



Intelligenta fordon off-road

Resultatsammanfattning och förslag för framtiden 2009-10-12

Intelligenta fordon off-road (IFOR) är en satsning vid Umeå universitet på forskning kring nya teknologier för styrning av mobila arbetsmaskiner. Satsning tillkom och har drivits i samarbete med skogsindustri och maskintillverkande industri samt Skogforsk och Sveriges lantbruksuniversitet. Detta dokument är en sammanställning av resultat fram till 2009 samt förslag för framtiden från IFORs styrelse

Ulf Edlund (ordf) – Umeå universitet, Urban Bergsten – Sveriges lantbruksuniversitet, Mats G Larson – Umeå universitet, Urban Nordmark – Sveaskog, Lennart Rådström – Skogforsk, Bengt-Arne Walldén – Komatsu Forest

samt adjungerade till styrelsen *Anton Shiriaev och Martin Servin – Umeå universitet.*

Huvudfinansiärer: Kempestiftelserna, Komatsu Forest, Sparbanksstiftelsen Norrland, Stiftelsen för strategisk forskning, Sveaskog, Vetenskapsrådet, Vinnova, Umeå universitet.



Umeå universitet
901 87 Umeå
Telefon 090-786 50 00
www.umu.se

Bakgrund och historik

Inom basnäringarna skog, gruva och processindustri finns komplexa produktionskedjor som involverar en rad avancerade arbetsmaskiner. Profilsatsningen *Intelligenta fordon off-road (IFOR)* syftar på teknikorienterad forskning kring hur maskinernas styrning, utformning och gränssnitt mot människan kan modifieras för att ge ökad produktivitet, kostnadseffektivitet, förbättrad arbetsmiljö samt miljöpåverkan. Tillämpningar återfinns även inom bygg- och anläggningssektorn, jordbruk, försvarsfordon och offshore-industri. Utrymme för stora förbättringar finns men komplexiteten i systemen och produktionskedjorna gör dessa svåra att nå. IFOR tillkom på initiativ från skogsindustrin och maskintillverkare och har drivits vid Umeå universitet i samarbete med Holmen Skog, Komatsu Forest, Skogforsk, Sveaskog och Sveriges lantbruksuniversitet (SLU). Satsningen inleddes 2001 med en donation från Komatsu Forest (då Partek Forest), Cranab och Kempestiftelserna som möjliggjorde installation av skogsmaskinkran och experimentering med kranpetsstyrning och automation. Satsningen utökades 2002 med ytterligare forskningsanslag från Kempestiftelserna för forskning kring "Autonom navigering" av skogsmaskin för transporterering under ledning av Dr. Thomas Hellström. Strategiskt beslut fattades att rekrytera en professor inom styr- och reglerteknik av komplexa mekaniska system, vilket resulterade i att Anton Shiriaev tillträdde som professor vid Umeå universitet 2003. Shiriaev gavs möjligheten att vidareutveckla forskningen kring kranstyrning genom anslag från Kempestiftelserna och Sveaskog för projektet "Smart kran för skogstillämpning" 2005-2008 och samtidigt anslag från Vetenskapsrådet och Umeå universitet för grundforskning inom det reglertekniska området. Kraninstallationen vid Umeå universitet tillfördes ny hårdvara och mjukvara för mer flexibel och systematisk forskning och utveckling. Metoder och experiment flyttade också gradvis över på verkliga skogsmaskiner samtidigt som Shiriaevs forskargrupp växte kraftigt i storlek. Under tiden hade även projektet "Autonom navigering" expanderat genom anslag från Vinnova, Kempestiftelserna samt mindre anslag från Land System Hägglunds (numera BAE Hägglunds), LKAB och Carl Tryggers stiftelse varvid även detta projekt bedrev allt mer experimentering i fält med fullskaliga skogsmaskiner. IFOR beviljades deltagande 2005 i det Nationella Programmet för Innovationssystem och Kluster av Vinnova, ISA och Nutek. Utveckling av IFOR som kluster och innovationscenter med aktiviteter för att stärka processen i att överföra kompetenser och idéer båda vägarna mellan akademi och näringsliv har fortsatt 2007-2009 genom ekonomiskt stöd från Sparbanksstiftelsen Norrland och ProcessIT Innovations. I och med detta kompletterades IFOR även med forskningsaktiviteter inom sensorseende, visualisering, bildbehandling och fordonssimulatorer samt studentprojekt i samarbete med det regionala näringslivet i allt större omfattning.

Sammanfattning av resultat

Satsningen har resulterat i etablering av teknikvetenskaplig forskning vid Umeå universitet och samarbete med Sveriges lantbruksuniversitet och utbildning av hög relevans för näringsgrenar viktiga i landet och i regionen – i synnerhet för det skogstekniska området. En forskningsinfrastruktur med avancerad instrumentering, teknikplattformar för datainsamling, analys, experimentering och metodutveckling för styrning och automation av mobila arbetsmaskiner har tillkommit. En rad forskare och studenter har fördjupat sig i teknikområdet och tagit fram nya lösningar och kunskaper i samverkan med det regionala näringslivet. De vetenskapliga och tekniska resultaten sammanfattas nedan under respektive projekt och bifogad publikationslista i form av 49 publikationer/tekniska rapporter varav 22 st har genomgått vetenskaplig granskning (peer review). Flera av publikationerna har presenterats vid de största internationella konferenserna inom området. Sammantaget har 12 disputerade forskare (varav 3 från SLU), 6 doktorander och ca 35 studenter i examensarbeten och projektkurser medverkat i IFOR-verksamhet. Minst 20 % av studenterna har fortsatt karriären inom detta teknikområde med anställning i industri eller universitet. En av doktoranderna deltar kurserna inom den nationella skogstekniforskarkolan FIRST och en doktorand ingår i Umeå universitets



Umeå universitet
901 87 Umeå
Telefon 090-786 50 00
www.umu.se

företagsforskarskola med Komatsu Forest och Sveaskog som värdföretag. Företag som deltagit i IFOR-projekt inkluderar Algoryx Simulations, BAE Hägglunds, Cranab, Indexator, Komatsu Forest, LKAB, Optronix, Oryx Simulation samt Skogforsk – det svenska skogsbrukets forskningsinstitutet. Sammanlagt har ca 25 företag deltagit aktiviteter arrangerade inom IFOR. På utbildningssidan märks satsningen genom tillkomst av avancerade profileringskurser inom reglerteknik och robotik, inrättande av mastersprogrammet *Robotik och reglerteknik* som hösten 2009 välkomnade 20-talet studenter. IFOR har också varit drivande i etableringen av avancerade projektkurser i samarbete med industri, t.ex. kursen *Design-Build-Test – projektkurs för ingenjörer*. Internationellt utbyte och samarbete har utvecklats med ledande forskargrupper vid Sungkyunkwan University (Suwon, Korea), Norwegian University of Science and Technology (Trondheim, Norge), Ben Gurion University (Beer Sheva, Israel). Forskarna inom Autonom navigering återfinns i ett av de två forskningsförslag som i hög konkurrens finns kvar i tävlan om EU:s 7:e ramprogramsatsning på "Automation and robotics for sustainable crop and forestry management" med totalbudget på ca 200 MSEK. I synnerhet den reglertekniska forskningen i *Control System Group* under ledning av Anton Shiriaev vid Institutionen för tillämpad fysik och elektronik har utvecklats mycket starkt, är högt vetenskapligt rankad och har idag en solid bas av medel för grundforskning. Detta intygas också av anslag från STINT för utbytesprogrammet mellan svenska och koreanska forskargrupper, anslag från SSF:s program för strategisk mobilitet mellan forskning och svensk industri samt UmUs *unga forskare-anslag* till Dr. L. Freidovich. IFOR-forskning återfinns i universitets förslag på strategiska satsningar inom teknikvetenskap, fundraisingkampanj samt i nyetablerade UMIT Research Lab. Trots de vetenskapliga och tekniska framgångarna, kraftig kompetensuppbyggnad och många insatser på idé- och kunskapsöverföring samt förslag på nya produkter och tjänster kan man notera att ännu har inga nya företag eller nya produkter realiserats.

Smart kran

Projektet har fokuserat på utveckling av tekniker och tekniska lösningar som möjliggör ny funktionalitet och (del-) automatisering av arbetsprocesser med kranar av den typen som är vanligt förekommande inom skogsbruket.

Resultaten inkluderar modellering och identifikation av de mekaniska och hydrauliska delsystemen i kranar på skotare och skördare. Modellerna inkluderar systemets inneboende friktion och hydromekaniska egenskaper samt dynamiska egenskaper i ventiler och elektronik. Algoritmer för rörelseplanering har utvecklats. Nya regleralgoritmer har utformats för att utföra planerade rörelser med modellbaserad styrning, analys och simulering av metoden. Regleralgoritmerna är av typen "closed-loop control" med "two-loop Model-Following Control" samt "cascade control". Regleringen tar hänsyn till icke-linjär friktion samt svängningar i hydrauliken baserad på sensordata för tryck och flöde i hydraulcylinders samt vinkel och position i kranens länkar. En plattform med sensorer, mätmetoder och mjukvarusystem för tillförlitlig lågnivå- och högnivå-styrning av kranarmar i påfrestande miljöer har tagits fram. Med denna plattform har experiment med framtagna metoder och modeller genomförts på nedskalad inomhusprototyp av skotarkran i Smart Crane Lab vid Institutionen för tillämpad fysik och elektronik samt på fullskalig skotare (Valmet 830) och skördare (Valmet 911).

Projektet visar följande:

- att förprogrammerade kranrörelser kan datorstyras med minst lika hög precision och hastighet som för en erfaren mänsklig operatör. Styrningen av förprogrammerade rörelser kan göras tidsberoende.
- realisering av kranspetsstyrning, punkt-till-punkt-styrning, fjärrstyrning över kommunikationslänk via virtual-reality-gränssnitt för visualisering



Umeå universitet
901 87 Umeå
Telefon 090-786 50 00
www.umu.se

- delautomatiserad lastning av stockar förbi kända hinder. Med *shared control* (sv. *delad styrning*) mellan förare och dator har mjuka övergångar mellan helautomatiserad, delautomatiserad och manuell styrning realiserats. Preliminära tidstudier med erfarna och oerfarna förare visar att för oerfarna förare sker mer än en fördubbling i produktivitet på lastningsmomentet. För erfarna förare ligger vinsten i mental avlastning.
- *modellbaserad rörelse-planering och styrning* ger insikt i hur man kan utnyttja maskinens fulla potential – något som är i praktiken omöjligt för en människa fullt ut. Det finns väsentligt utrymme för att manövrera kranen effektivare än idag med avseende på hastighet eller energiförbrukning. Resultaten kan också tillämpas för att träna förare att själva finna denna förbättringspotential och att ta fram en än mer optimal krankonstruktion än dagens.
- ännu finns inga sensorer för kranens länkar och hydraulcylinders med tillräcklig robusthet, pris och noggrannhet som krävs för den metod som används i projektet. Detta betyder att kranautomation som bygger på *closed-loop control* med denna typ av sensordata inte är kommersiellt realiserbar för närvarande.
- styrning av förplanerade rörelser med *open-loop control* utan sensordata för kranpositioner fungerar under begränsad tid. Efter viss tid, 5-10 s beroende på vilken rörelse, behöver kranens position omkalibreras med någon metod (*soft sensor*) för att reducera feldrift i kranens position.

Forskarna inom *Smart kran* återfinns i *Control System Group* vid *Institutionen för tillämpad fysik och elektronik* och inkluderar prof. Anton Shiriaev, Dr. Leonid Freidovich, Ph.Lic. Pedro La Hera, Dr. Ian Manchester, Ph. Lic. Uwe Mettin, Daniel Ortiz, Yeon-Chool Park, Kalle Prorok, Martin Servin, Simon Westerberg.

Autonom navigering

Syftet med arbetet har varit att utveckla en prototyp av en förarlös skogsmaskin som transporterar virke från avverkningsområdet till närmaste väg för vidare transport. Fokus har legat på några av de komponenter som krävs för att utföra autonom navigering, vilket innebär att känna av omgivningen och kunna förflytta sig säkert i en dynamisk skogsmiljö. Utvecklingsarbetet har skett i tre olika implementationsfaser. Från en simulator, via en mindre robot, till den slutliga plattformen, en fullstor skogsmaskin från Komatsu Forest. Arbetet med att flytta hård- och mjukvara till den verkliga skogsmaskinen avslutades under hösten 2005 och en demonstration med en fullstor självgående skogsmaskin genomfördes i slutet av december 2005.

Projektet har visat att

- det är möjligt att konstruera självgående fordon för navigering i skogsmiljö. Demonstration med en fullstor självgående skogsmaskin genomfördes i slutet av december 2005.
- systemet kan lära sig att följa en demonstrerad rutt. En ny path-tracking-algoritm (*follow-the-past*) har utvecklats i projektet som ger bättre resultat än konventionella algoritmer.
- noggrannheter på centimeternivå är möjligt att uppnå med hjälp av precisions-GPS kombinerat med metoder för s.k. död räkning baserad på hjulodometri och gyro-data.
- kortare bortfall av GPS-signal, vilket är vanligt förekommande i tät skog, kan hanteras.



- systemet kan undvika hinder eller på egen hand finna en genare rutt genom att en simulator kör i bakgrunden med algoritm för ruttplanering.
- de stora utmaningarna innan autonoma skogsfordon på ett säkert sätt kan användas i professionell drift handlar framför allt om robust detektering av hinder och markegenskaper runt fordonet.

Forskarna som medverkat inom *Autonom navigering* återfinns framförallt i *Intelligent Robotics Group* vid *Institutionen för datavetenskap* och inkluderar Dr. Thomas Hellström, Dr. Fredrik Georgsson, Kalle Prorok, Ph. Lic. Ola Ringdahl samt prof. Tomas Nordfjell (SLU) och Iwan Wästerlund (SLU).

Övrigt

Insatser för att bredda forskningsbasen inom IFOR och initiera nya samarbeten mellan akademi och industri har genererat ett antal vetenskapliga och tekniska resultat. En simulatorplattform för experimentering och demonstrering av nya maskinkoncept och styrmetoder har utvecklats. Plattformen är baserad på visuell interaktiv fysikbaserad simulering i 3D som återfinns också i kommersiella träningsimulatorer. Med denna plattform utvecklades första en första version av semi-autonom lastning med "shared control", som sedan överfördes till fysisk kraninstallation (se ovan). Plattformen har också använts för virtuella experiment med nya maskinkoncept, t.ex. Wildhog (Andreas F Johansson, Designhögskolan och Bräcke Forest) och används för experiment med två-armad skördare för geometrisk gallring i ungskog (SLU) samt för studier kring ruttoptimering av skotare. Metoder för bildbehandling för att i realtid identifiera objekt av trästocks-karaktär, inklusive storlek och orientering, har utvecklats. Experiment med 3D-rekonstruktion av terrängmiljö med kamerabaserad teknik och laserscannern har genomförts samt fjärrstyrning av 4-hjuling med VR-gränssnitt som visar den rekonstruerade digitala kartan. I pågående uppföljningsprojekt används tekniken för att genomföra 3D-rekonstruktion av slutavverkningsmiljö för att generera indata till studier av ruttoptimeringsalgoritmer för skotare. Metod för autonom navigering baserad på laserscannerdata ursprungligen utvecklad för gruvgångar har vidareutvecklats för utomhus och skogsmiljö. Bland resultaten finns en metod för att urskilja fria ytor, rörliga föremål samt särskilja mellan snöfall och fasta hinder. En elektrisk rullstol från Permobil AB har donerats för fortsatt experimentering. Med ett mindre experimentfordon (en "miniatyr-SEP") medverkar UmU i den europeiska studenttävling SICK Robot Day 2009. Flera olika 3D-kameratekniker har experimenterats med för bl.a. lokalisera stenblock för automatisering av skutknackning samt lokalisering av stockar för fjärrstyrning av skotarkran.

Forskarna som medverkat i ovan nämnda aktiviteter inkluderar Dr. Niclas Börllin, Anders Hansson, Dr. Sven Rönnbäck, Dr. Martin Servin samt Prof. Urban Bergsten (SLU).

Förslag för framtiden

Genom IFOR-satsningen finns idag hög vetenskaplig kompetens, kunskap, metodik och utrustning för att analysera och optimera styrning av skogsmaskiner och liknande system. Projekten "Autonom navigering" och "Smart kranstyrning" är genomförda och projektet "Utveckling av IFOR som kompetenskluster och innovationssystem" är slutfört dec 2009.

IFORs styrelse föreslår följande.

Förslag till industrin:

1. forskningsresultaten inom *Smart kranstyrning* visar mognad för nästa steg mot kommersialisering. Skogsföretag, maskintillverkare och underleverantörer föreslås formera konsortium att realisera prototypmaskin med en uppsättning semi-autonoma kranfunktioner



Umeå universitet
901 87 Umeå
Telefon 090-786 50 00
www.umu.se

baserade på *open-loop-styrning* med *shared control* samt att genomföra omfattande tester i fält för utvärdering och förfining av systemet

2. att engagera sig i utvecklings- och implementationsprojekt för att tillgodogöra sig den kompetens och kunskap som IFOR-satsningen har genererat

Förslag till Umeå universitet – Teknisk- naturvetenskaplig fakultet:

1. att fortsatt stödja forskningsverksamhet inom IFOR-området och i synnerhet inom kranstyrning. Särskilt strategiskt är att säkra kontinuiteten inom den reglertekniska forskningen genom rekrytering av lektor, att bedriva forskning inom "*optimal design and motion planning of hydraulic forestry crane*" samt utrustning och experimentverksamhet med nya hydrauliksystem och överföring av resultat från lab till maskin.

Publikationslista

- [1] U. Mettin, S. Westerberg, A. Shiriaev, and P. La Hera. *Motion analysis and trajectory replanning of human-operated manipulators: Application to a forestry crane*. In Proc. 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (to appear), pp. 1–6, St. Louis, USA, Oct. 2009.
- [2] U. Mettin, P. La Hera, D. Ortiz Morales, A. Shiriaev, L. Freidovich, and S. Westerberg. *Trajectory planning and time-independent motion control for a kinematically redundant hydraulic manipulator*. In Proc. 14th International Conference on Advanced Robotics, pp. 1–6, Munich, Germany, June 2009.
- [3] P. La Hera, U. Mettin, S. Westerberg, and A. Shiriaev. *Modeling and control of hydraulic rotary actuators used in forestry cranes*. In Proc. 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1315–1320, Kobe, Japan, May 2009.
- [4] Hellström, T. and Ringdahl, O. (2009). *Real-time path planning using a simulator-in-the-loop*. Int. J. Vehicle Autonomous Systems, 7(1/2):56–72.
- [5] S. Rönnbäck, Å. Wernersson, *Range Statistics and Suppressing Snowflakes Detects for Laser Range Finders in Snowfall*, Selected publications from IEEE IS'2008 conference, Springer-Verlag, 2009
- [6] S. Rönnbäck, *Map Building and Feasible Paths for a Wheelchair amid Circular Objects*, Swedish Workshop on Autonomous Robots, Västerås, Sweden, 2009
- [7] A. Hansson and M. Servin, *Semi-autonomous Tasks with Shared Control for Redundant Forwarder Cranes*, in preparation, Umeå University, 2009.
- [8] S. Rönnbäck, S. Westerberg, K. Prorok *CSE+: Path Planning amid Circles*, ICARA 2009, Wellington, New Zealand, February 10-12, 2009.
- [9] Hellström, T., Lärkeryd, P., Nordfjell, T., and Ringdahl, O. (2009). *Autonomous forest vehicles - envisioned and state of the art*. Int. Journal of Forest Engineering, 20:33–38.
- [10] P. La Hera, U. Mettin, I. Manchester, and A. Shiriaev. *Identification and control of a hydraulic forestry crane*. In Proc. 17th IFAC World Congress, pp. 2306–2311, Seoul, Korea, July 2008.
- [11] Ringdahl, O. and Hellström, T. (2008). *Autonomous Forest Machines – Techniques and Algorithms for Unmanned Vehicles*. VDM Verlag Dr. Müller. ISBN 978-3-639-04343-3.
- [12] Ali, W., Georgsson, F., and Hellström, T. (2008). *Visual tree detection for autonomous navigation in forest environment*. In IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pages 560–565, Eindhoven, Holland.
- [13] Hellström, T., Johansson, T., and Ringdahl, O. (2008a). *A java-based middleware for control and sensing in mobile robotics*. In International Conference on Intelligent Automation and Robotics 2008 (ICIAR'08), pages 649–654, San Fransisco, USA.
- [14] Hellström, T., Lärkeryd, P., Nordfjell, T., and Ringdahl, O. (2008b). *Autonomous forest machines - past, present and future*. Technical Report UMINF-08.06, Department of Computing Science, Umeå University.



- [15] Hellström, T. and Ringdahl, O. (2008). *Path planning for off-road vehicles with a simulator-in-the-loop*. Technical Report 08.07, Department of Computing Science, Umeå University.
- [16] O. Ringdahl, *Förstudie om 3D-karthantering i fjärrstyrning och autonom navigering*, Pre-study report, Umeå University, 2008.
- [17] T. Hellström, O. Ringdahl, I. Wästerlund, *Estimating wheel slip for a forest machine*, Pre-study report, Umeå University, 2008.
- [18] S. Rönnbäck, *Detection of on-coming cars in range data*, IEEE International Conference on Intelligent Systems, Varna, 2008
- [19] Pedro M. La Hera, U. Mettin, A. Shiriaev, S. Westerberg, *Identification-based Modeling and Control of Hydraulically actuated Forestry Cranes*, IFAC 2008, Seoul, South Korea, July 6-12, 2008
- [20] S. Westerberg, I. Manchester, U. Mettin, P. La Hera, and A. Shiriaev. *Virtual environment teleoperation of a hydraulic forestry crane*. In Proc. 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 4049–4054, Pasadena, USA, May 2008.
- [21] A. Hansson, *Shared Control of Mechanical Systems in Virtual Environments*, Master thesis, Umeå University, Umeå, Sweden. 2008. Master's degree in computing science.
- [22] M. Servin, A. Backman, K. Bodin, U. Bergsten, D. Bergström, B. Löfgren, T. Nordfjell, I. Wästerlund, *Visual Simulation of Machine Concepts for Forest Biomass Harvesting*, VRIC '08 Laval Virtual: 10th Virtual Reality International Conference, 2008.
- [23] Ringdahl, O. (2007). *Techniques and Algorithms for Autonomous Vehicles in Forest Environment*. Licentiate thesis, Department of Computing Science, Umeå University. ISBN 978-91-7264-373-4.
- [24] Hellström, T., Johansson, T., and Ringdahl, O. (2007). *A software framework for control and sensing in mobile robotics*. Technical Report UMINF 07.05, Department of Computing Science, Umeå University.
- [25] F. Nordfelth, *Observing rotational dynamics using image analysis*, technical report, Umeå University, 2007.
- [26] S. Westerberg, *Virtual Environment for Teleoperation of Forwarder Crane*, Master thesis, Umeå University, Umeå, Sweden. 2007. Master's degree in computing science.
- [27] M. Servin, ISIMOR - *Simulation of off-road vehicles - A pre-study for the use of visual interactive 3D simulation in development of new off-road vehicles*, Umeå University, 2007.
- [28] Hellström, T. and Ringdahl, O. (2006). *Follow the past - a path tracking algorithm for autonomous vehicles*. Int. J. Vehicle Autonomous Systems, 4(2-4):216–224.
- [29] Ringdahl, O. and Hellström, T. (2006). *Autonomous navigation in forest environment*. In Proceedings from the 23rd Annual workshop of the Swedish Artificial Intelligence Society (SAIS06).
- [30] Vestlund, K. and Hellström, T. (2006). *Requirements and system design for a robot performing selective cleaning in young forest stands*. Journal of Terramechanics, 43:505–525.
- [31] Hellström, T., Ringdahl, O., and Siddiqui, A. (2006). *Path tracking and localization in forest environment*. In Proceedings of the Israel Conference on Robotics (ICR06).
- [32] Hellström, T., Johansson, T., and Ringdahl, O. (2006). *Development of an Autonomous Forest Machine for Path Tracking*, volume 25 of Springer Tracts in Advanced Robotics, pages 603 – 614. Springer, New York, NY, USA, field and service robotics: results of the 5th international conference edition. ISBN 978-3-540-33452-1.
- [33] E. Billing, T. Hellström, *Detection, classification, and modeling of rocks for automation of a rock-breaking system*, ProcessIT pre-study report, 2006.
- [34] E. Carlsson, *Modeling Hydrostatic Transmission in Forest Vehicle*, Master's thesis, Linköping University, 2006.
- [35] Hellström, T. and Ringdahl, O. (2005a). *Autonomous path tracking using recorded orientation and steering*



commands. In Proceedings from Towards Autonomous Robotic Systems (TAROS05), pages 81–87, London, UK. ISBN 0-905247-03-5.

- [36] Hellström, T. and Ringdahl, O. (2005b). *Follow the past - a path tracking method using recorded orientation and steering commands*. In The Third Swedish Workshop on Autonomous Robotics (SWAR05).
- [37] Hellström, T. and Siddiqui, A. (2005). *Laser-based localization of vehicles and robots in natural and unstructured environments*. Technical report, Department of Computing Science, Umeå University.
- [38] Johansson, T. and Hellström, T. (2005). *A software infrastructure for sensors, actuators, and communication*. In In Proceedings of The Third Swedish Workshop on Autonomous Robotics (SWAR05).
- [39] Georgsson, F., Hellström, T., Johansson, T., Prorok, K., Ringdahl, O., and Sandström, U. (2005). *Development of an autonomous path tracking forest machine — a status report*. Technical Report UMINF 05.08, Department of Computing Science, Umeå University.
- [40] Johan Häggblad, *Potential application of a commercial mono-pulse radar*, Master thesis, Umeå University, Umeå, Sweden. 2005. Master's degree in engineering physics.
- [41] Sandström, U. (2005). *Design and implementation of an obstacle detection subsystem in an autonomous off-road vehicle*. Master's thesis, Department of Computing Science, Umeå University.
- [42] Siddiqui, A. (2005). *2d ladar based localization - searching for best applicable methodology*. Master's thesis, Department of Computing Science, Umeå University.
- [43] U. Mettin. *Control Design and Friction Compensation for a Hydraulic Forestry Crane*. Master thesis, Umeå University, Umeå, Sweden, Aug. 2005. Degree: Master of Science.
- [44] P. La Hera. *Modelling and Simulation of Nonlinear Dynamical Systems*. Master thesis, Umeå University, Sweden 2005. Degree of Master of Science in Applied Electronics with major in Control Systems.
- [45] Hellström, T. and Ringdahl, O. (2004). *Follow the past — a path tracking algorithm for autonomous forest vehicles*. Technical Report UMINF 04.11, Department of Computing Science, Umeå University.
- [46] Ringdahl, O. (2003). *Path tracking and obstacle avoidance for forest machines*. Master's thesis, Department of Computing Science, Umeå University.
- [47] Martin Lundgren, *Path Tracking and Obstacle Avoidance for a Miniature Robot*, Master thesis, Umeå University, Umeå, Sweden. 2003. Master's degree in computing science.
- [48] K. Prorok, *Crane-Tip Control of a Hydraulic Crane: A New Approach*, report, Umeå University 2003.
- [49] Hellström, T. (2002). *Autonomous navigation for forest machines*. Technical Report UMINF 02.13, Department of Computing Science, Umeå University.

Relaterade publikationer:

- [50] L.B. Freidovich, A. Robertsson, A.S. Shiriaev, and R. Johansson, *LuGre-model-based friction compensation*, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2010, 7 pages.
- [51] A.S. Shiriaev, L.B. Freidovich, and S.V. Gusev, *Computing a transverse linearization for mechanical systems with two and more passive degrees of freedom*, IEEE Transactions on Automatic Control, 2010, vol. 55, no. 4, 13 pages.
- [52] U. Mettin, P. La Hera, A. Shiriaev, and L. Freidovich. *Parallel elastic actuators as control tool for preplanned trajectories of underactuated mechanical systems*. The International Journal of Robotics Research (in press), doi: 10.1177/0278364909344002:1–13, 2009.
- [53] A.S. Shiriaev and L.B. Freidovich, *Transverse linearization for hybrid controlled mechanical systems with one passive link*, IEEE Transactions on Automatic Control, 2009, vol. 54, no. 12, 6 pages.



- [54] U. Mettin, P. La Hera, A.S. Shiriaev, and L.B. Freidovich, *Reducing control efforts for preplanned motions by parallel elastic actuators*, International Journal of Robotics Research, 2009, vol. 28, 13 pages
- [55] U. Mettin. *Applications of the Virtual Holonomic Constraints Approach: Analysis of Human Motor Patterns and Passive Walking Gaits*. Licentiate thesis, Umeå University, Umeå, Sweden, Oct. 2008.
- [56] P. La Hera, *Contributions to Motion Planning and Orbital Stabilization: Case studies: Furuta Pendulum swing up, Inertia Wheel oscillations and Biped Robot walking*, Licentiate thesis, Umeå University, Umeå, Sweden, Oct. 2008.
- [45] S. Westerberg, U. Mettin, A.S. Shiriaev, L.B. Freidovich, and Y. Orlov, *Motion planning and control of a simplified helicopter model based on virtual holonomic constraints*, in Proc. of the 14th International Conference on Advanced Robotics (ICAR'09), June 22 -- 26, 2009, Munich, Germany.
- [46] A.S. Shiriaev, R. Johansson, A. Robertsson, and L.B. Freidovich, *Separation principle for a class of nonlinear systems augmented with observers*, in Proc. of the 17th IFAC World Congress (IFAC WC'08), July 6 -- 11, 2008, Seoul, Korea, pp. 6196–6201.

