

EENE

Energieffektiv Navigering för Elfordon

Publik rapport

Författare: Niklas Åkerblom

Datum: 2024-05-21

Projekt inom effektiva och uppkopplade transportsystem (EUTS)

FFI Fordonsstrategisk
Forskning och
Innovation

VINNOVA

Energimyndigheten

TRAFIKVERKET

FKG

VOLVO

SCANIA

SCANIA

VOLVO

Innehållsförteckning

1 Sammanfattning	3
2 Executive summary in English	4
3 Bakgrund	5
4 Syfte, forskningsfrågor och metod.....	6
5 Mål	7
6 Resultat och måluppfyllelse.....	8
6.1 Arbetspaket 1: Framtagande av energimodeller och ruttplaneringsalgoritmer	8
6.2 Arbetspaket 2: Utveckling av systemarkitektur och mjukvara	10
6.3 Arbetspaket 3: Validering av modeller, algoritmer och mjukvara	11
7 Spridning och publicering.....	12
7.1 Kunskaps- och resultatspridning.....	12
7.2 Publikationer	12
8 Slutsatser och fortsatt forskning.....	14
9 Deltagande parter och kontaktpersoner	15

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.

Läs mer på www.vinnova.se/ffi.

1 Sammanfattning

Klimatförändringar orsakade av växthusgasutsläpp från fossila bränslen är ett av de viktigaste och svåraste problemen som mänskligheten står inför. Fordons- och transportsektorn kan bidra till att förbättra situationen genom en snabbare övergång till fordon med alternativa energikällor, exempelvis elfordon med batterier. Eftersom batterier fortfarande har relativt låg energilagringsskapacitet och laddning kan vara långsam, ger ett robust och pålitligt navigeringssystem en möjlighet att på ett kostnadseffektivt sätt förbättra förtroendet för tekniken. Detta kräver dock korrekt information om vägnätet och trafikmiljön. Även om sådan information kan samlas in av fordon med sensorer och mobilanslutningar för sammanställning på centrala servrar, finns det fortfarande en risk att en otillräcklig mängd data samlas in för sällan besökta delar av vägnätet, särskilt om flottan av tillgängliga fordon är liten.

Det här projektet har utforskat metoder för att välja rutter på ett effektivt och adaptivt sätt, där man balanserar mellan att välja de bästa rutterna utifrån information som redan finns och att välja rutter i syfte att samla in användbar ny information. Detta uppnås genom en klass av maskininlärningsmetoder, så kallade kombinatoriska banditalgoritmer, specifikt inriktade på komplexa beslutsfattningsproblem i stokastiska miljöer. De föreslagna metoderna har utvärderats på vägnät i både stads- och landsstorlek, med olika målfunktioner och antaganden, och deras prestanda har demonstrerats i vetenskapliga publikationer genom goda empiriska och teoretiska resultat. I projektet har även antaganden om energiförbrukningsmodeller validerats genom provning i en rigg. Ett prototypnavigeringssystem har utvecklats med hjälp av de framtagna algoritmerna, där laddningsstationer och rutter väljs för att adaptivt samla information i syfte att minimera förväntad restid över upprepade resor. Projektet har i huvudsak genomförts som ett industridoktorandprojekt, med en framgångsrikt genomförd disputation och tillhörande doktorsavhandling som slutgiltigt resultat.

2 Executive summary in English

Climate change caused by greenhouse gas emissions from fossil fuels is one of the most important and difficult problems facing humanity. The vehicle and transport sector can contribute to improving the situation through a faster transition to vehicles with alternative energy sources, for example electric vehicles with batteries. As batteries still have relatively low energy storage capacity and charging can be slow, a robust and reliable navigation system provides an opportunity to cost-effectively improve trust in the technology. However, this requires accurate information about the road network and the traffic environment. Although such information can be collected by vehicles with sensors and mobile connections for compilation on central servers, there is still a risk that an insufficient amount of data is collected for infrequently visited parts of the road network, especially if the fleet of available vehicles is small.

This project has explored methods for selecting routes in an efficient and adaptive way, balancing between selecting the best routes based on information already available and selecting routes with the aim of gathering useful new information. This is achieved through a class of machine learning methods, so-called combinatorial bandit algorithms, specifically targeting complex decision-making problems in stochastic environments. The proposed methods have been evaluated on both city-sized and country-sized road networks, with different objective functions and assumptions, and their performance has been demonstrated in scientific publications through good empirical and theoretical results. In the project, assumptions about energy consumption models have also been validated through testing in a rig. A prototype navigation system has been produced using the developed algorithms, where charging stations and routes are selected to adaptively collect information in order to minimize expected travel time over repeated trips. The project has mainly been carried out as an industrial PhD project, with a successfully completed defense and associated dissertation as the final result.

3 Bakgrund

Den pågående klimatförändringen är en av de mest akuta globala utmaningarna som mänskligheten står inför. För att minska utsläppen av växthusgaser har internationella organisationer som Europeiska unionen (EU) satt upp kortsiktiga och långsiktiga mål för medlemsländer att uppfylla. Ett konkret exempel på ett sådant mål är att EU ämnar minska nettoutsläppen av växthusgaser inom unionen till noll fram till 2050. Transportsektorn spelar en viktig roll för att nå dessa mål, i synnerhet med hjälp av de senaste årens framsteg inom elektrifiering, uppkoppling, maskininlärning och artificiell intelligens. Många fordonstillverkare strävar idag efter att gå över från att använda förbränningsmotorer för framdrivning till att i stället använda elmaskiner. Ett populärt alternativ till konventionella fordon är batteridrivna elfordon (BEV) som enbart använder litiumjonbatterier för energilagring (till skillnad från hybridfordon med kombinationer av energikällor).

Möjliga kunder tvekar ofta att köpa batteridrivna elfordon på grund av en oro över den maximala körräckvidden, ett fenomen som ofta kallas räckviddsångest (*range anxiety*). Flera olika faktorer kan öka risken att bli strandsatt med ett tomt batteri innan man når en avsedd destination, såsom vissa väderförhållanden, oväntade omvägar på grund av vägarbeten och trafikstockningar, eller låg tillgänglighet på laddningsstationer. Därutöver kan dåligt valda laddningsstopp under en lång resa avsevärt öka den totala restiden. På lång sikt kan de här problemen lösas med hjälp av en utvidgad laddningsinfrastruktur eller batterier med högre kapacitet. I ett närmare perspektiv kan däremot ett relativt kostnadseffektivt sätt att öka förtroendet för teknologin vara att förse förare med tillräcklig information för att bättre kunna planera längre resor.

Ett navigeringssystem som är anpassat för batteridrivna elfordon kan ta hänsyn till både energiförbrukning och restid, samt välja ut lämpliga laddningsstationer när det är nödvändigt. Ett sådant system kräver dock inte bara beräkningseffektiva och robusta navigeringsalgoritmer, utan även tillräckligt med data om vägnätet och trafikmiljön för att kunna säkerställa hög tillförlitlighet. Exempelvis är det möjligt att anpassa välkända navigeringsalgoritmer (som *Dijkstras algoritm* eller *A**) för att minimera energiförbrukningen i stället för restiden, men de flesta existerande metoder har antagit att komplett information om vägnätet finns tillgänglig i förväg. I själva verket beror både energiförbrukningen och restiden på faktorer kan vara specifika för lokala vägförhållanden och svåra att förutse. Att genomföra datainsamling under körning kan delvis avhjälpa otillräcklig lokal information, men det kan fortfarande leda till en brist på information associerad med de delar av vägnätet som besökts mer sällan. För att undvika rutförslag som är suboptimala på grund av en sådan brist på kunskap är det gynnsamt att kombinera navigeringsalgoritmen med uttrycklig utforskning av vägnätet.

Ett klassiskt problem inom maskininlärning är att balansera mellan att utforska en okänd (och osäker) miljö i syfte att inhämta ny kunskap och att utnyttja den insamlade kunskapen för att uppnå ett mer långsiktigt mål. Ett av huvudmålen med det här projektet har varit att utveckla navigeringsmetoder som uppnår en sådan balans på ett effektivt sätt.

4 Syfte, forskningsfrågor och metod

Syftet med projektet har varit att utforska och utveckla effektiva navigeringsalgoritmer som är anpassade och ändamålsenliga för batteridrivna elfordon. Specifikt bör algoritmerna ta hänsyn till både restid och energiförbrukning, samt välja lämpliga laddningsstationer så att laddningstidens påverkan på den totala restiden minimeras. Algoritmerna ska därutöver vara robusta inför osäkerhet i trafikmiljön, vara anpassade för adaptiv informationsinsamling och vara beräkningseffektiva i syfte att kunna tillämpas i verkliga fordonssystem.

Projektet har bedrivits som ett industridoktorandprojekt, med följande huvudforskningsfråga: *Hur kan man, med begränsad tillgänglighet av datainsamlingsresurser (exempelvis en liten flotta av uppkopplade fordon med lämpliga sensorer), effektivt samla tillräcklig information (kopplad till energiförbrukning, laddningstid eller restid) genom upprepad interaktion med trafikmiljön, för att åstadkomma förbättrad navigering av batteridrivna elfordon?*

Detta är en komplicerad fråga, då även ett navigeringsproblem där man antar fullständig tillgång till all nödvändig information om vägnätet är relativt beräkningsmässigt komplext, i synnerhet om även valet av laddningsstationer ingår i problemet. Algoritmer som beräkningseffektivt löser liknande problem utnyttjar ofta egenskaper i grafrepresentationer av vägnätet för att, på ett sofistikerat sätt, förbehandla nätverket och göra navigeringsproblemet enklare att lösa. För att möjliggöra att effektiv datainsamling och kunskapsuppdatering integreras med navigeringsmetoden på ett ändamålsenligt sätt, har projektet brutit ned huvudforskningsfrågan i ett antal (numrerade och ordnade) delforskningsfrågor:

1. Kan man lösa problemet (som definieras av huvudforskningsfrågan) för små vägnät?
2. Hur kan man utnyttja en flotta av fordon för att lösa problemet mer effektivt än med ett enda fordon?
3. Hur kan man hantera fördröjningar i dataöverföring på ett robust sätt?
4. Hur kan man utnyttja domänkunskap (exempelvis sofistikerade energiförbrukningsmodeller) för att effektivisera utforskningen av vägnätet?
5. Går det att utveckla effektiva navigeringsalgoritmer som använder andra kostnadsfunktioner än "kortaste vägen"?
6. Går det att skala upp algoritmerna till större vägnät utan att offra beräkningseffektivitet?
7. Hur kan man infoga batterikapacitet och laddningsstationsval i navigeringsproblemet på ett effektivt sätt?
8. Hur kan man lära sig och utnyttja förarpreferenser (exempelvis för val av laddningsstationer) för att lösa problemet mer effektivt?

5 Mål

Delmålen för projektet enligt projektansökan räknas upp nedan:

1. Ta fram nya algoritmer och metoder för navigation och ruttplanering där både restid, laddningstid och energiförbrukning används i kostnadsfunktionen.
2. Algoritmerna ska ta hänsyn till den aktuella mängden energi i batteriet vid val av rutt och ska hänvisa fordonet till laddningsstationer vid behov.
3. Algoritmerna ska vara anpassade för beräkningseffektivitet och gå att använda i en realtidskontext.
4. Ta fram energiförbrukningsmodeller för vägsegment som tar hänsyn till vägtopologi, väderinformation och trafiksituation för att uppskatta energiförbrukningen för elektrifierade fordon.
5. Ta fram uppladdningsmodeller för laddningsstationer för elektrifierade fordon.
6. Implementera mjukvarukomponenter som realiserar algoritmerna i verkliga provfordon.
7. Utvärdera algoritmer och modeller genom att genomföra och analysera resultat från riggkörningar och simuleringar.

Därutöver inkluderade projektansökan även en lista av förväntade *projektresultat* som följer nedan:

1. Examinerad industridoktorand med licentiatavhandling och doktorsavhandling.
2. Publicerad tidskriftsartikel.
3. Prototyp av beräkningseffektivt navigationssystem för elektrifierade fordon.
4. API för olika typer av extern realtidsinformation.
5. Ta fram förslag på standarder kring API för laddningsstationsdata i navigationskontext, rörande tillgänglighet och laddningstid.
6. Ökad industrikompetens att kunna utveckla, implementera och utvärdera metoder för att lösa problem inom områdena *Multi-Objective Shortest Path Problem* och *Constrained Shortest Path Problem*.
7. Funktionalitet för ruttberäkning utvecklad i Volvo Personvagnars moln som är uppkopplad till demofordon med möjlighet att kunna demonstrera funktionalitet på väg.

Målen har över lag inte förändrats under projektets gång. Projektet har fokuserat något mer på akademiska och forskningsrelaterade resultat än på tillämpning och API-förslag, med flera publikationer i internationellt prestigefyllda tidskrifter, presenterade på maskininlärningskonferenser med hög status och konkurrens. Därigenom har projektet bidragit till att öka synligheten och trovärdigheten för svensk industriforskning inom väldigt aktuella ämnen, *maskininläring* och *artificiell intelligens*.

6 Resultat och måluppfyllelse

Alla de projektspecifika målen har uppfyllts, och på en övergripande nivå har projektet även bidragit till måluppfyllelse för både FFI och delprogrammet EUTS. Ett av delmålen för FFI har tillgodosetts genom att alla projektets publikationer i något avseende har behandlat metoder för ökande av vägtransporters effektivitet och minskande av deras miljöpåverkan. Projektet har också bidragit till ett annat delmål genom att den svenska fordonsindustrins konkurrenskraft har stärkts med kontinuerlig kunskapsöverföring från projektets industridoktorand till Volvo Cars under projektets gång, inklusive en godkänd doktorsavhandling som slutgiltig leverans. Därutöver har industridoktoranden varit med i doktorandnätverket för *Swedish Electromobility Centre* (SEC), samt deltagit fullt ut som affilierad doktorand i den nationella forskarskolan *Wallenberg AI, Autonomous Systems and Software Program* (WASP) som har innefattat både kurser och resultatspridning för projektet på programmets årliga konferenser och möten. Projektet har också bidragit till uppfyllelse av målen för delprogrammet EUTS, genom utvecklande av algoritmer som är anpassade för användning i flottor (Åkerblom, Chen & Haghir Chehrehghani, 2020, 2023) och som kan användas för att identifiera bland annat flaskhalsar i uppkopplade transportsystem (Åkerblom, Hoseini & Haghir Chehrehghani, 2023). Detaljerade resultat för de enskilda arbetspaketen beskrivs i sektionerna nedan (arbetspaket 0 utelämnas, då det främst rör projektledning).

6.1 Arbetspaket 1: Framtagande av energimodeller och ruttplaneringsalgoritmer

Innehållet i det första arbetspaketet har haft två huvudsakliga delar. Den ena var att ta fram modeller för elektrifierade drivlinor som kan användas för att effektivt bedöma energiförbrukning på enskilda vägsegment i en elektronisk karta. Den andra var att ta fram algoritmer för navigering och ruttplanering som utöver tidskostnad även tar hänsyn till energiförbrukning. Båda dessa (samt de fyra första delforskningsfrågorna som nämns ovan) behandlades i forskningsarbetet som ledde fram till den första konferensartikeln (Åkerblom, Chen & Haghir Chehrehghani, 2020), som presenterades på konferensen *IJCAI-20*, och dess senare förlängning till en artikel i tidskriften *Artificial Intelligence* (Åkerblom, Chen & Haghir Chehrehghani, 2023).



Figur 1: Utforskning av energieffektiva rutter genom Luxemburg med hjälp av Thompson Sampling (där vägnätet är baserat på kartdata från [OpenStreetMap](#)).

Artikeln behandlar effektiv och adaptiv inlärning av information som är värdefull för att kunna hitta rutter med låg energiförbrukning genom ett vägnät. För att hantera osäkra och okända

faktorer, riktades arbetet mot probabilistiska metoder med ett antagande om stokastisk energiförbrukning (med *a priori* okänd sannolikhetsfördelning för varje enskilt vägsegment). För att kombinera navigeringsproblemet med inlärningsproblemet (det vill säga, att vägnätet måste utforskas för att vägsegmentens parametrar ska kunna estimeras) modellerades det som ett *kombinatoriskt banditproblem*. Detta är en variant av det klassiska *flerarmade banditproblemet* (*Multi-Armed Bandit Problem*, MAB), som berör det tidigare nämnda balanserandet mellan utforskande av en okänd miljö och utnyttjande av insamlad kunskap för att minimera väntevärdet av en kostnad över tid.

Informellt kan man beskriva det studerade problemet på följande sätt. Med antagandet att väntevärdet för energiförbrukningen är (delvis) okänt, behöver man utforska vägnätet för att kunna garantera att de föreslagna rutterna närmar sig rutten med lägst väntad energiförbrukning. Om man utforskar för mycket så kommer däremot den totala energiförbrukningen att öka, eftersom utforskningen i sig medför en kostnad med avseende på förbrukad energi. Artikeln presenterar ett antal metoder för att lösa problemet (adapteringar av *Thompson Sampling* och *BayesUCB*) som också använder sig av en deterministisk (och förenklad) energiförbrukningsmodell tillsammans med en Bayesiansk *a priori*-fördelning över de sökta parametrarna för att effektivisera utforskningen av vägnätet. Artikeln demonstrerar metodernas effektivitet genom både teoretiska och empiriska resultat (genom simuleringar), både för fallet med ett enskilt fordon och för flottor (med fördröjd tillgång till insamlad information).



Figur 2: Prov med elfordon i Chalmers hybridtestcell för att validera antaganden om energiförbrukningsmodeller.

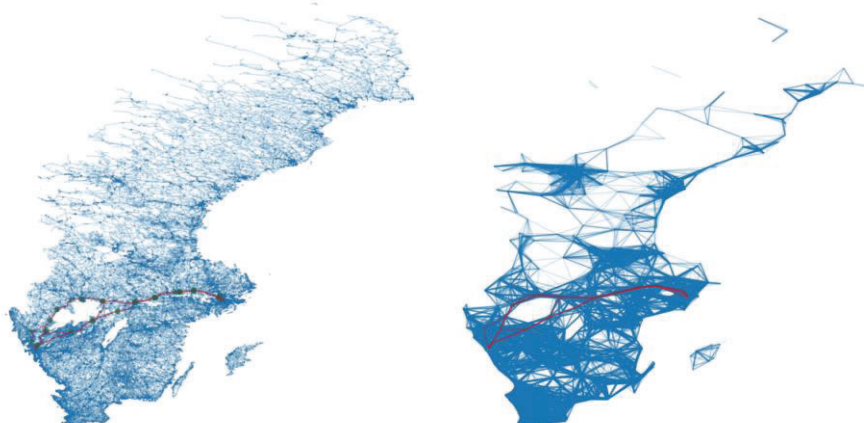
Förenklade energiförbrukningsmodeller (som i ovan beskrivna artikel, i jämförelse med exempelvis dynamiska fysikaliska modeller) är nödvändiga för att möjliggöra ett beräkningseffektivt navigeringssystem. För att validera antagandena och modellernas robusthet, har projektet i det första arbetspaketet även genomfört ett antal riggprover i Chalmers hybridtestcell. Exempelvis genomfördes en serie prover för att validera det uttryckliga antagandet om konstant marginalverkningsgrad vid olika väglutningar, och en ytterligare serie prover för att undersöka hur mycket energiförbrukningen varierar vid olika körbeteenden (med samma medelhastighet).

Två ytterligare artiklar producerades inom det första arbetspaketet, varav den ena (Åkerblom, Hoseini & Haghir Chehrehghani, 2023) publicerades i tidskriften *Machine Learning* och den andra (Hoseini, Åkerblom & Haghir Chehrehghani, 2022) är offentliggjord som en teknisk rapport

(preprint). I dessa används liknande metoder (kombinatoriska banditalgoritmer) som tidigare, men med en alternativ kostnadsfunktion (forskningsfråga 5) där algoritmerna avses hitta flaskhalsar i vägnätet i stället för en rutt som minimerar energiförbrukning (eller restid). Metoderna kan potentiellt användas för att antingen förbättra enskilda förarens körupplevelse (minskad irritation genom undvika trafikstockningar) eller av väg- och trafikmyndigheter för att identifiera och åtgärda problem i vägnätet. I den första artikeln presenteras både teoretiska och empiriska simuleringsresultat, och i den andra artikeln studeras även hur extern realtidsinformation kan användas för att effektivisera metoderna.

6.2 Arbetspaket 2: Utveckling av systemarkitektur och mjukvara

Målet med det andra arbetspaketet var att påbörja framtagandet av en systemarkitektur och mjukvara som realiserar algoritmerna framtagna i det första arbetspaketet. Delar av forskningsarbetet för att åstadkomma målet ledde fram till en artikel (Åkerblom & Haghir Chehrehghani, 2023b) i tidskriften *Transactions on Machine Learning Research* som också presenterades på den internationella workshopen *EWRL 2023* (Åkerblom & Haghir Chehrehghani, 2023a). Där artiklarna från det föregående arbetspaketet enbart studerar metoder anpassade för mindre vägnät, går metoderna i den här artikeln i stället att använda i mycket större vägnät (exempelvis landsstorlek). Artikeln fokuserar på skalbarhet och beräkningseffektivitet, och inkluderar även val av laddningsstationer för långa resor.



Figur 3: Utforskning av Sveriges vägnät i originalrepresentation (vänster) och förbehandlad representation (höger) (där vägnätet är baserat på kartdata från [OpenStreetMap](https://openstreetmap.org/)).

I valet av laddningsstationer ingår både väntetid (om stationen är upptagen) och själva laddningstiden (där information om laddningseffektfördelningar samlas in av algoritmen). Mellan de möjliga stationerna tar metoden även hänsyn till batterikapaciteten hos fordonet. För att åstadkomma hög beräkningseffektivitet presenteras en metod för att förbehandla grafrepresentationen av vägnätet för att både effektivisera ruttvalet och att säkerställa att inlärningsprestandan inte offras (genom att de estimerade parametrarna kopplas till den resulterande grafens relativt få noder). En mjukvaruarkitektur för en implementation av algoritmen utvecklades också, med en referensimplementation tillgängliggjord som öppen källkod.

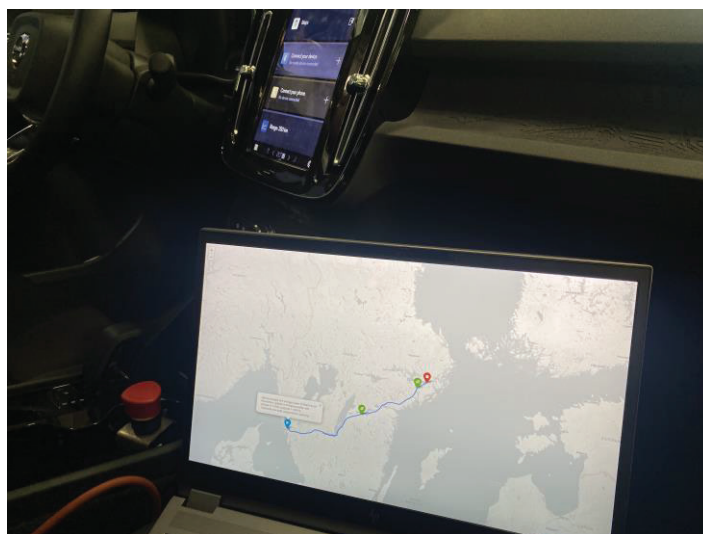
Utöver den öppna källkoden för algoritmen ovan utvecklades också ett antal olika mjukvarukomponenter för att möjliggöra en prototypimplementation av ett navigeringssystem integrerat med provfordon. Bland annat utvecklades ett generiskt bibliotek för kombinatoriska banditalgoritmer, ett ramverk för dynamisk programmering som beräknar energiförbrukningsoptimala hastighetskurvor, API-komponenter för tillgängliggörande av

energi-relaterad information för prototypmjukvaran, etc. Den sista leveransen i arbetspaketet var en godkänd licentiatavhandling (Åkerblom, 2021).

6.3 Arbetspaket 3: Validering av modeller, algoritmer och mjukvara

Innehållet i det sista arbetspaketet rör främst validering och slutgiltig implementering av det som utvecklats i tidigare arbetspaket, samt industridoktorandens doktorsavhandling (Åkerblom, 2024) och disputation. Övriga vetenskapliga artiklar som inte passar väl med tidigare arbetspaket beskrivs även kort här.

Tre artiklar inom arbetspaketet behandlar metoder och modeller av förarbeteenden, motiverat av att olika beteenden avsevärt kan påverka både restid och energiförbrukning. Den första artikeln (Comuni, Mészáros, Åkerblom & Haghir Chehreghani, 2022), som presenterades på konferensen *IEEE ITSC 2022*, studerar metoder för att klassificera och gruppera förarbeteenden under körning, med fokus på beteenden som påverkar energiförbrukningen. Den andra artikeln (Lindroth, Svensson, Åkerblom, Pourabdollah & Haghir Chehreghani, 2024), som publicerats i tidskriften *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, undersöker modeller för att, under laddning, prediktera avfärdstid och längd för nästkommande resa. Sista artikeln (Rahbar, Åkerblom & Haghir Chehreghani, 2024) är ett pågående arbete som är offentliggjort som en teknisk rapport (preprint) och behandlar en generell metod för adaptiv informationsinsamling som kan användas för, bland annat, teknisk felsökning eller medicinska diagnoser, men även för adaptiva förarundersökningar där man vill begränsa antalet frågor (om exempelvis förarens laddningsstationspreferenser).



Figur 4: Prototyp av ett adaptivt navigeringssystem som är integrerat med det uppkopplade elfordonet genom ett API för energidata (med kartvisualisering genom [Leaflet](#), med data från [OpenStreetMap](#)).

Med hjälp av algoritmimplementationen från det föregående arbetspaketet utvecklades en enkel prototyp av ett navigeringssystem som använder kombinatoriska banditalgoritmer för att välja laddningsstationer och rutter. Systemet är byggt utifrån en mikrotjänstarkitektur där olika tjänster har välavgränsade ansvarsområden och kommunicerar via meddelandeköer. När en laddningssession påbörjas och avslutas begärs energiinformation för bilen från ett *backend-system* via ett API, där medeleffekten för laddningen används för att beräkna nya parametrar till *a posteriori*-fördelningen för den anslutna laddningsstationen. Med hjälp av bilens position kan sedan en ny rutt till destinationen (som valts i det grafiska användargränssnittet) räknas ut med en kombinatorisk banditalgoritm och de nya parametrarna. En bild av systemet visas i figur 4, där Thompson Sampling har använts för att räkna ut en ny rutt efter att laddningskabeln kopplats ur.

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	Projektet har producerat 4 tidskriftsartiklar och 2 konferensartiklar med hög kvalitet, samt 4 tekniska rapporter, 1 licentiatavhandling och 1 doktorsavhandling. Resultat från projektet har presenterats på internationella akademiska konferenser och workshops, samt inom Sverige (genom WASP).
Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt	X	Resultat från projektet planeras att användas i det SEC-finansierade forskningsprojektet CHARGE.
Föras vidare till produktutvecklingsprojekt	X	Resultat från projektet planeras att användas för att vidareutveckla bland annat API:er för energidata inom Volvo Cars.
Introduceras på marknaden		
Användas i utredningar/regelverk/tillståndsärenden/ politiska beslut		

7.2 Publikationer

De publikationer som producerats i projektet följer nedan:

- Åkerblom, N., Chen, Y. & Haghir Chehreghani, M. (2020). An Online Learning Framework for Energy-Efficient Navigation of Electric Vehicles. *Proceedings of the Twenty-Ninth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-20)*, January 7 – 15, 2021, Yokohama, Japan. 2051 – 2057.
<https://doi.org/10.24963/ijcai.2020/284>
- Åkerblom, N. (2021). *Online Learning for Energy Efficient Navigation in Stochastic Transport Networks*. Lic.-avh. Chalmers tekniska högskola.
<https://research.chalmers.se/publication/527080>
- Åkerblom, N., Hoseini, F. S. & Haghir Chehreghani, M. (2023). Online Learning of Network Bottlenecks via Minimax Paths. *Machine Learning*. 112(1), 131 - 150.
<https://doi.org/10.1007/s10994-022-06270-0>
- Åkerblom, N. Chen, Y. & Haghir Chehreghani, M. (2023). Online Learning of Energy Consumption for Navigation of Electric Vehicles. *Artificial Intelligence*. 317, 103879.
<https://doi.org/10.1016/j.artint.2023.103879>
- Åkerblom, N. & Haghir Chehreghani, M. (2023a). Long-Distance Navigation Using a Combinatorial Semi-Bandit Approach. *16th European Workshop on Reinforcement Learning (EWRL 2023)*. September 14 – 16, 2023, Brussels, Belgium.
<https://openreview.net/pdf?id=XKo-LIfAMb>
- Åkerblom, N. & Haghir Chehreghani, M. (2023b). A Combinatorial Semi-Bandit Approach to Charging Station Selection for Electric Vehicles. *Transactions on Machine Learning Research (TMLR)*. <https://openreview.net/pdf?id=ndw90pkNM9>
- Åkerblom, N. (2024). *Combinatorial Semi-Bandit Methods for Navigation of Electric Vehicles*. Diss. Chalmers tekniska högskola.
<https://research.chalmers.se/publication/539812>

- Comuni, F., Mészáros, C., Åkerblom, N. & Haghir Chehreghani, M. (2022). Passive and Active Learning of Driver Behavior from Electric Vehicles. *25th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (IEEE ITSC 2022)*. September 22 – October 12, 2022, Macao, China. 929 – 936.
<https://doi.org/10.1109/ITSC55140.2022.9922012>
- Hoseini, F. S., Åkerblom, N. & Haghir Chehreghani, M. (2022). A Contextual Combinatorial Semi-Bandit Approach to Network Bottleneck Identification. *arXiv:2206.08144*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2206.08144>
- Lindroth, T., Svensson, A., Åkerblom, N., Pourabdollah, M. & Haghir Chehreghani, M. (2024). Online Learning Models for Vehicle Usage Prediction During COVID-19. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*.
<https://doi.org/10.1109/TITS.2024.3361676>
- Nilsson, H., Johansson, R., Åkerblom, N. & Haghir Chehreghani, M. (2024). Tree Ensembles for Contextual Bandits. *arXiv:2402.06963*.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.06963>
- Rahbar, A., Åkerblom, N. & Haghir Chehreghani, M. (2024). Cost-Efficient Online Decision Making: A Combinatorial Multi-Armed Bandit Approach. *arXiv:2308.10699*.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.10699>
- Sandberg, J., Åkerblom, N. & Haghir Chehreghani, M. (2024). Combinatorial Gaussian Process Bandits in Bayesian Settings: Theory and Application for Energy-Efficient Navigation. *arXiv:2312.12676*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2312.12676>

Projektets industridoktorand har även handlett följande examensarbeten:

- Aspegren, G. & Dahlberg, O. (2023). *Distributed machine learning framework for shortest path problems with stochastic weights*. Masteruppsats. Chalmers tekniska högskola. <http://hdl.handle.net/20.500.12380/307236>
- Comuni, F. & Mészáros, C. (2021). *Driver Behavior Classification in Electric Vehicles*. Masteruppsats. Chalmers tekniska högskola, Göteborgs universitet.
<https://hdl.handle.net/20.500.12380/303630>
- Lindroth, T. & Svensson, A. (2022). *Predicting Vehicle Usage Using Incremental Machine Learning*. Masteruppsats. Chalmers tekniska högskola.
<https://odr.chalmers.se/handle/20.500.12380/304795>
- Sandberg, J. (2023). *Energy-Efficient Navigation of Electric Vehicles Using Gaussian Processes*. Masteruppsats. Chalmers tekniska högskola.
<http://hdl.handle.net/20.500.12380/307424>
- Yunatci, Y. & Ünal, A. B. (2020). *Online Learning for Energy Efficient Navigation Using Contextual Information*. Masteruppsats. Chalmers tekniska högskola.
<https://hdl.handle.net/20.500.12380/301396>

8 Slutsatser och fortsatt forskning

Under projektets gång har ett antal olika problem och perspektiv relaterade till navigering av elfordon i osäkra miljöer studerats. Projektet har föreslagit flera metoder för adaptiv insamling av navigeringsförbättrande data, och har även implementerat dessa i prototypmjukvara till ett navigeringssystem anpassat för batteridrivna elfordon. Metoderna är baserade på Bayesianska kombinatoriska banditalgoritmer, som är särskilt lämpade för de studerade problemen eftersom det ofta finns tillgång till domänspecifik kunskap som kan användas för att ansätta *a priori*-fördelningar över probabilistiska modellers parametrar.

Medan navigeringssystem för konventionella fordon (det vill säga, med förbränningsmotorer) bara behöver ta hänsyn till restid, kan valet av laddningsstationer för elfordon avsevärt påverka den totala restiden. Till skillnad från förväntad restid, som kan uppskattas med hjälp av data från många olika källor (mobilenheter, uppkopplade fordon, vägsensorer, etc.), kan parametrar associerade med fordonets energiförbrukning eller laddningsstationer vara specifika för vissa fordonsmodeller, vägsegment eller laddningsstationer, vilket avsevärt minskar antalet möjliga källor till data och ökar fördelen med att använda de som finns effektivt.

Då projektet använt flera förenklade antaganden vid modell- och metodutveckling, bör fortsatt forskning undersöka hur man kan anpassa metoderna för mer realistiska förhållanden. Exempelvis kan en möjlig inriktning vara att studera sätt att utvidga metoderna för att ta mer hänsyn till tidsberoenden i navigeringsproblemet. En möjlig lösning är att använda kontextuella banditalgoritmer som tar hänsyn till tidsberoende information vid val av rutter. Projektet har påbörjat arbetet med två pågående artiklar (offentliggjorda som tekniska rapporter), där den första fokuserar på att kombinera projektets navigeringsmetoder med Gaussiska processer (Sandberg, Åkerblom & Haghiri Chehreghani, 2024) och den andra på ett liknande sätt studerar "Tree Ensemble"-metoder (Nilsson, Johansson, Åkerblom & Haghiri Chehreghani, 2024). Ett viktigt problem som artiklarna inte behandlar är att för navigeringsproblem med längre resor kan tidsberoende kontextuell information vara inaktuell när fordonet når senare delar av resorna. Att ta hänsyn till sådan tidsberoende information vid navigering ger upphov till ett svårt kombinatoriskt problem, även om all information är känd på förhand. Således är det nödvändigt att hitta tillräckligt bra approximationslösningar.

9 Deltagande parter och kontaktpersoner

Projektpart	Kontaktperson
Volvo Personvagnar AB	Niklas Åkerblom <i>Projektledare, industridoktorand</i> niklas.akerblom@volvocars.com
Chalmers tekniska högskola AB <i>Institutionen för data- och informationsteknik (CSE)</i>	Morteza Haghiri Chehreghani <i>Doktorandhandledare</i> morteza.chehreghani@chalmers.se
Chalmers tekniska högskola AB <i>Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper (M2)</i>	Jonas Sjöblom <i>Avdelningschef</i> jonas.sjoblom@chalmers.se