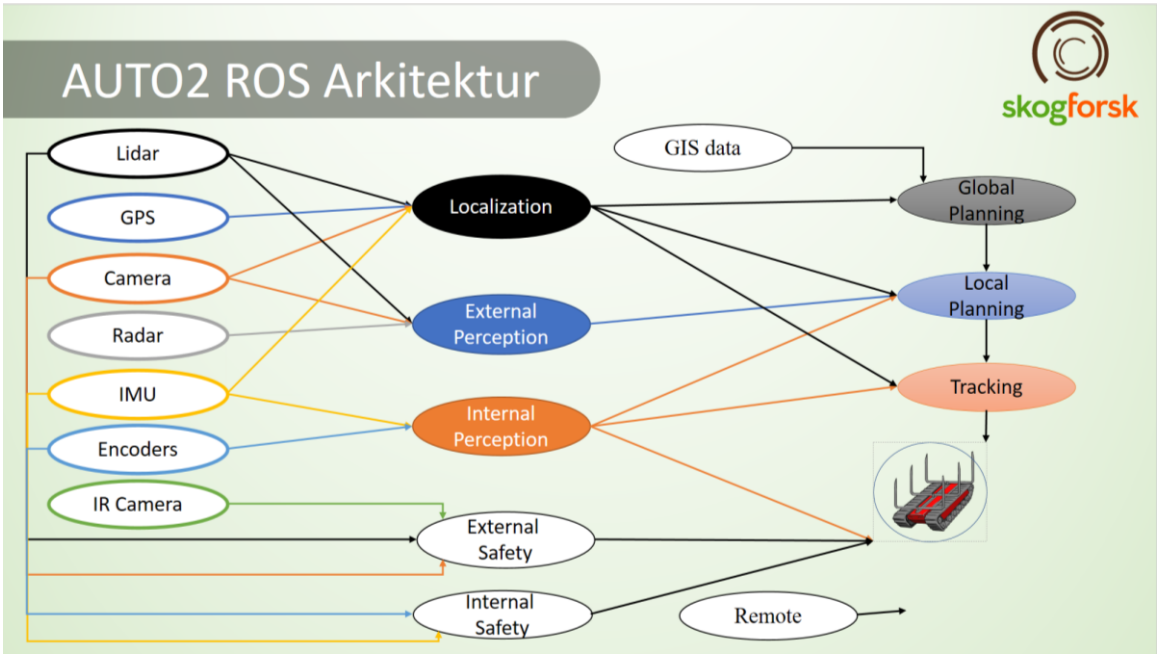
AP3 Autodrive har kopplingar till alla AP i Auto 2. Denna rapport förklarar i första hand arbetet relaterat till autonom körning i skogsmiljö. Mer ingående information är ibland nödvändig och då hänvisas till andra AP:s rapporter eller bilagor. För att få en övergripande förståelse för arbetet så är rapporten disponerad enligt följande:

- Arkitektur
- Sensormodul
- Global terrängplanering
- Lokal terrängplanering
- Objektdetektion.

Återkoppling till de olika milestones (M1 – M4) är inkluderade i dessa sektioner.

2. Arkitektur

För att arbetet ska kunna fungera mellan de olika arbetspaketen så krävs en genomarbetat arkitektur. Valet inom projektet var att använda en ROS (Robot Operating System) arkitektur. Valet föll sig naturligt då en liknande arkitektur redan använts inom ett annat forskningsprojekt på KTH kallat AutoDrive [1]. ROS är ”open source” och kan nästan sägas blivit en standard inom forskningsprojekt som innefattar styrning av mekaniska komponenter med en större komplexitet. Den övergripande arkitekturen för Auto2 ses i figur 1 nedan.

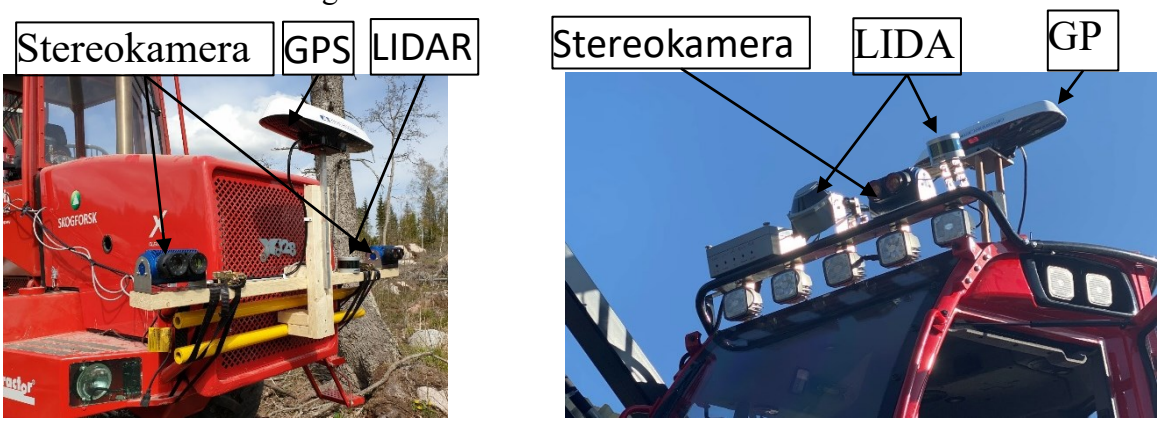


Figur 1. Auto2 arkitektur baserat på ROS.

Till höger i figur 1 så är flödet vertikalt från Global planering, lokal planering, tracking och sen implementering på maskinen. Till vänster ser man alla sensorer som förser systemet med nödvändig extern och intern perception. All data är tillgänglig för alla ”noder” i systemet genom att noderna frågar efter datan genom att prenumerera på informationen (subscribe). Längst ner i figuren så är safetynoden. Den är separerad från övriga för att säkerställa säkerheten. Detta kan vara att en människa infinner sig inom säkerhetsområdet vilket gör att maskinen stoppas (läs mer inom AP2). Systemets modularitet möjliggör att noder kan ökas eller minskas efter behov. Systemet kan även hantera olika programmeringsspråk.

3. Sensormodul

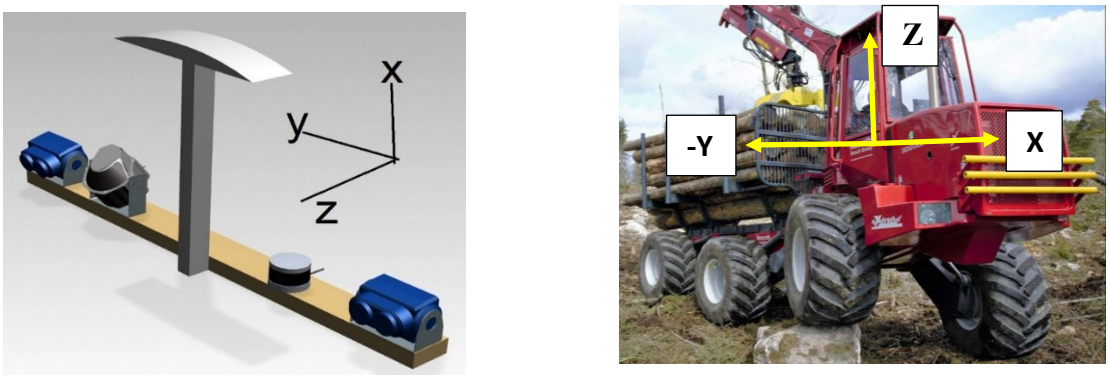
För att kunna ta de beslut som krävs för autonomkörning behövs det sensorer som tar in information från omgivningen. För att kunna välja dessa sensorer måste man först undersöka vilken information som är viktig för att kunna göra bra beslut. Detta arbete har delats mellan AP2 och AP3 då båda använder sig av denna data. Sensormodulen som framtagits inom Auto2 är visualiserad i figur 2 nedan.



Figur 2. Sensormodul monterad på XT28:an (till vänster) och en Komatsu skördare (till höger).

Sensormodulen består av följande komponenter: Stereokamera, [Unibap.com], ZED2 [2] ; LIDAR, Velodyne VLP-16 [3]; GPS, U-blox [4]; IMU (inkl i kamera och på maskinen); IR kamera (ej med på bild, mer i AP2).

Då sensormodulen är en experimentell uppställning så har flera varianter och kombinationer undersökts. Som synes i figur 2 så har de 2 olika maskinerna olika antal LIDARs och kameror. Olika varianter av stereokameror har även använts under projektets gång men med liknande utdata. När sensormodulen väl monteras upp på maskinen så måste sensormodulens koordinatsystem relateras till maskinens koordinatsystem. Detta för att säkerställa att avläst data representeras rätt relativt maskinen (se figur 3).



Figur 3. Sensormodulens koordinatsystem till vänster och maskinens till höger.

4. Global terrängplanering

Den globala planeringen syftar till att ta fram en optimal arbetsplan, som givet information, exempelvis i form av kartdata och topologiskattning. I ett första steg utför en avverkningsoptimering. Skördaren utför därefter sitt arbete (avverkning eller gallring) givet den optimerade planen. I samband med att skördaren arbetar är den direkta lokala arbetsplaneraren aktiv och maskinens sensorer hämtar in/skapar ytterligare data (markuppskattning samt skannad data). Om situationen är sådan att den optimerade planen inte kan följas (ny information har uppkommit) och den lokala planeraren inte kan göra en tillfredställande justering av denna plan, så skickas denna nya data tillbaka till den globala planeraren som genom att ta in denna data samt det redan utförda arbetet skapar en uppdaterad avverkningsplan för resterande arbete. I ett andra steg av för den globala planeraren optimeras skotarens arbete. Datan som används i detta fall är del den ursprungliga informationen samt den data som samlats in av skördaren under avverkningen. Skotaren utför därefter sitt arbete givet den optimerade planen. Även i detta fall är en lokal planerare aktiv och kan göra justeringar till planen, maskinens sensorer samlar in ytterligare information samt det finns möjlighet att skicka denna information till den globala planeraren för att erhålla en uppdaterad plan för resterande arbete.

Genomförandet av arbetet gällande globalplaneraren gjordes i samarbete med forskare på SLU samt diskuterades med övriga medlemmar i AUTO Drive. Målet för den första studien var att skapa en matematisk modell som tog hänsyn till relevant tillgänglig data. Det finns mycket data, som exempelvis kartdata och topologiskattning, tillgänglig finns det osäkerheter i denna. Så för att minimera riskerna utarbetade vi en teori för att ta hänsyn till osäkerheter i data i samband med utformningen av stickvägsnätverket. Den avslutande studien betraktade en av den tänkta globalplanerarens huvuduppgifter: att utföra global planering för en skotare i ett givet stickvägsnätverk.

Inom AUTO2 har tre studier utförts gällande den globala planeringen. Huvudresultaten från dessa studier var att (i) en enkel nätverksmodel samt utvärdering av några heuristiker för nätverksutformning, (ii) en teoretisk härlednign om hur osäkerheter i data kan inkluderas i det matematiska optimeringsproblemet, samt en algoritm för nätverksdesign som tar hänsyn till osäker data samt (iii) en studie som presenterar algoritm som utför global planering för en skotare i ett givet stickvägsnätverk med data om placering stockarna som samlats under

skördarens arbete. Algoritmen i den sista studien är implementerad och har visat sig vara mycket effektiv--tiden att ta fram en uppdaterad plan har gått från timmar till sekunder. Prestandan på den nya gör det praktiskt möjligt att praktiskt använda den i de fall den lokala planeraren inte kan göra en tillfredställande justering av en given plan. Ett naturligt sätt att nyttiggöra denna är att integrera denna heuristik i existerande planeringsverktyg (exempelvis BestWay).
När det gäller den globala planeringsdelen, så har huvudresultaten sammanfattats i tre vetenskapliga artiklar, som för närvarande är under granskning eller håller på att färdigställas.
Inbjuden presentation vid Bothnia Bioindustries Clusters fokusdag: Digitalisering och AI som verktyg för långsiktig hållbarhet 2019-09-30.
Övergripande så blir resultatet från den globala planeraren en GPS rutt från punkt A till punkt B. En schematisk bild av detta är visualiserat i figur 4 nedan.

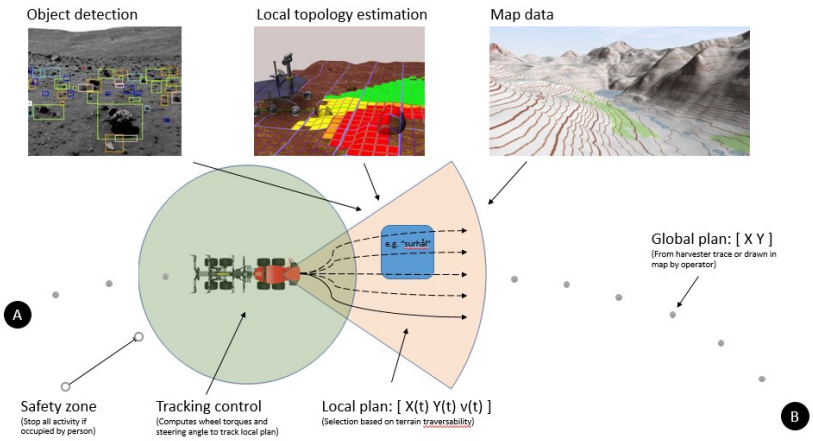
Figur 4. Global planering från punkt A till punkt B baserad på ”off-line” data. Skannad bild på testbanan i Jälla utanför Uppsala.

Den globala terrängplaneringen blir huvudspåret för maskinen att följa. Även om den globala planeringen är baserad på väldefinierad data så kommer det alltid att förekomma lokala förändringar som inte kan förutspås. Detta kräver en realtidsuppskattning av topologin runt maskinen som hanteras av den lokala planeraren.

5. Lokal terrängplanering

Det är en stor skillnad på miljön skogsfordon ska arbeta i jämfört med den miljö fordon på väg arbetar i. För bilar på väg är omgivning dynamisk med många aktörer medan omgivningen i skogen är mer statisk.
På väg är utmaningen med autonom körning främst kopplad till att ta sig från punkt A till B medans man behöver samarbeta med de andra aktörerna på vägen och förlja trafikregler. I skogen handlar utmaning främst om att ta sig från punkt A till B medan man behöver hålla koll på terrängen så man inte inte kör där maskinen inte kan ta sig fram. Detta leder till att de olika applikationerna är intresserad av olika typer av data och då behöver olika sensoruppsättningar.
Sensormodulen i figur 2 ansågs omfatta den information nödvändig för att kunna köra autonomt i skogsmiljö. Stereokameran skapar tillsammans med LIDARn ett punktmoln av terrängen framför maskinen som senare kan representera topologin. Stereokameran löser topologiuppskattningen på kortare avstånd (˜20 m), medan LIDARn hanterar större räckvidd

(˜90 m) med lägre upplösning. Stereokameran används även till att detektera olika objekt (se Objektdetektion) i terrängen som har betydelse för vägvalet vid autonom körning.
Arbetet med lokal terräng planering började med ett antal studentprojekt kopplade till Prototyp1 [5]. Prototyp1 är en testplattform som från början hade utvecklats för att hjälpa till att utveckla pandelarmsstyrning. Arbetet började med att integrera ny hårdvara så som en ny fordons dator, Nvidia Jetson TX2, en router för att skapa ett lokalt närverk på platformen samt sensorer för att möjliggöra autonom navigerering. De sensorer som installerades vid det här steget var en stereo kamera och Lidar. Testplatformen hade sedan tidigare möjlighet att mäta hjulens rotations hastighet och pendalarmarnas positioner.
Detta projekt gjordes som ett högrekursprojekt på masterprogrammet inbyggda styrsystem 2019 [6] på KTH och följdes upp med ett projekt på motsvarande kurs inom masterprogrammet mekatronik [7]. Under projektet på mekatronik uppdaterades den elektriska hårdvaran och arbetet med att utveckla autonom styrning påbörjades. De första implementationerna av autonom styrning var en typ av A*-algorithmer [8] där målet var att undvika större hinder så som träd och större stenar genom att försöka köra på så platt mark som möjligt. Under projektet utvecklades också de stödsystem som gör det möjligt att styra maskinen med en efterfrågad styrvinkel och hastighet. Sensorerna integrerades också med dessa stödsystem i ett ramverk som baseras på ROS. Efter projektet såg man möjligheterna för autonom körning samt vilka typer av stödsystem som behövs för att göra det möjligt. Det var också tydligt att strategin med A* som implementerats inte var den optimala lösningen för problemet.
Parallellt med studentprojekten jobbades en annan strategi fram för att lösa den lokala navigereringen. Idén baserades på ett tidigare arbete utvecklat av forskare på KTH [9] där ett antal möjliga vägar utvärderades baserat på fordonets egenanskaper i kombination med terrängens egenskaper. Detta vägs sedan mot hur nära maskinen följer en global väg.



Figur 5. Global och lokal ruttplanering i skogsterräng.

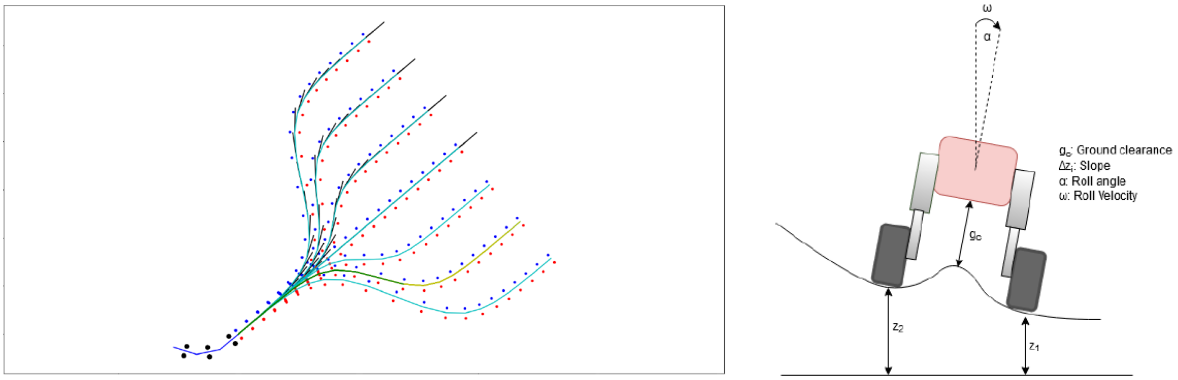
Figur 5 beskriver hur konceptet fungerar. Fordonet tar in information om omgivningen och genererar sedan möjliga vägval, oberoende av hur terrängen ser ut.
Sedan utvärderas dessa vägar och fordonet väljer den bästa vägen. I figur 5 väljer maskinen vägen i längst ned då den tycker det är viktigare att undvika att köra igenom det blåa ”Surhålet” än att hålla sig på den globalt planerade vägen.

För att kunna välja väg så behöver fordonet en strategi för att utvärdera vägarna. Hur vägarna utvärderas beskrivs av ekvation [1]. Ekvationen beskriver hur en kostnad beräknas för en möjlig väg, baserad på hur maskinen kommer röra sig om den skulle följa vägen. Om man varierar vikterna V_i går det att bestämma hur viktigt motsvarande värde är att undvika.

$$Kostnad = \sum_{start}^{slut} V_{g_c} g_c + V_{\Delta z}\Delta z + V_\alpha \alpha + V_\omega \omega + V_{\Delta Gv}\Delta Gv + V_{\Delta y_v}\Delta y_v \quad [1]$$

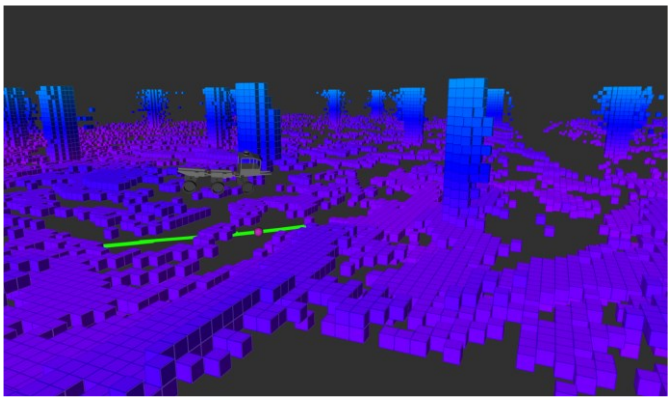
Värde	Beskrivning
g_c	Markfrigång [m]
Δz	Stigningsvinkel [rad]
α	Rullvinkel [rad]
ω	Rullvinkelshastighet [rad/s]
ΔGv	Avstånd från den globala planen [m]
Δy_v	Skillnad från förra vägen som planerades [m]

När kostnaden för varje väg beräknats så jämförs vägarna mot varandra och den med lägst kostnad väljs. Metoden löser vägvalet som ett optimeringsproblem. Det tar dock tid att utvärdera alla vägar, så för att minska antalet vägar som behöver utvärderas delar metoden även upp de vägar som är fysiskt möjligt för fordonet att följa och de som är omöjliga. Detta görs under uträkningen av kostnaden. Om en väg t ex. har en rullvinkel som är större än fordonet klarar av så utesluts vägen från de möjliga vägarna.
Den första implementeringen av den nya metoden gjordes under ett examensarbete våren 2020 [10]. Detta gjordes i simuleringsmjukvaran Gazebo [11] och använde sig av en simuleringsmodell som utvecklades under de tidigare studentprojekten.



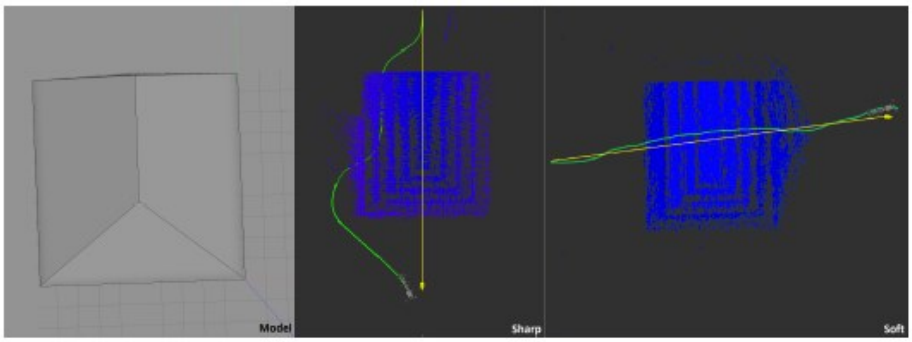
Figur 6. Möjliga vägval för algoritmen till vänster. Fordonets positionsberäkning till höger.

Under examensarbetet insågs snabbt att det skulle ta mycket kraft att ha en full simulering av fordonet, som skulle behövas för att kunna få de värden som krävs för att beräkna kostnaden. Så istället för att simulera hela fordonet så undersöker man endast hur ett hjulpar beter sig när det förljer vägen. Det här ansågs vara en bra approximation då hjulparen följer varandra så pass bra på den maskin algoritmen utvecklas för (XT28). Figur 6 visar hur de möjliga vägarna genereras och var de utvärderas. Fordonet är ner till vänster i blått och de möjliga vägarna skapas från framhjulen. Punkterna på sidan av linjerna är de hjulpositioner där man mäter värderna som används för att beräkna kostnaden.Till höger i Figur 6 visar hur en sektion utvärderas.



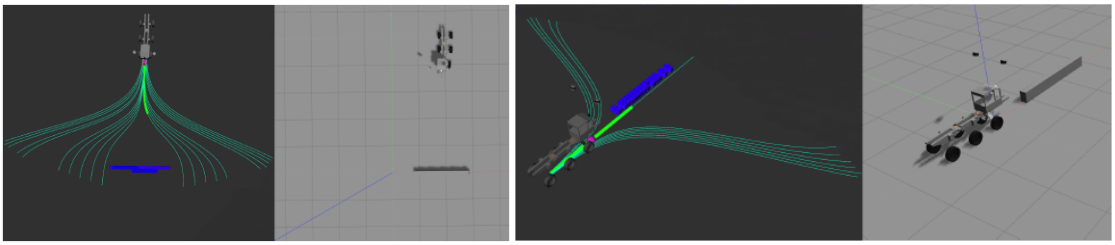
Figur 7. Ett ”occupancy grid” i simulatormiljö.

För att kunna mäta värderna som behövs för att utvärdera vägarna behövs även en metod för att beskriva terrängens topologi. Under nämnt examensarbete [11] användes ett ”occupancy grid”. Där ser man världen som ett tredimensionellt grid som håller koll på vilka kuber som delar av ”gridet” och är ”fyllda”. Figur 7 visar hur ett ”occupancy grid” ser ut i simulatormiljö. Den ingående datan för ”occupancy grid”et genererades från två simulerade Lidars som sattes ovanpå hytten på modellen och var vinklade så att mer av marken täcktes av sensorerna. Examensarbetet undersökte vilka fördelar den nya metoden hade jämfört med mer traditionella metoder för terrängnavigering. Existerande metoder katogeriserar oftast olika zoner av terrängen som körbar eller icke-körbar. En av de stora fördelarna med den nya metoden är att den inte katagoriserar terrängen utan undersöker istället om vägalternativen är möjliga.



Figur 8. Testfall utfört i examensarbetet. Simulerad körning över en ”pyramid”(till vänster) rakt (mitten) och tvärs (höger) över.

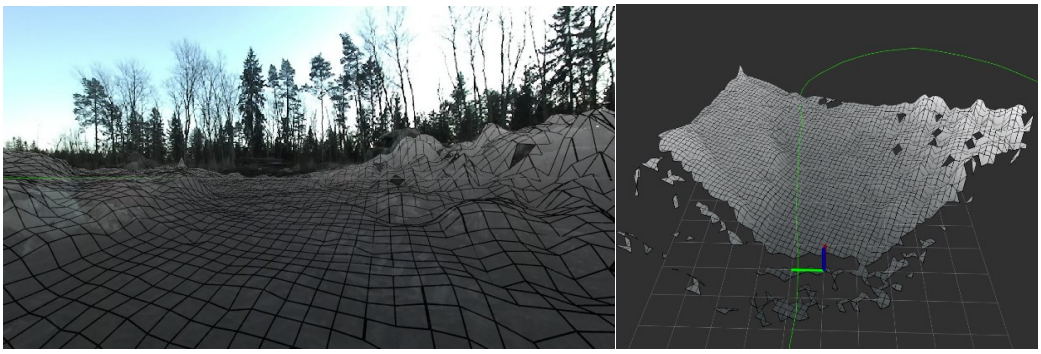
Figur 8 visar ett av testfallen som undersöktes. I det här fallet så försöker fordonet köra över en ”pyramid” med en rak vägg högst upp i bilden till vänster och en brant backe längst ned till vänster. Man kan se att om fordonet kommer uppifrån (mitten) så kan den inte följa den globala planen i gult utan istället måste svänga av och undvika delar av hindret. Om fordenet istället kommer från vänster sida (höger bild) så hittar metoden en väg rakt över hindret. Detta påvisar att hindret själv inte ses som passerbart eller ej passerbart utan det är vägen över hindret som utvärderas. Ett annat fall som undersöktes var ”grensling” av hinder. Detta gjordes med ett långsmalt hinder som fordonet först fick angripa från sidan och sedan rakt på (se figur 9).



Figur 9. Ett långsmalt hinder simuleras rakt på och tvärs över.

Grensling sågs som ett viktigt testfall för när man navigerar i terräng handlar det inte om att undvika hinder så mycket som möjligt, (då finns det en chans att man inte kommer någonstans) utan att hantara hinder så man kommer fram till sitt mål så lätt som möjligt. Utöver testfallen med fokus på specifika hinder gjordes även en undersökning hur de olika vikterna i kostnadsberäkning påverkar komfort i fordonet, körsträcka samt restid.

Resultaten från examensarbetet var väldigt lovande, men efter fortsatt simulering så framkom det att användandet av ett ”occupancy grid” för att representera terrängen inte var optimalt. Detta på grund av att gridet var ganska ineffektivt prestandamässigt och upplösningen var den samma i alla dimensioner. Man kom också till insikten att terränguppskattning endast behöver finnas lokalt runt maskinen för att kunna planera vägarna. För att förbättra prestandan byttes ”occupancy grid” mot en gridmap (se figur 10). Fördelen med en gridmap är att upplösningen är konstant för x-y planet medan upplösning är betydligt större i z-led. Gridmapen gjordes också så att den existerar i ett begränsat område runt maskinen och även följer maskinen. På så sätt kunde prestandan förbättras genom att endast spara den data som krävs för att ta ett beslut.



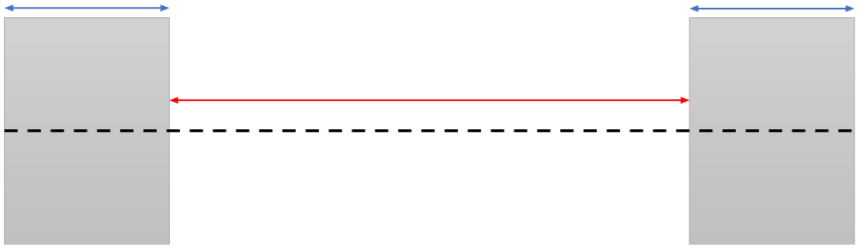
Figur 10. En ”gridmap” av terrängen framför maskinen.

Efter att implementationen av en gridmap hade utvecklats i simuleringsmiljön, implementerades algoritmerna på Prototyp1. Under implementationsarbetet byttes interfacen mot simulerade LIDAR till ett interface mot stereokameran som är monterad på hytten. Prototyp1 visas i figur 11. Mer ingående information om Prototyp1 finns i en inskickad artikel till ISTVS [12].

Figur 11. Prototyp1, en nerskalad prototyp av skotaren XT28.

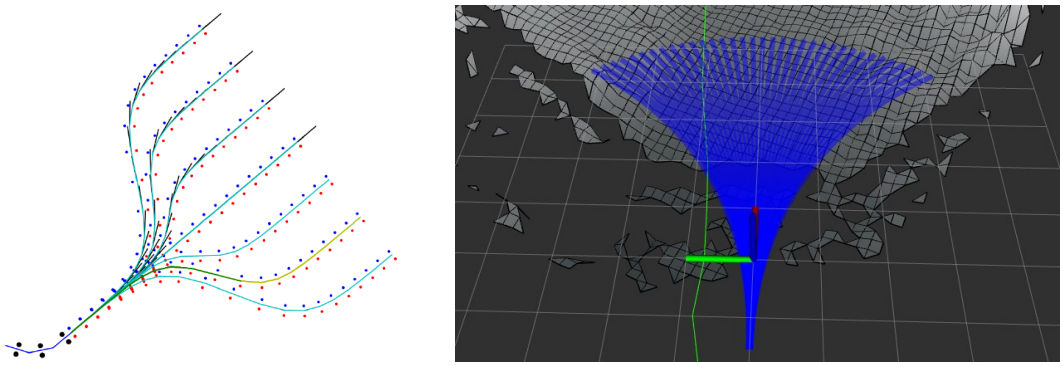
Målet med testerna på Prototyp1 var att kontrollera att systemet fungerade på hårdvaran som är väldigt snarlik den på XT28an. Den mesta av utvecklingen under det här skedet var fokuserat på topologiskattningen som kommer från stereokameran i kombination med gridmapen. När detta fungerade väl så gjordes tester på hela systemet från sensor till maskinstyrning med lovande resultat inför implementation på XT28. Testerna gjordes först på platt mark med uttsatta hinder i olika storlekar. Detta så att maskinen hade möjligheten att köra över vissa hinder medan andra inte gick att köra på. När metoden hade verifierats i både simulering och för Prototyp1 så började arbetet för att implementera den på den fullskaliga maskinen, XT28.

Under implementationsarbete gjordes nya förbättringar av hur värderna mättes samt hur de möjliga vägarna genereras. När algoritmen utvecklades i simulering och när den testades på Prototyp1 så var stroleken på maskinen liten vilket innebar att det räckte med en mätpunkt för att beskriva vart hjulens position kommer att vara när maskinen följer den valda vägen. När arbetet började på den fullskaliga maskinen så visade sig en punkt inte räcka. Detta innebar att det behövdes en ny metod för att hitta vart hjulet kommer placeras. Anledningen till detta var att hjulen var så pass breda så man behövde ta hänsyn till hela ytan under dem. Den nya metoden kollar på ett antal punkter mellan utsidan av hjulen och relaterar punkterna till antingen hjulen eller mellan dem (se figur 12).



Figur 12. Avstånd mellan hjulen i ett hjulpar och hjulens bredd.

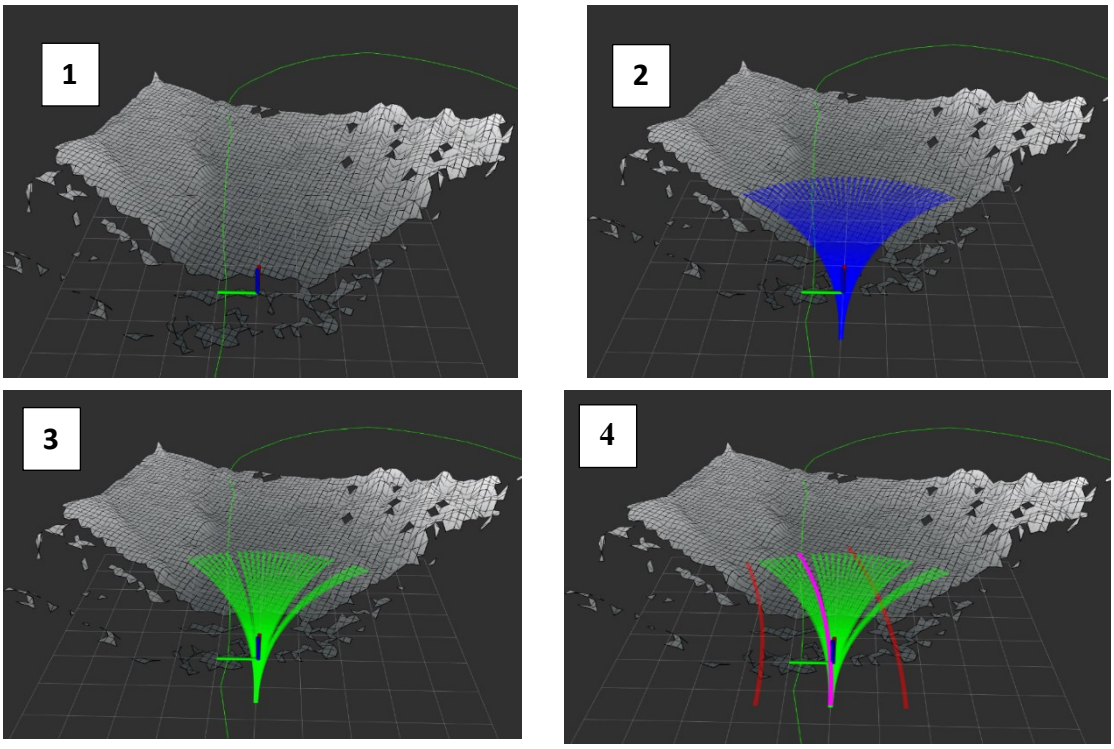
Sedan används den punkt med högst z-värde för att beskriva vardera hjuls posistion. Punkterna mellan hjulen används för att beräkna markfrigången. I Figur 12 skulle de punkter inom de blåa pilarna relateras till vardera hjuls position och punkter inom den röda pilen till markfrigång. Den tidigare metoden tog en punkt för vardera hjul i hjul centrum och en punkt för markfrigång i center.



Figur 13. Vägval enligt ”S” formade vägar till vänster och cirkelsegment till höger.

De möjliga vägarnas utseende förändrades från de ”S”-formade vägarna (vänster i figur 13) till cirkelsegment (höger i figur 13). Motiveringen bakom förändringen är att artikulerade fordon, speciellt XT28an med sina 3 sektioner, efterliknar en cirkel när de svänger. De tidigare vägarna slutar parallellt med varandra vilket är bra när man följer en rak väg och t.ex. vill byta fil eller undvika andra fordon. Det är dock mindre intressant i terräng då man vill ha så mycket manöverbarhet vilket cirkelsegmenten möjliggör genom att bättre efterlikna maskinens rörlighet. Startpunkten för vägarna flyttades även från det främre hjulparet till den första leden. Detta förbättrade algoritmens beteende genom att den kan ta hänsyn till hinder under längre tid eftersom vägarna endast utvärderas från starten av vägen. Innan ”planeringspunkten” flyttades så hade algoritmen en tendens att glömma bort hinder vid hjulens nuvarande position.

Bildserien i figur 14 nedan beskriver hur den slutgiltig lösningen genomför den lokala planeringen relativt den global vägen. Den globala vägen är den smala gröna slingan. I steg 1 tas information in från sensorerna och sparas i en gridmap. Sedan i steg 2 genereras de möjliga vägarna i blått. I steg 3 så har kostnaden för vägarna beräknats (omöjliga vägar raderade) och de som är kvar är i grönt. I steg 4 så har kostnaderna för varje väg jämförts och den ”bästa” har valts (rosa) där de röda linjerna beskriver vart algoritmen uppskattar att utsidan av hjulen kommer att hamna.



Figur 14. Lokal planering steg 1 till 4. Den globala rutten representeras av den smala längre gröna linjen.

Arbetet med implementationen på XT28an fokuserade på två testfall. Det första var att låta maskinen följa en rak global plan och placera ett hinder (se figur 15) som maskinen inte kunde köra över mitt på den globala planen så att maskinen blir tvungen att väja. Det var med detta testfall arbetet började. Tanken var att ha möjlighet att testa så implementationen fungerade från sensor till styrning och även ha möjlighet att ställa in vikterna i kostnadsfunktionen grovt inför terrängkörning. Det var under den här perioden ändringarna för de möjliga vägarna och posistions beräkningarna för hjulen gjordes. Efter vikterna var satta hade maskinen inga problem med att undvika hindret och sedan komma tillbaka till den globala planen.

Figur 15. Körning autonomt på plan mark med ett hinder på den globala rutten.

Det andra testfallet var att följa en global plan som följde en terrängbansslinga (se figur 16). Här fokuserade man på en sektion med grövre terräng på vardera sida om maskinen där det

ändå fanns en del plats att manövrera. Under testfall 2 var fokus främst på att ställa in vikterna för kostnadsfunktionen ytterligare och även att hantera fenomen med sensorerna på maskinen som uppkom på grund av den omgivande terrängen.

Figur 16. Test på terrängbana.

Detta handlade främst om att GPSen hade en tendens att tappa signal då och då. Lösningen blev att implementera en precis dödräkningsalgoritm som kunde täcka upp då GPS signalen saknades. Under inställningen av vikterna så blev det uppenbart att de parametrar som påverkade kvaliten på vägvalet var kostnaden för att avvika från den globala planen, samt roll/pitch-vinkel. Resultaten av planeringen beror främst på en dragkamp mellan dessa. Man vill att maskinen ska följa den globala planen men maskinen måste ha tillräckligt med ”motivation” för att kunna avvika från den globala vägen.

Kostnaden för att avvika från den globala vägen var kvadratisk vilket skapar en möjlighet att ge maskinen stor frihet när den är relativt nära det globala spåret. Men om man ställer vikten fel kan maskinen köra som en sinusvåg utmed spåret eller få möjligheten att avvika alltför mycket. Ett annat beteende som framkom var att systemet inte tar hänsyn till hur olika hinder ser ut. Det är främst höjden på hinder algoritmen tar hänsysn till. För framtida utveckling skulle det vara bra att även kategorisera delar av terrängen och ha med kategorierna i kostnadsfunktionen samt möjlighetskontroll. Det fanns ett specifikt område på testbanan där det fanns ett par spetsiga stenar vars höjd inte var ett problem för maskinen men formen på stenarna gjorde så maskinen inte skulle ha klarat av att köra där. I övrigt fungerade den lokala planeraren väl under testerna. De gånger den globala rutten gick över väldigt ojämna områden valde den lokala algoritmen att köra parallellt med den globala planen tills dess att marken var jämn igen. Maskinen följde sällan den globala planen perfekt utan hittade vägar nära den som var bättre baserat på kostnads funktionen vilket visar att det är kostnadsfunktionen som styr vägvalen och maskinen följer inte bara den globala planen slaviskt.

6. Objektdetektion

Objektidentifiering började som ett relativt öppet problem, där forskningsfronten undersöktes, samt att nuvarande teknologier granskades med syfte att hitta en faktisk lösning som fungerar för den hårdvara som parallellt skulle väljas i projektet. Här krävdes ett iterativt arbete för att

se till att förfaranden som var vedertagna i vissa avseenden även kunde medge att objektidentifiering kunde köras som parallella processer.

Som teknik fungerar idag objektidentifiering bra i bilddata och i videoströmmar. Under 2000- och 2010-talet togs banbrytande tekniker fram som med hög precision och hastighet detekterar objekt i bildströmmar [13],[14],[17],[19]. Samtidigt som algoritmer möjliggjort realtidsdetektion har även hårdvara speciellt anpassad för datormodeller som använder s.k. artificiell intelligens tagits fram. Önskemål som låg effektförbrukning kontra hög precision och kapacitet måste vägas samman för att till mobila maskiner kunna prestera så bra som möjligt. Bland andra Nvidia, Google och Intel kan idag leverera lösningar som möjliggör inbäddad maskininlärning [18] som är anpassad för en god kompromiss mellan storlek, effektförbrukning och prestanda för att fungera på mobila applikationer, såsom väg-, luft- eller terrängfordon.

En viktig del av beslutsfattningen som normalt sker under (manuell) terrängnavigering grundar sig på vad operatören ser framför sig, där objekt och hinder av olika slag renderar i olika beslut. T.ex. kan kombinationer av objekt utspridda på olika sätt generera svårare vägval än om objekten kan överkommas enskilt. Det är alltså inte ett oberoende sammanhang mellan hur objekt är lokaliserade i skogsmarken. På samma sätt är objekten heterogena i sin form, vilket har till följd att vissa objekt kan överkommas i vissa riktningar, medan andra riktningar kan vara svårare, på grund av maskinspecifika begränsningar. Av dessa och andra, otaliga orsaker är det därför viktigt att man möjliggör positionering, storleksbestämning och objekttyp som indata till ett automatiserat system som ska utföra operatörens arbete att korrekt navigera maskinen i terräng och att utföra olika operationer.

Ett ytterligare problematiskt fall som stadfäster objektidentifiering är hur en dator tolkar av marken och objekten framför sig. En vanlig teknik är att använda sig av sensorer som skapar en tredimensionell karta, vilken kan vara förvanskad av ris, buskar och grenar som skapar ”skuggor” i datan och medför en felaktig tolkning. Objektidentifiering kan därmed vara en möjliggörare till att urskilja objekt delvis dolda och därigenom ge starkare evidens till om områden framför maskinen är körbara eller ej, och om operationen i sig kan utföras nöjaktigt.

Framtagningen av objektidentifieringsfunktionen började som ett relativt öppet problem, där forskningsfronten undersöktes, samt att nuvarande teknologier granskades med syfte att hitta en faktisk lösning som fungerar för den hårdvara som parallellt skulle väljas i projektet. Här krävdes ett iterativt arbete för att se till att förfaranden som var vedertagna i vissa avseenden även kunde medge att objektidentifiering kunde köras som parallella processer.

I detta projekt valdes några viktiga objekt ut för att undersöka om positionering, storleksbestämning och objekttyp kan inhämtas; sten, stående träd, liggande träd och stubbar. Dessa objekt är väl avgränsade från omgivningen och kan därmed vara möjliga att hitta med redan etablerade tekniker.

Som ett första avstamp i projektet undersökte vi om 3d-data kan sättas samman med vanlig kamera-data (RGB) för att ge noggrannare identifiering av objekt. En s.k. cascade-detektor tränades upp genom att man i en stor mängd bilder taggar, eller märker ut, var objekten befinner sig i bilden. Samma set av bilder ändrades på så sätt att en färgkanal byttes ut mot en färgskala som grundade sig på gradienten av det synkroniserade 3d-datat i både horisontal-

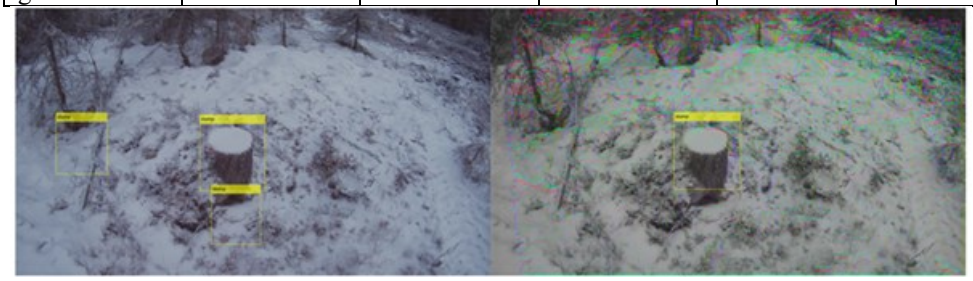
och vertikalled, dvs. färgskalan var en funktion av ändringen i djupet mellan pixlarna i dessa led, se Figur 17.

Figur 17. Vänster: originalbild av stubbe i vintermiljö. Höger: inlagd djupgradient för vertikal- och horisontalled.

Cascade-detektorn använde sig av Viola-Jones algoritm för att detektera objekten, och ”histogram of oriented gradient” [15] användes för att detektera attribut i bilderna. Tabell 1 visar resultaten som visar en signifikant förbättring av detektionen av objekten då gradienten ersatt en färgkanal i bilden.

Tabell 1. Identifieringsresultat för detektorerna (på engelska). TP= true positive, FP= false positive, FN= false negative, Precision = TP/(TP+FP), Känslighet = TP/(TP+FN).

Detektor	Antal objekt	TP	FP	FN	Precision	Känslighet
Färg	241	130	1140	111	0.10	0.54
Färg + gradient	241	149	371	92	0.29	0.62

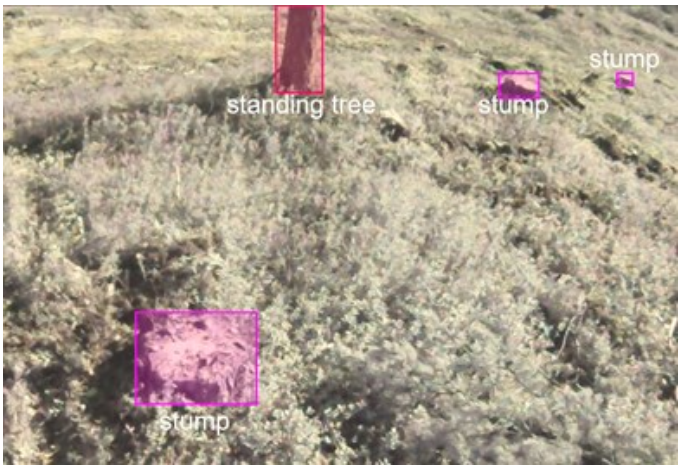


Figur 18. Exempel på resultat från objektdetektion. Vänster: Färgdetektor. Höger: Färg + gradientdetektor.

Detta resultat visade att nyttjandet av 3d-data som extra information till en detektor skulle kunna ge ett godare resultat. Dock krävs extra processering av data för att skapa bilderna, vilket kan vara en nackdel då kod måste köras i realtid på mobila applikationer som är optimerat för låg effektförbrukning snarare än kapacitet.

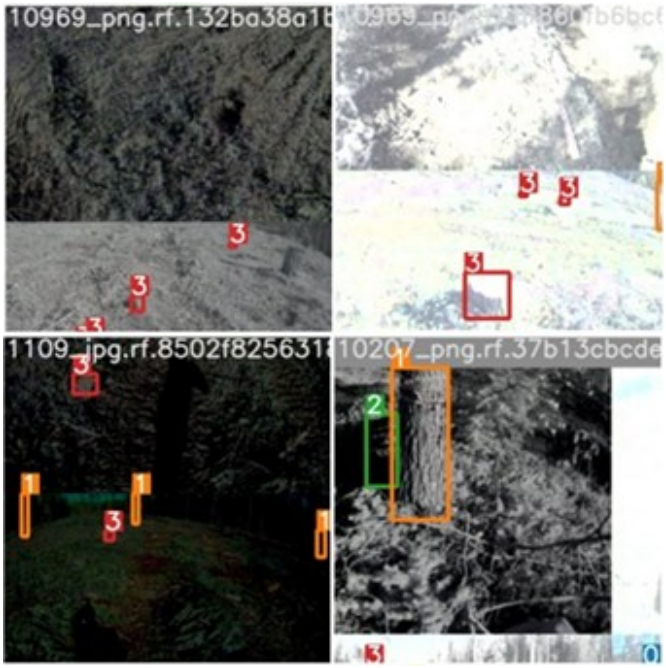
Som nästa försök användes en annan detektor; en s.k. yolo-detektor (”You Only Look Once”) [19] som använder ett endimensionellt neuralt nätverk och applicerar det på bilddatat där objekt ska identifieras. Nätverket delar upp bilden i regioner och predikterar positioner och sannolikheter för identifierat objekt för varje region i hela bilden samtidigt [19].

I projektet ägnades mycket tid till att arbeta med märkningen av bilder, som är en förutsättning för att dektektorer uppbyggda på detta vis ska kunna fungera tillfredsställande. Se exempel på märkning i Figur 19.



Figur 19. Exempel på märkning (eller taggning) av objekt i skogsmark

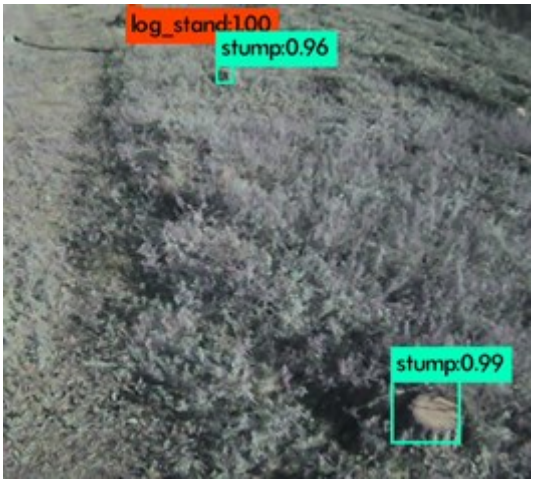
Denna märkning gjordes på bilddata från relevanta skogsmiljöer i norra Sverige. Objekten som märktes ut i bilderna (tusentals) samt bilderna själva (ca. 1000 st) användes sedan som grund för att träna detektorn. Bilddatat justerades i en mängd olika ljussättningar, färgmättnader och rotationer för att säkerställa att en framtagen detektor är robust och klarar olika förhållanden. Ett exempel på träningsbilder ses i Figur 20.



Figur 20. Exempel på automatisk justerade och ihopklippta bilder för att skapa robusthet i objecktdetektorer.

Efter träning så testades detektorn i fält där resultaten påvisade en väl fungerande detektor i området närmast kameran, se exempel i Figur 21. På ett avstånd längre än 10 meter från kameran krävdes gynnsamma förhållanden för att objekt skulle hittas, t.ex. att objekten var mycket stora och att inget obstruerade vyn. Dock är det viktigt att konstatera att mängden träningsdata troligen ännu är för liten, särskilt när det gäller vissa objekt som enbart omfattas av ett hundratal märkta objekt. Det neurala nätverket behöver tusentals bilder med korrekt utförd märkning (jfr. mängden hos [16]) för att fungera tillfredsställande, men sådan storlek på datasetet tar mycket lång tid att skapa, och är något som arbetas vidare på. Vidare är valet av detektor av stor betydelse, där yolov3-algoritmen i sin natur (med lågupplöst

funktionskarta (Eng. Feature Map) kan ge sämre resultat på små objekt i förhållande till andra detektorer som å andra sidan har nackdelar som inte yolov3-algoritmen har.



Figur 21. Resultat från automatisk objektdetektering i skogsmark.

Som ett viktigt komplement till detektion i bild krävs en positionering av de detekterade objekten i förhållande till maskinens position.

Med hjälp av 3d-data från stereo-kamera som användes i projektet gjordes en översättning av objektens position i bilden till den faktiska positionen i förhållande till maskinen. Detta gjordes i realtid och med en bildfrekvens på ca 20Hz på den mobila enheten Nvidia Jetson Xavier, dock testades bildhastigheten inte med den fullständiga ROSarkitekturen aktiv då integrationen av alla noder ännu inte sammanslagits.

Det går dock att konstatera att objektdetektion och samtidig positionering kan göras tidseffektivt på mobil hårdvara, och med tanke på den låga kostnaden (ca. 10 000kr) för hårdvaran och att ROS kan köras skalbart på flera enheter, är den totala systemkostnaden för nödvändig hårdvara för automation möjlig att hålla relativt låg.

Den automatiska positioneringen tillsammans med kunskapen om vilka objekttyper och storlekar som finns kring maskinen skapar goda förutsättningar att tillsammans med övriga navigeringsalgoritmer skapa en fullständig AutoDrive-funktion vid skotning.

Det är dock viktigt att understryka att detta arbete utförts i förhållanden som kan anses vara mycket goda; om navigering ska utföras även i svår terräng, andra årstider och olika tider på dygnet ås kan prestandan hos objektdetekteringen minska. Därför tror vi att en kombination av olika hårdvaror, algoritmer och övriga tekniker kommer att krävas för att skapa ett redundant system som i förlängningen gör autonomt arbete bättre än dagens operatörer.

Vidare arbete handlar nu främst om att beslutsfattandet på rätt sätt ska ta hänsyn till vad som upptäcks kring maskinen och korrigera körningen därefter. Ett möjligt sätt att göra beslutsfattande skulle kunna vara att nyttja förstärkningsinlärning på hela eller delar. Förstärkningsinlärning innebär att en så kallad agent (maskinen) utför handlingar (navigering) i en miljö (terräng), vilket leder till ett nytt tillstånd (hos maskinen), där konsekvenserna från handlingen på något sätt mäts i form av en (negativ eller positiv) belöning. Tillståndet och belöningen skickas sedan tillbaka till agenten och nyttjas för framtida beslut.

7. Referenser

[1] Autodrive 2017, KTH, accessed 12-02-2020, https://www.kth.se/mmk/mechatronics/current-projects/autodrive-1.779888
[2] Stereolabs 2020, accessed 12-02-2020, https://www.stereolabs.com/zed-2/
[3] Velodyne 2020, accessed 12-02-2020, https://velodynelidar.com/products/puck/
[4] Ublox 2020, accessed 12-02-2020, https://www.u-blox.com/en/positioning-chips-and-modules
[5] Norder, P., & Sandegård, B. (2015). Realization of a downscaled pendulum-arm suspended forwarder (Dissertation). Retrieved from http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-182997
[6] IL2232 Embedded Systems Design Project 2020, KTH, accessed 12-02-2020, https://www.kth.se/student/kurser/kurs/IL2232?l=en
[7] MF2059 Mechatronics, Advanced Course 2020, KTH, https://www.kth.se/student/kurser/kurs/MF2059?l=en
[8] Hart, P., Nilsson, N., & Raphael, B. (1968). A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, *4*(2), 100–107. https://doi.org/10.1109/tssc.1968.300136
[9] Svensson, L., Bujarbaruah, M., Karsolia, A., Berger, C., & Törngren, M. (2020). Traction Adaptive Motion Planning at the Limits of Handling.
[10] Axelsson, A., & Källström Chittum, M. (2020). A Study on the Impact of Traversability Measures on Rough Terrain Path Planning (Dissertation). Retrieved from http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-279491
[11] Gazebo 2021, accessed 12-02-2020, http://gazebosim.org/
[12] International society for terrain vehicle systems 2021, accessed 12-02-2020, https://www.istvs.org/
[13] Dalal N. & Triggs, B. (2005). Histograms of oriented gradients for human detection. In IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05), San Diego, CA, USA, pp. 886-893 vol. 1, doi: 10.1109/CVPR.2005.177.
[14] Girshick, R. (2015). Fast r-cnn. In Proceedings of the IEEE international conference on computer vision (pp. 1440-1448).
[15] Hoang, V., Le, M. and Jo, K. (2014). Hybrid cascade boosting machine using variant scale blocks based HOG features for pedestrian detection. Neurocomputing. 135, 357-366.
[16] Lin, T. Y., Maire, M., Belongie, S., Hays, J., Perona, P., Ramanan, D., ... & Zitnick, C. L. (2014). Microsoft coco: Common objects in context. In European conference on computer vision (pp. 740-755). Springer, Cham.
[17] Liu, W., Anguelov, D., Erhan, D., Szegedy, C., Reed, S., Fu, C. Y., & Berg, A. C. (2016). Ssd: Single shot multibox detector. In European conference on computer vision (pp. 21-37). Springer, Cham.
[18] Mittal, S. (2019). A Survey on optimized implementation of deep learning models on the NVIDIA Jetson platform. Journal of Systems Architecture, 97, 428-442.
[19] Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., & Farhadi, A. (2016). You only look once: Unified, real-time object detection. In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition (pp. 779-788).

Slutrapport för AP4 AutoRemote i projektet Automation för autonom terrängmobilitet (AUTO2)

Morgan Rossander, Tobias Semberg och Martin Englund

1. Introduktion

Fjärrstyrning ses som en möjliggörare av stegvis ökad automation mot autonoma skogsmaskiner. Genom att införa fjärrstyrning kan många av fördelarna som full automation tros innebära bli tillgängliggöras. Exempelvis kan alla system som används för operatören ska kunna göra sitt arbete och ha en bekväm arbetsplats tas bort från maskinen. Detta sparar plats, vikt och energi. I kombination med automatisering av vissa moment kan fjärrstyrning leda till nya koncept, där en operatör i teorin skulle kunna hantera mer än en maskin.

Initialt planerades förenklade försök på fjärrstyrning inom ramen för Auto2, vilka främst skulle utföras i simulator. Tidigt i projektet bedömdes det att större fokus på fysiska experiment med fjärrstyrningen skulle vara kraftfullt. Detta ledde till ett parallellt projekt med syfte att bygga ett fjärrstyrningslab Troëdsson Forestry Teleoperation Lab, vilken blev basen för

2. Troëdsson Forestry Teleoperation Lab

Troëdsson Forestry Teleoperation Lab ligger i Jälla utanför Uppsala och invigdes i oktober 2019. Det är baserat på ett kommersiellt tillgängligt videosystem och maskinstyrningen är implementerad i ROS (Robot Operating System, www.ros.org). Merparten av försöken och studierna inom arbetspaket AutoRemote har utförts i labbet. Det har även tjänat som testplattform för fullskaletesterna i AutoDrive.

Figur 1. Troëdsson Forestry Teleoperation Lab.

3. Systemuppbyggnad

I detta avsnitt beskrivs kort de ingående delarna i systemet. En schematisk överblick ges i Figur 3.

XT28 prototypskotare

XT28 är en fullskalig prototypskotare med aktiv fjädring och dubbla styrmidjor. Maskinens fjädringssystem är studerat i ett flertal examensarbeten och andra publikationer. Maskinen valdes främst för dess tillgänglighet och möjligheter att komma åt styrsystemet.

Videosystem

Videosystemet baseras på en produkt ODEN från svenska Voysys AB. Systemet har två relativt högpresterande datorer, en på maskinen ”streamer” och en vid operatörsplatsen ”viewer”. Streamer ansluter till alla kameror via nätverk och USB och sätter samman en komprimerad videoström. Innehållet i videoströmmen kan styras med hjälp av en plugin. Viewern ansluter till VR-headset och skärmar och behandlar videoströmmen till de vyer som önskas.

Kamerorna är från FLIR och har samtliga försetts med 190° vidvinkellinser (”fisheye”). Linserna har fördelen att se mycket stort område med en kamera vilket underlättar bygget av vyerna. Viewern rätar ut de förvrängda bilderna från fisheye kamerorna. Kamerasystemet som det i dagsläget är utformat lämnar några ytor utan uppsikt som idag kan ses från hytten. Bildtäckningen är dock tillräcklig för att kunna genomföra studier.

Operatörsstationens skärmar är tre stycken 55″ 16:9 skärmar av modell Samsung QE55Q70RAT placerade på högkant. De två yttre skärmarna är dessutom vrida något in mot mitten så att en krökt bildyta erhålls, Figur 2.

VR headsetet är ett Oculus Rift S.

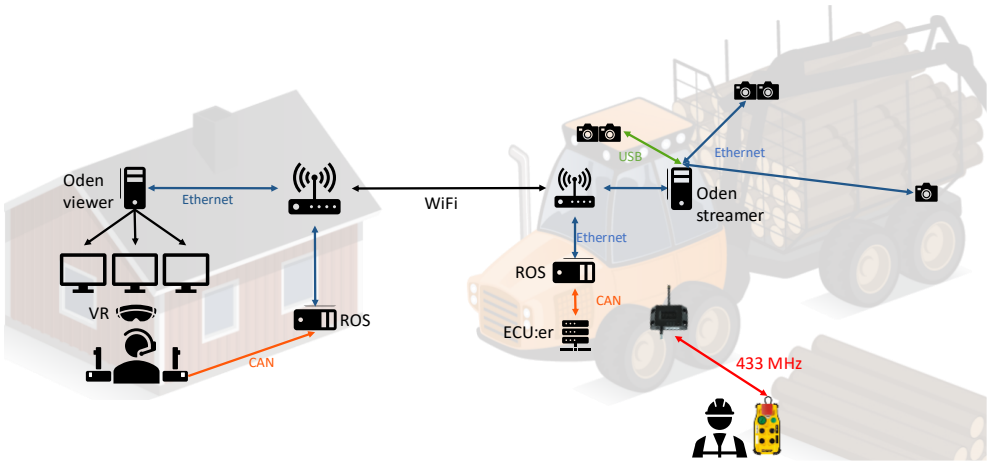
Figur 2. Operatörsstationen vid fjärrstyrning.

Styrsystem

För styrning används samma typ av joystickar och pedal som sitter i maskinen. Joystickarna är i operatörsstationen monterade på en vanlig kontorsstol. Pedalen för hastighet sitter på en platta som ligger på golvet, Figur 2. Från joystickarna kan både maskinen och videosystemet kontrolleras. Styrsystemet är byggt i ROS. Eftersom även AutoDrive är implementerad i ROS kan alla funktioner i princip styras från joystickarna i operatörsstationen. Maskinens styrsystem är kopplat mot en ROS-dator på maskinen via CAN och analoga utsignaler mot maskinens pedaler. En CAN-anslutning ersätter maskinens befintliga joystickar och signalerna emuleras istället från ROS-systemet baserat på önskade funktioner. En annan CAN-anslutning läser av maskinens signaler och möjliggör återkoppling av varvtal, temperaturer, etcetera. Maskinens styrsystem är således ovetande om den styrs manuellt eller via fjärr. Principen kan relativt enkelt anpassas till godtycklig maskin som styrs via CAN (vilket gäller alla moderna skogsmaskiner).

Säkerhetsupplägg

Maskinens befintliga nödstoppslinga kompletterades med ett trådlöst nödstopp för att under försöken med detta prototypsystem kunna hålla god säkerhet. Det trådlösa nödstoppet är en kommersiell, klassad produkt som arbetar helt oberoende av de andra systemen. Vid fjärrstyrning av maskinen går en säkerhetsperson med den trådlösa nödstoppen parallellt med maskinen och ansvarar för att avbryta om något osäkert skulle inträffa.



Figur 3. Troëdsson Forestry Teleoperation Lab, schematisk uppbyggnad. Videosystemet i Oden från Voysys och styrsystemet implementerat i ROS delar samma nätverk. Ett fristående trådlöst nödstopp hanterar säkerheten.

Figur 4. Prototypskotaren XT28. Kameraplaceringarna är markerade med gröna fält. Stereokameror med fisheye-linser fram på hytten och i kranen. Backkamera i bak.

Utvärderingsförsök med resultat

4. WiFi i skogsmiljö

I ett examensarbete inom Auto2 studerade träds inverkan på WiFi signaler främst genom simuleringar, men även fältförsök [1]. Även om simuleringarna indikerade att WiFi-signaler kan propagera >100 m i skog så antydde fältförsöken att stabil uppkoppling var svårare att åstadkomma. Grundidén var att riktantenner skulle användas i båda ändar av överföringen och överföringslängder på 50m lyckades upprättas med sådan lösning. En viktig slutsats från arbetet är att kombinationen riktantenn vid stationen och rundstrålanden antenner på maskinen är en bra lösning. Automatiskt styrda riktantenner på maskinen kan vara ett alternativ.

Erfarenheter från fjärrlabbet antyder att videoöverföringens kvalitet kan påverkas av mindre störningar i nätverket. Det finns även en indikation på att det finns en skillnad i stabilitetsaspekten mellan olika nätverkshårdvara som beror på mera än bara vilken standard av WiFi de använder sig av.

5. Upplevelser av fjärrstyrd skotare

Upplevelsen av fjärrstyrning har främst studerats med ett examensarbete i konceptstudier av tekniska utformningen av en fjärrstyrningsstation [2]. Olika återkopplingar från maskinen samt några AR (argumented reality) koncept har studerats. Arbetsupplevelsen genomfördes under våren 2020. På grund av covid19 användes en mindre testgrupp av totalt fyra personer. Två av personerna är professionella skotaroperatörer från Sweaskog. En arbetar bland annat som operatörsinstruktör och har sen tidigare vana av VR och hade även viss erfarenhet av fjärrsystemet sen tidigare. Det fjärde personen är forskare på Skogforsk och har erfarenhet av systemet samt har tidigare arbetat professionellt som operatör.

Beskrivning av några av de koncept som studerades i studien och förarkommentarer följer.

Köra via skärm eller VR

Användningen av VR headset ger en intuitiv bild med förmåga till viss avståndsbedömning. Det krävs dock viss erfarenhet för att bli bekväm med headsetet, vilket de externa operatörerna inte hann få. Samtliga testoperatörer uppskattar skärmarna som mera bekväma, men svårigheten med avståndsbedömningen gör de ineffektiva. Det stod även klart att trots den stora skärmytan var det nödvändigt att förstärka vidvinkeleffekten för att se tillräckligt mycket i bilden. Det gav en viss förvrängningen av bilden på skärmarna, vilket rimligen försvårar avståndsbedömning ytterligare.

Ljuskägla på grip för bättre avståndsbedömning

En ljusstark ficklampa monterades med magnet på gripen för att utvärdera ett koncept med ljuskägla på marken rakt under gripen. Ljuspunktens position visar var gripen är i horisontalplanet och käglans storlek ger en indikation av gripens höjd över det den har under sig. Principen uppskattades av operatörerna och ansågs förbättra möjligheterna till krankörning via skärmar.

Ljudåterkoppling

En riktmikrofon placerades på vipparmen och riktades ner mot gripen för att fånga upp processljud och förmedla vid körning. Mikrofonens placering och egenskaper framhävde trädhanteringsljud och filtrerade naturligt ned maskinens ljud. Förarna uppskattade ljudet och ansåg att det ökade känslan av närvaro.

Drönarvy

Här navigerades en drönare ovan maskinen för att ge en parallell överblicksbild under arbetet. I ett framtidsscenario skulle drönaren kunna vara automatiserad och del av en flotta av drönare som automatiskt avlöser varandra för laddning. Drönarbilden uppskattades och ansågs även kunna vara ett hjälpsamt stöd redan i dagens maskiner.

Haptisk återkoppling i spakarna

Små vibrationsmotorer monterades på spakarna i operatörsstationen. Vibrationerna i spakarna aktiverades då ljudet från mikrofonen på maskinen gick över ett visst tröskelvärde relativt den

generella ljudnivån. Tröskelvärdet justerades så att vibrationer aktiverades då slag och stötar uppstod på maskinen. Funktionen upplevdes av testförarna som onaturlig och överflödig. Ljudet gav samma information. Dessutom är skakningar i spakarna inte något som förekommer i vanliga maskiner.

6. Kranhantering och fördröjning

En viktig faktor vid fjärrstyrning är den extra fördröjning som uppstår mellan spakrörelse och visuell återkoppling. Snabbare förlopp är mera påverkade av fördröjning. Ett av målen för AutoRemote var att systemet ”Ska i jämförande studie på prototypmaskin ha motsvarande tid (±10%) för att lasta och lossa stockar.” Att angripa just krankörning som primär studie är även motiverat ur ett hastighetsperspektiv då det är den del av arbetet som har de snabbaste rörelserna. Terrängkörningen är jämförelsevis en långsam process. För att utvärdera prestanda av kranhanteringen valdes ett försök som använts tidigare för studier på kranoperationer [3]. Metodiken har en cykel som tar 60-100 s, vilket gör det möjligt att få många upprepningar av samma operation vilket ger ett gott statistiskt underlag för analyser. Förutom att studera körbarheten valdes även att studera effekten av fördröjning. Fördröjningen i fjärrstyrning har stor inverkan på körbarheten och den ökar ifall styrningen skulle ske med annan teknik än WiFi.

Studiens operatörer var samma två representanter från Skogforsk som i Upplevelsestudien, alltså en med tidigare operatörserfarenhet och en med instruktörskompetens. Med avseende på covid19-läget begränsades antalet försökspersoner och försöksdagar. De båda personerna har båda erfarenhet att VR-användning och det aktuella systemet i fråga. Det förkortade inlärningsperioden. I varje försök utfördes cykeln 6-10 gånger, de två mest avvikande cyklerna förkastandes och resterande medelvärdesbildades. Körningar med extra fiktiv fördröjning lades till för att studera betydelsen av fördröjning. All fördröjning som nämns i denna rapport avser extra fördröjning i förhållande till hyttkörning. Det befintliga maskinsystemet har en egen fördröjning som tillkommer både vid hytt- och fjärrkörning. Vid försöksplaneringen stod det klart att nivåer med total fjärrfördröjning på mer än 400 ms tvingade fram nya strategier för körning eftersom fördröjningen gav upplevelsen att kranen fått ett annat beteende. Studiens syfte var att finna när fördröjningen påverkar vanlig krankörning och därför valdes nivåerna 100, 150 och 200 ms i total fördröjning.

Resultat och diskussion – systemfördröjning

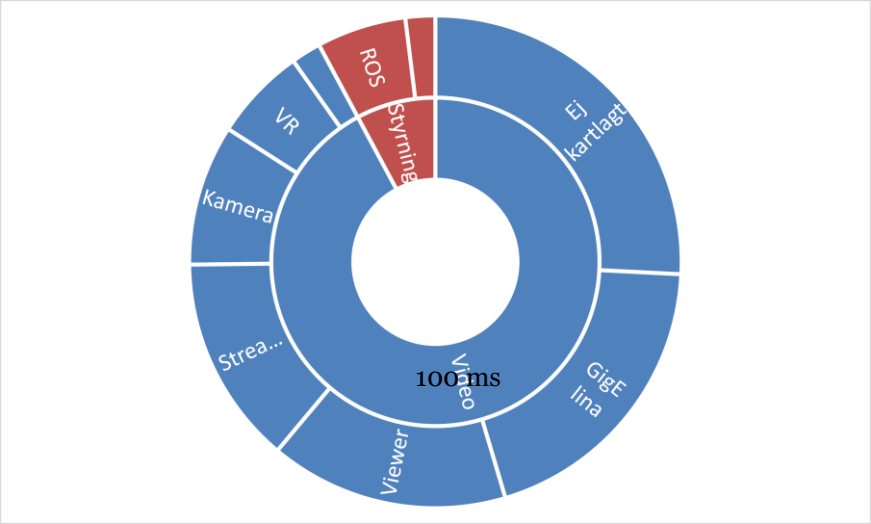
Systemets grundfördröjning har kartlagts med prelimärt resultat till 100 ms, från vänster kamera till vänster öga i VR-skärmen, Figur 5. Det förekommer viss slumpvis variation i värdet på grund av osynkroniserade uppdateringsfrekvenser i kamera och VR-headset. Dessutom är höger öga inte synkroniserad och får därför en i snitt högre fördröjning. Det är vänster öka som använts som utgångpunkt i körningsförsöken med extra pålagd fördröjning.

Resultat och diskussion – krankörning

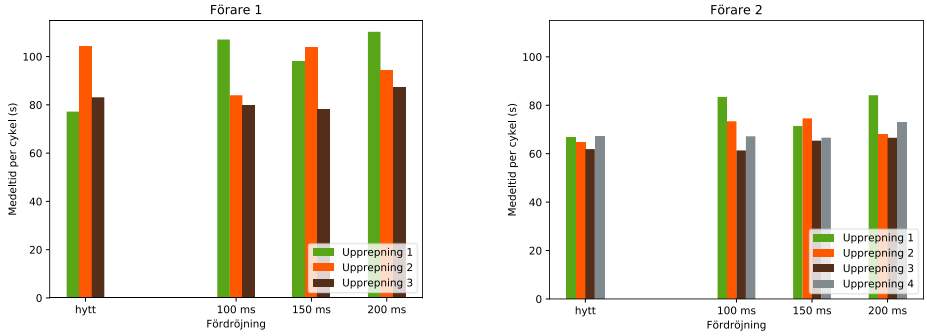
Preliminära resultat från cykelmedeltiden sammanfattas i Figur 6. Resultaten är anmärkningsvärt jämna. Spridningen vid fjärrstyrning är större, och en inlärningseffekt tycks finnas då upprepning 3 är den bästa. Upprepning 4 för förare 2 hade sämre förutsättningar med mörker, vilket kan förklara att tidsåtgången gick upp något.

Resultaten antyder även att det saknas någon tydlig trend i fördröjningens påverkan på medeltiden per cykel. Det kan dock finnas andra mått som visar på skillnader.

Förarupplevelsen under studien efterfrågades. Några rapporterade aspekter var att kameraplaceringen var bra med god sikt att utföra arbetet. Däremot kunde avståndsbedömningen i vissa lägen avvika med upp till 2m. En förare noterade stillheten och lugnet i att arbeta från kontorsstolen. Det blev nästan lite irriterade att skaka runt i hytten i jämförelse. Båda förarna rapporterade varierande grad av obehag av att arbetat intensivt i VR-headset större delen av en dag. Speciellt ögonen upplevdes trötta. Viss skillnad i rapporterad körbarhet noterades mellan fördröjningarna, speciellt vid 200 ms.



Figur 5. Preliminärt resultat - fördelning av fjärrsystemet fördröjning



Figur 6. Preliminärt resultat - krankörningsstudien.

7. Integration mellan fjärrstyrning och självkörning

Systemens tänkta funktion testades under en demonstration 2020-12-09. Operatören sitter vid platsen för fjärrstyrning och aktiverar med en joysticktryckning ”AutoDrive” som tar över maskinen och kör den längs ett fördefinierat GNSS-spår samtidigt som lokala hinder hanteras. Operatören kan stänga av AutoDrive och köra maskinen via fjärr igen när så önskas. Det finns även funktionalitet förberett för att hantera stoppsignalen för säkerhetssystemet AutoSafety. Konceptet är förberett för utökning sådant att operatören kan fokusera på kranarbete samtidigt som AutoDrive framför maskinen.

Slutsatser och framtida arbete

Utmaningarna med stabilitet och räckvidd i olika trådlösa överföringstekniker i skoglig tillämpning kommer studeras vidare i ett separat projekt som startade under 2020.

Kranstudiens resultat indikerar att kranskörningsmomenten i skotningsarbetet har god potential att fungera produktivt i fjärrkörning. Det tycks även finns viss marginal att hantera ökad fördröjning som är att vänta vid körning på distans, även om andra problem kan uppstå. Data ska analyseras vidare och officiella resultat kommer publiceras under 2021.

Många frågor kvarstår, som hur avståndsbedömningen kan förbättras ytterligare och om det är möjligt att klara körning via skärmar för att slippa sitta i VR-headset. Likaså hur terräng och väderförhållanden påverkar produktiviteten. Terrängkörning, faktiskt skotningsarbete och hur systemet står sig på en mera konventionell maskin är andra intressanta frågor.

Referenser

1. Tomaszuk, M., *Remote Control of Forest Machinery Using WiFi*, in *TRITA-EECS-EX*. 2019. p. 74.
2. Persson, T., *Design of a workstation for teleoperated forwarders: Exploring the future work within forestry*, in *Department of Business Administration*. 2020, Luleå University of Technology.
3. Englund, M., *Kranspetsstyrning ger bra förarstart*. 2016, Skogforsk.

VINNOVA – UDI – S1
[Automation för autonom terrängmobilitet (AUTO2)]

Datum: [2021-02-15]
Dnr: [2018-03344]]

Slutrapport för AP5 Säkerhet, lagar och regler Automation för autonom terrängmobilitet (AUTO2)

Anneli Lundmark

1. Inledning

Skogsbranschen står inför stora förändringar i och med omställningen till en cirkulär bioekonomi. Fördelarna med ökad automation är många, såsom säkrare arbetsplatser och trivsammare arbetsmiljöer, men autonoma system är också nödvändigt för att vi ska kunna öka produktiviteten och bibehålla skogsnäringens konkurrenskraft gentemot traditionella icke-cirkulära och fossilbaserade branscher. Den snabba tekniska utvecklingen innebär inte bara möjligheter utan även juridiska utmaningar för att en fullskalig implementering av autonoma maskiner ska kunna ske.

Skogstekniska klustret har varit samordnare för arbetspaket 5 där vi tittat på säkerhet, lagar och regler tillsammans med BAE Systems Hägglunds, Komatsu Forest, RISE och Skogforsk. Syftet med arbetspaketet har varit att ta reda på om och i vilken utsträckning som dagens regelverk hindrar implementeringen av autonoma skogsmaskiner. Arbetsgruppens målsättning är att en maskin ska kunna köra helt autonomt i terräng som inte är avskilt eller inhägnat och utan att en operatör har full kontroll. Istället bör ansvaret ligga på maskinens autonoma system. Arbetet har delats upp i tre arbetsmoment:
Moment 1. Rapport om aktuellt regelverk för dagens terrängstransporter.
Moment 2. Rapport som identifierar ändringsbehov av lagar och regler.
Moment 3. Förslag på nya regelverk för att möjliggöra autonomt terrängarbete.

2. Moment 1. Aktuellt regelverk för terrängtransporter

Arbetspaketet inleddes med att Skogstekniska klustret bytte projektledare och således samordnare för arbetspaketet. Under tiden för bytet av projektledare har i huvudsak BAE Systems Hägglunds arbetat med genomlysningen av aktuellt regelverk. Ny samordnare var på plats under sensommaren 2019 och arbetet har sedan dess fortlöpt enligt förväntan. Under årsskiftet 2019/2020 levererades rapport 1 ”Auto2: Regelverk för terrängtransporter kopplat till automation”. Efter att rapporten färdigställts gjorde arbetsgruppen en riskbedömning med utgångspunkt i helautonoma fordon men med remote-control. Riskanalysen låg sedan till grund för de kommande arbetsmomenten.

I rapporten ”Auto2: Regelverk för terrängtransporter kopplat till automation” framgår att lagstiftaren klassat skördare och skotare som olika fordon. Skördare har definierats som ett terränggående motorredskap (klass II), så kallad arbetsmaskin, medan en skotare klassats som tung terrängvagn av typen terrängmotorfordon. Distinktionen mellan de olika fordonstyperna har påverkat kraven vad gäller exempelvis körkort och hastighet. Däremot, för samtliga autonoma fordon som genom sin användning kommer i kontakt med övrig trafik är kraven för fordonsegenskaper densamma som för manuella fordon, avseende exempelvis bromsförmåga och säkerhetsbälte. Utredningen har kommit fram till att det inte finns något i trafikförordningen eller terrängkörningslagen som bedöms reglera eller förhindra implementeringen av automatiserad körning med terrängmotorfordon och förare i

hytten. Däremot har lagstiftaren, på både nationell och internationell nivå, förutsatt att det finns en person i eller utanför fordonet som kan anses ha kontroll och därmed bär ansvaret för framförandet av fordonet. Den personen har därför definierats som förare.

3. Moment 2. Ändringsbehov av lagar och regler

Under arbetspaketets andra moment har vi inkluderat RISE i arbetsgruppen. Huvudfrågorna som diskuterats i arbetspaketets andra moment och likaså rapport 2 ”Auto2: Säkerhet, lagar och regler” har varit de autonoma systemens utmaningar vad gäller ansvar- och säkerhetsperspektivet. Lagstiftaren har historiskt sett aldrig behövt ta ställning till fjärrstyrda eller helt automatiserade fordon i icke-inhägnade områden, vilket gör att den tekniska utvecklingen utmanar gällande regelverk. I dag finns det inte något prejudikat i frågan vilket, enligt arbetsgruppens bestämda åsikt, medför en överhängande risk, inte minst för maskintillverkarna. Frågan som arbetsgruppen ställt sig, vem är föraren i framtidens autonoma maskiner och när tar det autonoma systemet över ansvaret?

Den slutsats som arbetsgruppen för fram i rapporten är att regelverket kring autonoma maskiner och terrängfordon behöver anpassas i den takt som den tekniska utvecklingen sker. Som lagstiftningen ser ut i dag finns det möjlighet till tolkningar men för att säkerställa för både kunder och tillverkare att autonoma system är en trygg investering måste regelverket förändras.

4. Moment 3. Förslag på nytt regelverk

Av en händelse hade Kommittén för teknologisk innovation & etik (KOMET) under våren 2020 en öppen ingång där organisationer fick möjlighet att berätta om upplevda regelhinder som man stött på i den tekniska utvecklingsprocessen. Kommittén har ett regeringsuppdrag för att jobba med policyutveckling som kan möjliggöra att Sverige blir ledande på användningen och utvecklingen av framtidens teknologier. Den öppna ingången blev därför ett perfekt tillfälle för att på sikt nå lagstiftaren och en chans att kunna påverka riktningen av de lagar och regler som har betydelse för autonoma terrängkörning. Arbetsgruppen skickade in ett bidrag med de slutsatser som lyfts fram i arbetspaketets tidigare moment samt våra förslag på vad som behövs för att möjliggöra autonom körning. Under hösten 2020 meddelade KOMET att arbetsgruppens bidrag ingår i en förstudie om förarlösa maskiner i terräng och lantbruk.

I det inskickade bidraget till KOMEt var arbetsgruppens behov tydlig – det saknas regelverk. I framtiden ser vi att nya regler tas fram som tydligt tar hänsyn till den tekniska utvecklingen som sker inom automation. I dag förhindrar regelverket att autonoma maskiner på egen hand, utan förare, framförs i icke-inhägnade områden. Vi skulle vilja se ett regelverk som skapar utrymme och tydligt klargör hur autonom maskin skall vara möjlig i terräng och vilka krav som ställs på en sådan lösning där ingen mänsklig förare har full kontroll hela tiden.

5. Fortsättning efter projektet

Arbetsgruppen kommer fortsätta att utgöra en samverkansgrupp tillsammans med en ytterligare aktör, VOLVO CE, där vi tillsammans kan verka för att förändring ska kunna ske inom området lagar och regler. Närmast inväntar vi KOMETs förstudie där förhoppningen är att man ska kunna ta fram tillräckligt med kunskapsunderlag som kan skickas till regeringen och därmed bana väg för lagändringar.

Slutrapport för AP6 Testplattformar i projektet Automation för autonom terrängmobilitet (AUTO2)

Magnus Karlberg

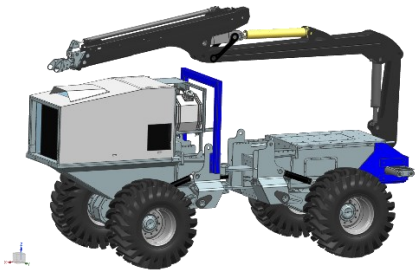
Inom AUTO2 har flera olika testplattformar använts för utveckling och testning av olika lösningar i olika mognadsgrad. I denna rapport beskrivs de olika plattformarna samt den styr- och reglerarkitektur som utvecklats inom arbetspaket 6. Resultat från olika tester redovisas under resp. arbetspaket.

1. Beskrivning av testplattformar och användning

Testinfrastrukturen som har använts inom AUTO2 kan delas upp i tre kategorier, Virtuella-, Mixade och Fysiska Testplattformar. Denna uppdelning gjordes för att effektivt kunna möta utmaningar på olika TRL-nivåer.

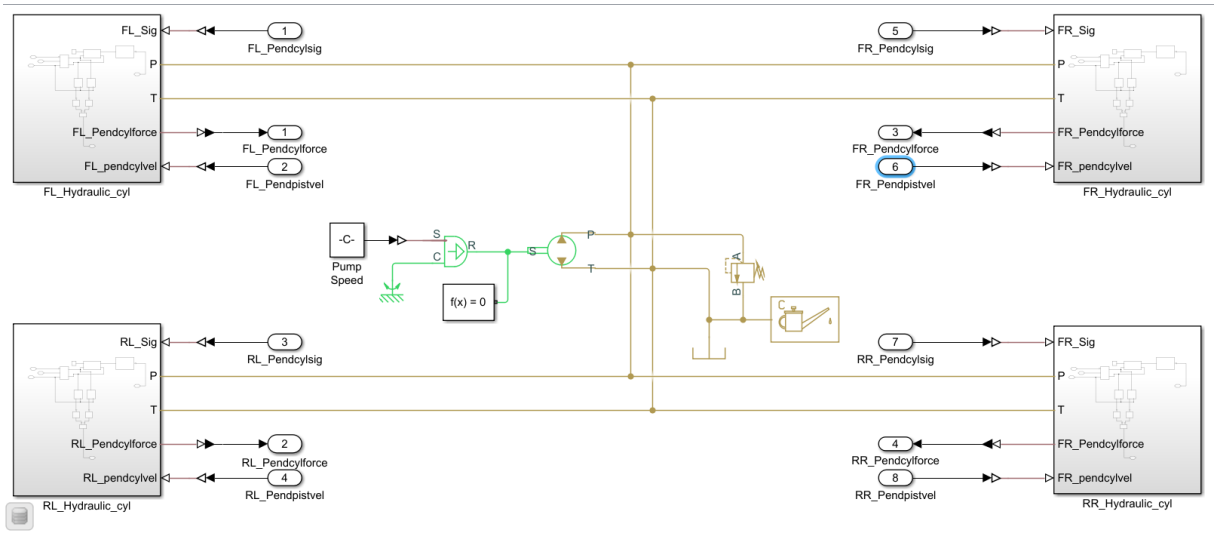
Virtuella Testplattformar

I tidiga utvecklingsskeden nyttjades rent virtuella kopior av olika delsystem för att studera funktion och prestanda hos de fysiska plattformarna. Kinetiska modeller av testplattformar modellerats i olika simuleringsmiljöer. *Figur 1* visar ett exempel på en sådan modell av Ltu:s terrängfordonsplattform modellerad i Siemens NX och även Skogforsk XT28 har i projektet modellerats med hjälp av Algoryx simuleringsmiljö. I dessa simuleringsmiljöer kan man även imitera flertalet av de interna sensorsignalerna (pendelarmspositioner, roll, pitch etc.) Modellerna i Siemens NX används för sk. batchsimuleringar dvs. där simuleringsresultaten inte behöver presenteras i realtid. Dessa modeller är ofta av hög precision men tar då längre tid at simulera. ORYX lösare AGX är framtagen för att vara snabb och möjliggör simuleringar i realtid vilket är användbart för att t.ex. testa fysiska styrhårdvaror eller som fysikmotor i simulatorer.



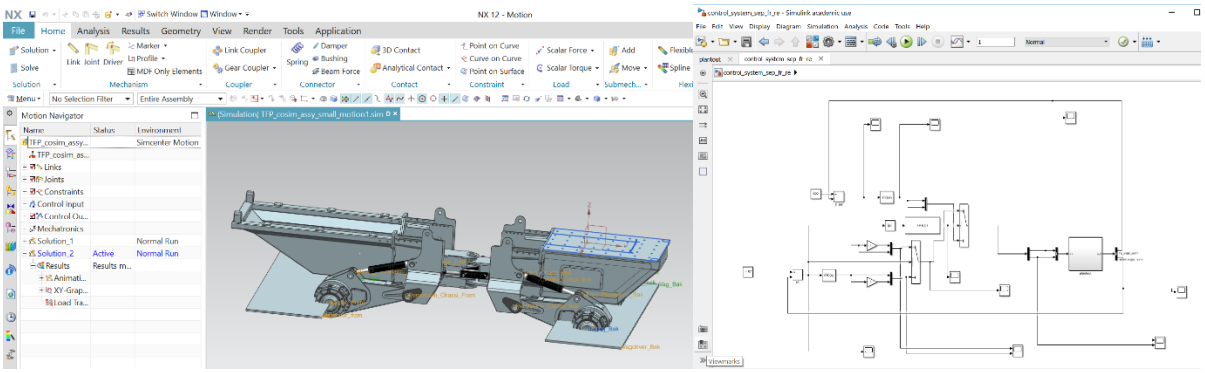
Figur 1. Virtuell kopia av terrängfordonsplattformen på Ltu modellerad i Siemens NX

Utöver kinematik har även beräkningsmodeller av andra delsystem på plattformarna utvecklats inom AP6 inklusive hydraulsystem och reglersystem som bl.a. modellerats i Matlab/Simulink, se *Figur 2*.



Figur 2. Modell av reglersystem och hydraulik i Matlab/Simulink.

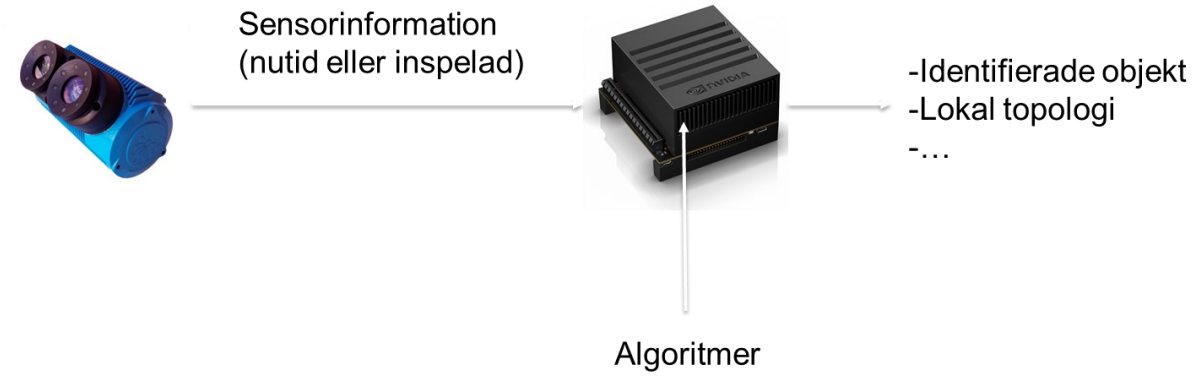
För att kunna utvärdera prestanda för testplattformen som helhet har även de kinetiska modellerna kombinerats med modellerna av regler- och hydraulsystemet genom sk. Co-simulering där olika simuleringsmjukvaror samverkar (se exempel i *Figur 3* med Co-simulering mellan Siemens NX och Matlab/Simulink).



Figur 3. Co-simuleringsuppställning mellan Siemens NX och Matlab/Simulink.

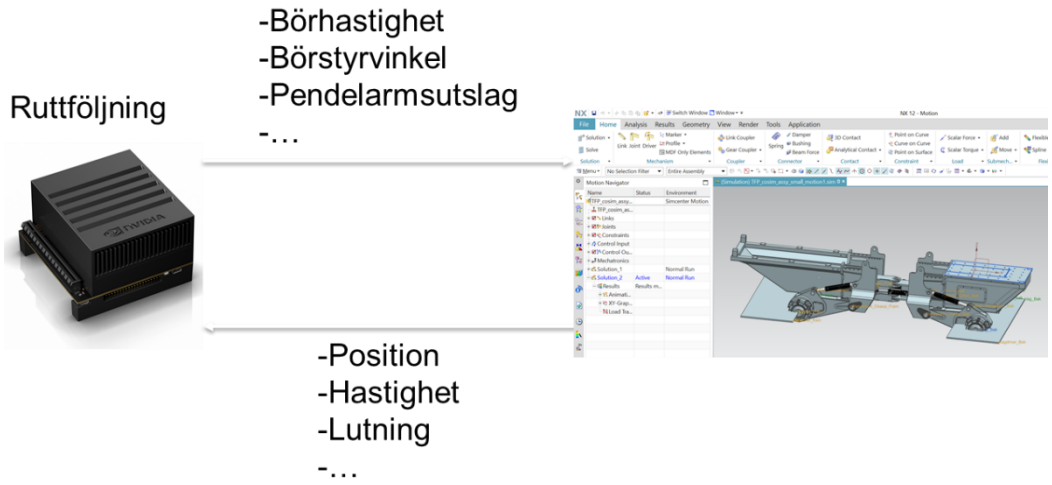
Mixade Testplattformar

Efterhand beslut om olika hårdvaror fattats t.ex. val av sensorer, grafikkort, styrdatorer etc. har mixade simuleringsmiljöer nyttjats. I detta läge när mognadsgraden är något högre (vissa korrekta hårdvaror på plats) kombineras fysiska hårdvaror i plattformen med virtuella modeller. I AP6 har sådana mixade testplattformar använts för att träna och validera detektorer. I *Figur 4* visas en sådan uppställning där ett grafikkort matas med sensordata (antingen inspelad eller realtidsdetekterad). Först tränar man detektorerna (kod på grafikkortet) med taggade bilder och därefter valideras detektorerna.



Figur 4. Mixad testplattform för utveckling och validering av detektorer

Mixade miljöer används även för att utveckla styralgoritmer. *Figur 5* visar en uppställning för utveckling av ruttföljningsalgoritmer. En regulator som följer en föreskriven rutt arbetar på ett grafikkort och skickar information om börvärden på t.ex. hastighet och styrvinkel till en virtuell kopia (kinetisk modell) som simulerar maskinens reaktion och återkopplar utfallet (position, hastighet etc.).



Figur 5. Mixad testplattform för utveckling av styrkod

Med dessa mixade miljöer kan olika korrekta hårdvaror testas och algoritmer utvecklas utan att behöva göra full integration på de fysiska testplattformarna.

Fysiska Testplattformar

Inom AP6 har även fysiska testplattformar av olika storlek nyttjats. *Figur 6* visar den fysiska plattformen som KTH utvecklat som en nerskalad version av Skogforsk fullskaliga skotare (XT28). Detta ger en möjlighet att starta tester av styrsystem etc. på KTH:s plattforms som därefter med minimala förändringar kan användas på XT28:an vilket är ett mycket effektivt arbetssätt. Plattformarna har aktiva och oberoende pendelarmar till samtliga hjul och har dessutom dubbla vridmidjor. KTH:s plattform är utrustad med flertalet nödvändiga sensorer (LiDAR, GNSS, Stereo RGB etc.) samt en arkitektur (hårdvaror och mjukvaror) för maskinens styr- och reglersystem. På XT28:an har de för AUTO2 utvalda sensorsystemen med tillhörande

databearbetningshårdvaror monterats och integrerats med maskinens befintliga styrsystem (som har en mer typisk arkitektur för kommersiella skogsmaskiner). XT28:an har även konfigurerats för att kunna fjärrstyras (se separat beskrivning i Arbetspaket 4).

Figur 6. Fysiska testplattformar på KTH (till vänster) och Skogforsk (till höger)

Vid LTU finns ytterligare en plattform som är dedikerad att användas till utveckling av autonoma arbetsmaskiner (se **Fel! Hittar inte referenskälla.**). Maskinen väger ca. 10 ton och kan därmed ses som en mindre skogsmaskin med kapabilitet att genomföra arbetsmoment i relevant miljö. Plattformen är modulär vilket gör konfigurering relativt enkel (dvs. byte av kontaktorgan, andra arbetsredskap, annan drivlina etc.). Plattformen är utrustad med en vridmidja och aktiv oberoende pendelarmsstyrning samt har en speciell utvald hårdvaru- och mjukvaruarkitektur som har god kompabilitet med olika utvecklingsmjukvaror vilket underlättar implementering.