

Stabilitet och regulatorstrukturer för självkörande fordon

Publik rapport



Författare: Daniel Axehill

Datum: 2021-01-30

Projekt inom Trafiksäkerhet och automatiserade fordon

FFI Fordonsstrategisk
Forskning och
Innovation

VINNOVA

Energimyndigheten

TRAFIKVERKET

FKG

VOLVO

SCANIA

VOLVO

Innehållsförteckning

1 Sammanfattning	3
2 Executive summary in English.....	3
3 Bakgrund.....	4
4 Syfte, forskningsfrågor och metod	4
5 Mål	4
6 Resultat och måluppfyllelse	4
7 Spridning och publicering	6
7.1 Kunskaps- och resultatspridning	6
7.2 Publikationer.....	7
8 Slutsatser och fortsatt forskning	9
9 Deltagande parter och kontaktpersoner.....	9

Kort om FFI

FFI är ett samarbete mellan staten och fordonsindustrin om att gemensamt finansiera forsknings- och innovationsaktiviteter med fokus på områdena Klimat & Miljö samt Trafiksäkerhet. Satsningen innebär verksamhet för ca 1 miljard kr per år varav de offentliga medlen utgör drygt 400 Mkr.

För närvarande finns fem delprogram; Energi & Miljö, Trafiksäkerhet och automatiserade fordon, Elektronik, mjukvara och kommunikation, Hållbar produktion och Effektiva och uppkopplade transportsystem. Läs mer på www.vinnova.se/ffi.

1 Sammanfattning

Detta projekt har studerat rörelseplanering för tunga autonoma fordon med ett eller flera släp. Speciellt fokus har lagts på algoritmer som klarar att backa med släp av formen dolly och trailer. Fokus har dels varit att beräkna rörelseplaner som innehåller backande rörelser för denna konfiguration, men också hur dessa ska exekveras på ett stabilt säkert sätt. Projektets resultat återfinns inom rörelseplanering och återkoppling för långa kombinationer av dragfordon och släpvagnar som rör sig med låga hastigheter i stängda och ostrukturerade miljöer. Resultaten inkluderar utveckling av ramverk för rörelseplanering och återkoppling, strukturerade designverktyg för att garantera sluten loopstabilitet och experimentell validering av de föreslagna lösningarna genom simuleringar, laboratorie- och fältförsök. Även om den primära användningen i detta arbete är lastbilar, kan många av de föreslagna tillvägagångssätten med vissa justeringar också användas för andra system, som drönare och fartyg. Arbetet i projektet har utförts i nära samarbete mellan LiU och Scania.

2 Executive summary in English

During the last decades, improved sensor and hardware technologies as well as new methods and algorithms have made self-driving vehicles a realistic possibility in the near future. At the same time, there has been a growing demand within the transportation sector to increase efficiency and to reduce the environmental impact related to transportation of people and goods. Therefore, many leading automotive and technology companies have turned their attention towards developing advanced driver assistance systems and self-driving vehicles.

Autonomous vehicles are expected to have their first big impact in closed environments, such as mines, harbors, loading and offloading sites. In such areas, the legal requirements are less restrictive and the surrounding environment is more controlled and predictable compared to urban areas. Expected positive outcomes include increased productivity and safety, reduced emissions and the possibility to relieve the human from performing complex or dangerous tasks. Within these sites, tractor-trailer vehicles are frequently used for transportation. These vehicles are composed of several interconnected vehicle segments, and are therefore large, complex and unstable while reversing. This project addresses the problem of designing efficient motion planning and feedback control techniques for such systems.

The results from this project are within the area of motion planning and feedback control for long tractor-trailer combinations operating at low-speeds in closed and unstructured environments. They include development of motion planning and feedback control frameworks, structured design tools for guaranteeing closed-loop stability and experimental validation of the proposed solutions through simulations, lab and field experiments. Even though the primary application in this work is tractor-trailer vehicles, many of the proposed approaches can with some adjustments also be used for other systems, such as drones and ships.

The developed sampling-based motion planning algorithms are based upon the probabilistic closed-loop rapidly exploring random tree (CL-RRT) algorithm and the deterministic lattice-based motion planning algorithm. It is also proposed to use numerical optimal control offline for precomputing libraries of optimized maneuvers as well as during online planning in the form of a warm-started optimization step.

To follow the motion plan, several predictive path-following control approaches are proposed with different computational complexity and performance. Common for these approaches are that they use a path-following error model of the vehicle for future predictions and are tailored to operate in series with a motion planner that computes feasible paths. The design strategies for the path-following approaches include linear quadratic (LQ) control and several advanced model predictive control (MPC) techniques to account for physical and sensing limitations. To strengthen the practical value of the developed techniques, several of the proposed approaches have been implemented and successfully demonstrated in field experiments on a full-scale test platform. To estimate the vehicle states needed for control, a novel nonlinear observer is evaluated on the full-scale test vehicle. It is designed to only utilize information from sensors that are mounted on the tractor, making the system independent of any sensor mounted on the trailer.

3 Bakgrund

Under de senaste decennierna har förbättrad sensor- och hårdvaruteknik samt nya metoder och algoritmer gjort självkörande fordon till en realistisk möjlighet inom en snar framtid. Tack vare denna teknikförbättring har många ledande bil- och teknikföretag riktat sin uppmärksamhet mot att utveckla avancerade förarassistanssystem (ADAS) och självkörande fordon. Autonoma fordon förväntas först slå igenom i slutna områden, såsom gruvor, hamnar och lastnings/lossningsplatser. I sådana områden är lagkraven mindre restriktiva och den omgivande miljön är mer kontrollerad och förutsägbar jämfört med stadsområden. Förväntade positiva resultat inkluderar ökad produktivitet och säkerhet, minskade utsläpp och möjligheten att befria människan från att utföra komplexa eller farliga uppgifter. Inom dessa platser används olika kombinationer av lastbilar och släpvagnar för att transportera material. Dessa system består av flera sammankopplade moduler och är sålunda stora och instabila vid backning. Detta projekt behandlar problemet med att utforma effektiva ramverk för rörelseplanering och reglering för sådana system. Ett av delmålen är att skapa en fullskalig demonstrator.

4 Syfte, forskningsfrågor och metod

Det övergripande syftet med projektet har varit att utveckla ramverk, teori och algoritmer för reglering och planering av autonoma tunga fordon med släp i ostrukturerade miljöer. Som proof-of-concept har en fullskalig demonstrator utvecklats. Forskningsfrågorna som primärt studerats är hur ett ramverk för att lösa dessa problem kan se ut, hur stabilitet kan garanteras för dessa system, hur lattice-baserade rörelseplanerare kan användas för dessa (avancerade) system, hur man drastiskt kan sänka utvecklingstiden för dessa typer av planerare för nya plattformar även generellt, hur sökbaserade rörelseplanerare kan kombineras med numerisk optimal styrning, hur den banföljande regulatorn explicit kan ta hänsyn till icke-triviala sensorbegränsningar, samt hur ett praktiskt fungerande system för autonom backning för tunga fordon med släp kan se ut. I vissa frågeställningar har ett godtyckligt antal trailers betraktats istället för bara (det mycket vanliga) specialfallet dolly och trailer. Metoden som använts i projektet har varit att praktiskt motiverade frågeställningar först har studerats teoretiskt, sedan i simulering, sedan i småskalig demonstrator och slutligen i fullskalig demonstrator. Arbetssättet har möjliggjort återföring av nyfunna praktiska frågeställningar för att styra prioriteringar och har möjliggjorts tack vare ett väl fungerande samarbete med Scania. Doktoranden i projektet har haft möjlighet att arbeta tillsammans med andra doktorander i projektledarens forskargrupp inom rörelseplanering vid LiU, inte minst med doktorander inom WASP, vilket är en av flera orsaker till projektets produktivitet. Även doktoranden i det här projektet har varit affilierad WASP-doktorand.

5 Mål

Målen med projektet, så som de angavs i projektansökan, är att

- I. Utveckla teori och metoder som möjliggör reglering av autonoma fordon i komplexa miljöer med a priori garanterad stabilitet för planeraren och för regleringen för banföljning.
- II. Utveckla teori och metoder som möjliggör planering och reglering trots osäkerheter och variationer i fordonskonfigurationen, exempelvis trailers längd eller fordonets massa.
- III. Utveckla den för området traditionella regulatorstrukturen med kaskadreglering med planeraren som fristående överordnad regulator och banföljaren som fristående underordnad regulator, med syftena att dels förbättra prestanda och dels att minska utvecklingsarbetet som krävs då ett nytt system byggs upp och parametersätts.
- IV. Utveckla metoder som möjliggör planering och reglering för autonom backning med trailer och utvärdera detta på en demonstrator i praktiken.

6 Resultat och måluppfyllelse

Huvudresultaten från det här projektet inkluderar för det första en kaskadregulator för en backande lastbil med dolly och trailer. De instabila tillstånden i systemet stabiliseras i cirkulära jämviktskonfigurationer med hjälp av en parameterstyrd linjärvadratisk (LQ) regulator tillsammans med en pure-pursuit regulator på en högre nivå som

följer styckvis linjära referensbanor. Kaskadregulatorn används sedan i en rörelseplanerare av RRT-typ och det kompletta ramverket för rörelseplanering och reglering demonstreras på ett mindre testfordon. Detta resultat bidrar till uppfyllelse av mål I och IV.

För det andra har en banföljande regulator för backande lastbil med dolly och trailer föreslagits för fallet när den erhållna rörelseplanen är kinematiskt tillåten. Systemets reglerfel modelleras i termer av deras avvikelse från den nominella banan och en stabiliserande LQ-regulator med framkoppling är utformad baserat på linjärisering av reglerfelsmodellen. Stabiliteten hos det slutna systemet garanteras genom att kombinera global optimering, teori från linjära differentiella inklusioner (LDI) och tekniker från linjära matrisolikheter (LMI). Detta resultat bidrar till uppfyllelse av mål I och IV. Resultatet kan principiellt hjälpa till att uppfylla mål II (robust stabilitet).

För det tredje har ett systematiskt ramverk utvecklats för att analysera stabiliteten hos det slutna systemet som består av ett reglerat fordon och en regulator, som exekverar en rörelseplan beräknad av en lattice-baserad planerare. När denna typ av rörelseplanerare används visas att slutna systemet kan modelleras som ett icke-linjärt hybridsystem. Baserat på detta presenteras en ny metod för att analysera beteendet hos banföljningsfelet, hur man utformar regulatorn och hur man potentiellt kan införa begränsningar för rörelseplaneraren för att garantera att banföljningsfelet är begränsat och avtar mot noll. Detta resultat bidrar till uppfyllelse av mål I och IV.

För det fjärde har ett nytt ramverk för optimering av rörelseprimitiver i lattice-baserade planerare introducerats. Genom att introducera något som vi kallar för manövrer kan de specifika rörelserna för olika plattformar enkelt beräknas. Detta reducerar signifikant ingenjörstiden det tar att utveckla en rörelseplanerare för ett visst system. Det bidrar också till att rörelseprimitiverna enkelt och automatisk kan uppdateras om förhållandena eller plattformen ändras. Detta resultat bidrar till uppfyllelse av mål II och III.

För det femte har vi introducerat en ny kombination av sökbaserade rörelseplanerare och numerisk optimal styrning. Den bygger på att en sökbaserad planerare först beräknar en preliminär suboptimal men kinematiskt tillåten bana till målet. Därefter, utgående från den preliminära lösningen, kan numerisk optimal styrning antingen appliceras på hela horisonten direkt, eller så kan den appliceras med glidande horisont där en kortare horisont glider över och förbättrar den preliminära lösningen från den sökbaserade metoden. Vi har bevisat att tvåstegsmetoden kommer att konvergera mot målet förutsatt att den sökbaserade metoden åtminstone hittar en tillåten lösning. En viktig del i arbetet är att beskriva vikten av att använda samma målfunktion, både i första och andra beräkningssteget. I experiment visar vi att denna kombination kraftigt förbättrar lösningar från bara en sökbaserad metod, vilket är det som man ofta tidigare har använt, ibland följt av ett "smoothing"-steg som inte optimerar den ursprungliga målfunktionen. Detta resultat bidrar till uppfyllelse av mål I och III.

För det sjätte har parameterskattning av potentiellt okända trailerlängder studerats genom att utöka ett EKF med dessa parametrar för skattning av dem. Vidare har även metoder baserat på djupinlärning studerats för att end-to-end skatta dollyns och trailers vinkel gentemot dragbilen, vilket visade sig fungera även om släpet har en oregelbunden yta mot dragbilen. Dessa resultat bidrar till uppfyllelse av mål II.

För det sjunde har sensormedveten banföljande reglering introducerats. Detta innebär att den banföljande regulatorn tar hänsyn till begränsningar i (främst) avancerade sensorer. Man tar alltså specifikt hänsyn till hur systemet kan regleras för att tillståndet för regleringen ska kunna skattas. Specifikt studeras här vilka områden en LIDAR monterad baktill på en lastbil mot en dolly och trailer kan få tillförlitliga mätningar och detta icke-triviala område modelleras med mixed-integer bivillkor. Det visas också att förenklingar av dessa ursprungliga icke-konvexa områden också kan användas, med något sämre prestanda. Detta resultat bidrar till uppfyllelse av mål I och IV, men kan också ses som en utökning av projektet baserat på den erfarenhet vi fått under projektets gång.

I det åttonde huvudresultatet har en komplett lösning för rörelseplanering och reglering av lastbil med dolly och trailer presenterats och implementerats. En lattice-baserad rörelseplanerare har föreslagits, där en ny parameterisering av fordonets tillståndsrum föreslås för att minska planeringstiden online. Ett resultat som bygger på tidssymmetri har presenterats som förbättrar den numeriska stabiliteten hos den numeriska optimala styrlösaren som används för att generera rörelseprimitiv. Dessutom har en icke-linjär observatör för tillståndsskattning utvecklats som endast använder information från sensorer som är monterade på lastbilen,

vilket gör systemet oberoende av ytterligare sensorer på släpet. Det föreslagna ramverket har implementerats på en fullskalig lastbil med dolly och trailer. Denna används för att presentera resultat från en serie fältförsök. Detta resultat bidrar till uppfyllelse av mål I, III och IV.

I stora drag har mål I, III och IV nåtts. Sättet som vi först tänkte uppnå det på har i vissa fall förändrats och i vissa fall har delar av målet justerats. Vi har inte studerat stabilitet för planeraren i sig applicerat på ett system, utan istället kombinerat den med optimal styrning och sedan gjort resonemang kring stabilitet. Mål II har inte studerats i den omfattning och så explicit som först planerades. Den primära anledningen är att det krävdes mer arbete inom de andra områdena än vad vi först räknade med, och många viktiga idéer inom dessa områden som både hade praktiskt nytta och kunde publiceras dök upp under arbetets gång. Arbete har dock t.ex. utförts i ett exjobb som syftar till att skatta trailerlängder och att undersöka hur systemet fungerar även om trailern har en mer oregelbunden yta mot LIDAR-sensorn. Den inneboende robustheten hos de regulatorer vi utvecklat löser delvis problem med avvikelser och variationer, även om det också skulle varit intressant att gå längre med att utforska inläring för den här applikationen. Likväl är det ett intressant område för framtida forskning, då aningen omfokuserat med de lärdomar vi dragit från det här projektet.

De resultat som detta projekt lämnar efter sig bidrar till FFI-programmets övergripande mål "Svensk fordonsindustri blir världsledande när det gäller utvecklingen och implementeringen av automatiserade fordon och transportlösningar", men också det övergripande målet "De svenska fordonsföretagen förblir världsledande när det gäller utvecklingen av säkra fordon och system för fordonssäkerhet". Egentligen bidrar i princip allt som har producerats i projektet till dessa båda mål. Just demonstratorn som arbetar med låg hastighet bidrar primärt till det första listade målet, och inte direkt till målet om fordonssäkerhet. Att resultaten annars generellt kan ha nytta för fordonssäkerhet beror på att mycket av det som utvecklats kan användas långt bortom just backande lastbilar. Stabilitetsresultaten är viktiga för att ett fordon säkert ska kunna följa en planerad bana och därmed för att fordonet ska ha ett säkert beteende, även om planeraren tvingas göra en undanmanöver för att undvika en kollision. Resultaten i projektet bidrar till delområdet "Det möjliggörande transportsystemet" och dess mål att öka effektiviteten i transportsystemet. Mer konkret kan systemet som utvecklats i det här projektet t.ex. användas för att effektivisera fordonsrörelser i trånga miljöer inom lastterminaler. Redan som förarstödsystem skulle det kunna hjälpa vid t.ex. backning till lastkaj. Resultatet är även användbara för nya mer avancerade fordonskonfigurationer som används för att reducera koldioxidutsläpp. Priset för det kan vara att de blir längre och består av fler släpvagnar som gör fordonskombinationen svårhanterbar, inte minst vid backning.

Som en generell avslutande positiv slutsats vill vi nämna att det här projektet har, generellt sett, varit mycket framgångsrikt. Det speglas inte minst av de 20 vetenskapliga publikationer det har genererat, som kraftigt överträffar det mål som sattes upp för projektet. Det speglas också av att det har resulterat i en fungerande prototyp där vi har kunnat visa att våra teoretiska resultat även har varit praktiskt användbara.

7 Spridning och publicering

7.1 Kunskaps- och resultatspridning

Hur har/planeras projektresultatet att användas och spridas?	Markera med X	Kommentar
Öka kunskapen inom området	X	Har spridits genom publikationer, samarbetet med industripartnern och seminarier.
Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt	X	
Föras vidare till produktutvecklingsprojekt	?	Systemet löser ett problem som kommer att finnas i framtidens autonoma tunga fordon med släp. Sedan är det svårt att bedöma idag hur stora delar

		av just detta arbete som kommer att finnas med i denna framtida lösning.
Introduceras på marknaden	?	Ett system som löser samma problem kommer med största sannolikhet att introduceras på marknaden, men hur stora delar av det som är resultat av det här projektet är svårt att uttala sig om.
Användas i utredningar/regelverk/ tillståndsärenden/ politiska beslut		

Det finns en stark koppling till andra pågående forskningsprojekt knutna till projektledaren. Det har lett till att resultaten från detta projekt har fått större genomslag. T.ex. har metoderna använts för att planera för skepp i samarbete med ABB. Det har också starkt bidragit till att stärka forskningsprojekt inom WASP och det möjliggjorde starten av ett nytt uppföljande FFI-projekt.

7.2 Publikationer

N. Evestedt, O. Ljungqvist, and D. Axehill. Motion planning for a reversing general 2-trailer configuration using Closed-Loop RRT. In Proceedings of the 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pages 3690–3697, 2016b.

O. Ljungqvist, D. Axehill, and A. Helmersson. Path following control for a reversing general 2-trailer system. In Proceedings of the 55th IEEE Conference on Decision and Control, pages 2455–2461, 2016.

O. Ljungqvist, D. Axehill, and J. Löfberg. On stability for state-lattice trajectory tracking control. In Proceedings of the 2018 American Control Conference, 2018.

O. Ljungqvist, N. Evestedt, D. Axehill, M. Cirillo, and H. Pettersson. A path planning and path-following control framework for a general 2-trailer with a car-like tractor. Journal of Field Robotics, 36(8):1345–1377, 2019.

O. Ljungqvist, D. Axehill, H. Pettersson, and J. Löfberg. Estimation-aware model predictive path-following control for a general 2-trailer with a car-like tractor. Under review for possible publication in IEEE Transactions on Robotics. Preprint: <https://arxiv.org/abs/2002.10291>, 2020b.

O. Ljungqvist, K. Bergman, and D. Axehill. Optimization-based motion planning for multi-steered articulated vehicles. In Proceedings of the 21st IFAC World Congress. Preprint: <https://arxiv.org/abs/1912.06264>, 2020c.

O. Ljungqvist and D. Axehill. A predictive path-following controller for multi-steered articulated vehicles. In Proceedings of the 21st IFAC World Congress. Preprint: <https://arxiv.org/abs/1912.06259>, 2020.

N. Evestedt, O. Ljungqvist, and D. Axehill. Path tracking and stabilization for a reversing general 2-trailer configuration using a cascaded control approach. In Proceedings of the 2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pages 1156–1161, 2016a.

O. Ljungqvist, N. Evestedt, M. Cirillo, D. Axehill, and O. Holmer. Lattice-based motion planning for a general 2-trailer system. In Proceedings of the 2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pages 2455–2461, 2017.

G. Ling, K. Lindsten, O. Ljungqvist, J. Löfberg, C. Norén, and C. A. Larsson. Fuel-efficient model predictive control for heavy duty vehicle platooning using neural networks. In Proceedings of the 2018 Annual American Control Conference, pages 3994–4001, 2018.

O. Andersson, O. Ljungqvist, M. Tiger, D. Axehill, and F. Heintz. Receding-horizon lattice-based motion planning with dynamic obstacle avoidance. In Proceedings of the 57th IEEE Conference on Decision and Control, pages 4467–4474, 2018b.

- O. Ljungqvist. On motion planning and control for truck and trailer systems. Licentiate's thesis, Linköping University, 2019.
- K. Bergman, O. Ljungqvist, and D. Axehill. Improved optimization of motion primitives for motion planning in state lattices. In Proceedings of the 2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2019b.
- K. Bergman, O. Ljungqvist, and D. Axehill. Improved path planning by tightly combining lattice-based path planning and optimal control. In IEEE Transactions on Intelligent Vehicles. Preprint: <https://arxiv.org/abs/1903.07900>, 2020.
- R. Oliveira, O. Ljungqvist, P. F. Lima, and B. Wahlberg. Optimization-based on-road path planning for articulated vehicles. In Proceedings of the 21st IFAC World Congress. Preprint: <https://arxiv.org/abs/2001.06827>, 2020a.
- O. Ljungqvist, D. Axehill, and H. Pettersson. On sensing-aware model predictive path-following control for a reversing general 2-trailer with a car-like tractor. In Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Preprint: <https://arxiv.org/abs/2002.06874>, 2020a.
- K. Bergman, O. Ljungqvist, T. Glad, and D. Axehill. An optimization-based receding horizon trajectory planning algorithm. In Proceedings of the 21st IFAC World Congress. Preprint: <https://arxiv.org/abs/1912.05259>, 2020a.
- R. Oliveira, O. Ljungqvist, P. F. Lima, and B. Wahlberg. A geometric approach to on-road motion planning for long and multi-body heavy-duty vehicles. In Proceedings of the 31st IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2020b.
- K. Bergman, O. Ljungqvist, J. Linder, and D. Axehill. An optimization-based motion planner for autonomous maneuvering of marine vessels in complex environments. In Proceedings of the 59th IEEE Conference on Decision and Control, pages 5283-5290, 2020.
- O. Ljungqvist. Motion planning and feedback control techniques with applications to long tractor-trailer vehicles. PhD thesis, Linköping University, 2020.
- Patrik Nyberg. Stabilization, Sensor Fusion and Path Following for Autonomous Reversing of a Full-Scale Truck and Trailer System. Master's Thesis, Automatic Control, Linköping University, Linköping, Sweden, 2016.
- Olov Holmer. Motion Planning for a Reversing Full-Scale Truck and Trailer System. Master's Thesis, Automatic Control, Linköping University, Linköping, Sweden, 2016.
- Gustav Ling and Klas Lindsten. Model Predictive Control Using Neural Networks: a Study on Platooning without Intervehicular Communications. Master's Thesis, Automatic Control, Linköping University, Linköping, Sweden, 2017.
- Joakim Mörhed and Filip Östman. Automatic Parking and Path Following Control for a Heavy-Duty Vehicle. Master's Thesis, Automatic Control, Linköping University, Linköping, Sweden, 2017.
- Daniel Arnström. State Estimation for Truck and Trailer Systems using Deep Learning. Master's Thesis, Automatic Control, Linköping University, Linköping, Sweden, 2018.
- Carl Hynen and Theodor Westney. Modeling and Lateral Control of Tractor-Trailer vehicles during Aggressive Maneuvers. Master's Thesis, Automatic Control, Linköping University, Linköping, Sweden, 2020.

8 Slutsatser och fortsatt forskning

Projektets bidrag ligger inom området rörelseplanering och återkoppling för olika typer av lastbil-släpkombinationer under manövrer i låga hastigheter i ostrukturerade miljöer. De utvecklade rörelseplaneringsmetoderna inkluderar probabilistiska och deterministiska samplingsbaserade metoder. Vidare används numeriska optimal styrmetoder off-line för att förberäkna bibliotek med optimerade manövrer såväl som under on-line-planering i form av ett andra optimeringssteg som bygger på numerisk optimal styrning. För att följa de beräknade rörelseplanerna har olika banföljande reglermetoder föreslagits som använder en reglerfelsmodell för fordonet. Flera av de föreslagna tillvägagångssätten har framgångsrikt demonstrerats i liten skala eller på en fullskalig allmän 2-trailer med ett billiknande dragfordon. Dessutom introduceras det första kompletta rörelseplanerings- och regleramverket för denna typ av system, vilket också åtföljs av de första framgångsrika resultaten från verkliga experiment. I detta ramverk utvärderas en ny icke-linjär observatör för tillståndsskattnings som endast använder information från sensorer monterade på dragfordonet, vilket gör ramverket oberoende av sensorer monterade på släpvagnen.

Exempel på relevant fortsatt forskning är att utveckla en reaktiv variant av den tvåstegs rörelseplaneringsmetod vi utvecklat för att i realtid kunna undvika rörliga hinder som dyker upp. Den sensormedvetna regleringen relaterar starkt till samtidigt reglering och estimering, vilket också är ett intressant nytt spår att följa. Planering under osäkerhet i stadsmiljö är en naturlig fortsättning av detta arbete, som främst behandlat statiska deterministiska miljöer utan andra fordon. Att studera inlärning var något vi hade från början tänkt oss att göra, men tiden inte räckte till, så det är också ett intressant spår att fortsätta i framtiden.

9 Deltagande parter och kontaktpersoner

De deltagande parterna är Avdelning för reglerteknik vid Linköpings universitet, med kontaktperson Daniel Axehill, samt Scania CV AB, med kontaktperson Henrik Pettersson.