

Objektumkövető és manőverbecslő
eljárások fejlett vezetőtámogató
rendszerek számára

Tézisfüzet

Törő Olivér



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar
Közlekedés- és Járműirányítási Tanszék

Témavezető:

Dr. Bécsi Tamás

Közlekedés- és Járműirányítási Tanszék
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi
Egyetem

2021

1. Bevezetés

A közlekedés iránti igény fokozatosan növekszik, ami új kihívások elé állítja a közlekedéstudomány és járműautomatizálás különböző ágait. Az autonóm járművekkel kapcsolatos kutatások több évtizedre nyúlnak vissza. A komfort, biztonság, automatizálás terén elért jelentős eredmények ellenére autonóm járművek még nem érhetők el a piacon. Különböző akadályokat kell elhárítani. Technikai oldalról megközelítve a jármű pozíciójának meghatározásához és az ezzel összefüggő környezetérzékeléshez szükséges precíz, megfizethető szenzorok nem elérhetőek. Bizonyos érzékelők csak tiszta időjárási körülmények között működnek megbízhatóan. Vannak szenzorok, melyek teljesítménye jelentősen felülmúlja az emberi érzékelést ám a begyűjtött információ feldolgozásának hatékonysága elmarad az emberek látáson alapuló vezetésétől. Az egyik legfontosabb jogi akadály az autonóm járművek előtt az, hogy általában csak szellemileg és fizikailag megfelelő állapotban lévő emberek vezethetnek autót az utakon.

A növekvő automatizáltsággal együtt a közlekedési balesetek áldozatainak száma csökken. Mostanára a balesetben meghalt járművezetők száma annyira lecsökkent, hogy a fókusz a gyalogosok védelmére fejlesztett aktív és passzív biztonsági rendszerekre irányult. Az alapszintű vezetőtámogató rendszerek, mint a sávtartás vagy adaptív tempomat már elérhetőek alsó-középosztályos autókban. A kooperatív környezet- és szituációérzékelés elengedhetetlen összetevője a következő generációs vezetőtámogató rendszereknek és a teljesen autonóm járműveknek. Ezen funkciókhoz szükséges adatok mennyisége és típusa újszerű adatfúziós eljárások kifejlesztést igényli.

Autonóm funkciókkal ellátott közúti járművek számára nélkülözhetetlen a környezet megbízható érzékelése. Az olyan vezetőtámogató megoldásoknak, mint pl. az objektum kikerülés vagy a sávváltó asszisztens fel kell ismerniük a forgalmi szituációt, amiben a jármű részt vesz. A magasabb szintű célok eléréséhez, mint pl. a forgalomnedzsment vagy útidő becslés floating car adatokkal [11], az

információt minden elérhető járműből és útmenti egységből szükséges begyűjteni és optimálisan feldolgozni [2]. Nagy és heterogén rendszerekben, ahol a kommunikáció V2V (vehicle to vehicle) és V2I (vehicle to infrastructure) formában valósul meg az adatfúzió egy nehéz feladat [1]. A Bayes formalizmuson alapuló becslő módszerek igen elterjedtek [3], a különböző állapotterés Kálmán-szűrő eljárások azonban nem minden esetben használhatók kényelmesen az objektumok és a mérések számának erős ingadozása miatt, ami a közúti közlekedésben természetes jelenség.

A közúti közlekedésben történő állapotbecslésnek különböző sajátosságai vannak. A járművek navigálnak, amihez időről időre manővereket hajtanak végre. A manőverek detektálása, esetleg előrejelése segíthet pontosabb állapotbecslést adni és felismerni az aktuális forgalmi helyzetet. Ezzel a viselkedés előrejelzés problémájához érkezünk, amiben a megfigyelő járműnek meg kell becsülnie a többi forgalmi résztvevő jövőbeli trajektóriáját [7]. A klasszikus állapotbecslő eljárások nem alkalmasak középtávú előrejelzésekre, mivel nem veszik tekintetbe a forgalom résztvevői közötti interakciót. Egy másik fontos tulajdonsága a közúti forgalomnak, hogy a a forgalomban résztvevők szám egy adott területen belül változik. Ehhez jön még a láthatóság problémája, mivel a járművek gyakran kitakarják egymást vagy kimennek a szenor látószögéből.

Az autonóm járműveknek több problémát is meg kell oldaniuk az önálló közlekedéshez. A navigáció egy magas szintű feladat, ami több részfeladatból tevődik össze. A járműnek lokalizálnia kell magát egy térképen. A térkép lehet statikus, dinamikus vagy ismeretlen, amikor is feladat a térkép létrehozása (SLAM, simultaneous localization and mapping) a környezetérzékelő szenzorok jelei alapján. A SLAM problémát megoldottnak tekinthetjük egy zárt, statikus környezetben [9]. Ezzel ellentétben dinamikus környezetben a mozgó objektumok azonosítása és a navigálás közöttük nehéz és még nem megoldott feladat [10]. Klasszikus állapotbecslő megoldások sok problémára hatékony megoldást nyújtanak, azonban alkalmazhatóságuk korlátozott a dinamikus környezetet és a különböző adatbizonytalanságokat tekintve [6].

A dolgozat közúti forgalomban alkalmazható állapotbecslő eljárásokkal kapcsolatos eredményeket mutat be. A három fő irányvonal a multiszenzoros, multimodelles és multiobjektumos becslés. Az eljárásokhoz alkalmazott matematikai módszerek a klasszikus valószínűségszámításon kívül a valószínűségi halmazok. Mindegyik alkalmazott becslő eljárás a Bayes formalizmusból származtatható. A dolgozatban alkalmazott becslő eljárások a Kálmán és részecskeszűrő. Ezekre építkezik a magasabb szintű multimodelles struktúra. Nem modellezett dinamika és geometria okozta megszorításokat az állapottéren értelmezett kényszerekkel veszem figyelembe. A valószínűségi halmazokon alapuló eljárások, a Bernoulli és a probability hypothesis density (PHD) szűrő is levezethető a Bayes formalizmusból. Az ezt lehetővé tévő matematikai eszköztár a véges halmazok statisztikája (finite set statistics) [8].

A dolgozat első fele a Bernoulli szűrő közúti alkalmazásaival foglalkozik. A valószínűségi halmazok elméletéből származó Bernoulli szűrő egy egzakt és optimális eljárás, amely egy objektum állapotát képes becsülni háttérzaj és változó láthatósági viszonyok között. Az első fejezet közúti közlekedésben alkalmazható multiszenzoros objektum detektálással és állapotbecsléssel foglalkozik. A fejezetben röviden bemutatom a létrehozott szimulációs környezetet, majd a vonatkozó elméleti háttérrel a szűrő egyenleteinek ismertetéséhez. A Bernoulli szűrőt a multiszenzoros szimulációs környezetben részecskeszűrőként implementálom. A szűrő teljesítményét a fejezet végén több szempont szerint értékelem.

A második fejezetben a Bernoulli szűrő multimodelles alkalmazásaival foglalkozok. Két stratégiát mutatok be. Az első egy absztrakt környezetben történő pontszerű test mozgásának becslését végzi. A másik eljárás egy közúti környezetben alkalmazható multiszenzoros megoldás részecskeszűrőként implementálva. A szűrőkből explicit értékek nyerhetők ki az objektum létezésére és az aktuális manőverre vonatkozóan.

A harmadik fejezet kényszerezett szűrőkkel történő manőverdetektálással foglalkozik. A módszer az előre definiált manőverekhez illesztett kényszerezett szűrőket használ multimodelles struktúrában.

A tekintetbe vett manővereket egyesesen egyenlőségi és egyenlőtlen-ségi, puha illetve kemény jellegű, állapotokra értelmezésként kényszerek írják le. A kényszerek alkalmazásának módja a mérési vektor kibővítése illetve a kényszermentes állapotvektor vetítése a kényszer síkjára. Az eljárás teljesítményét absztrakt környezetben és szimulált közlekedési szimulációban teszteltem.

A negyedik fejezet a multiobjekumos PHD szűrőeljárás közötti alkalmazásával foglalkozik. A PHD szűrő a valószínűségi halmazok elméletéből származtatott eljárás, amely a sztenderd mérési modell használata esetén lineárisan skálázódódik a mérések és a becsült objektumok számával is. Az eljárás sajátossága, hogy a detektált objektumok számának várható értéke erősen ingadozik a mérési hibák miatt. Közúti forgalomban a járművek gyakran eltakarják egymást, ami erősen rontja a becslő teljesítményét. Ezt a körülményt egy látthatósági modell kifejlesztésével vettem figyelembe, amelyből a detektálás valószínűsége analitikusan számolható. Az ideiglenesen takarásban lévő objektumok állapotának becslésére egy részecskeszűrőn alapuló eljárást dolgoztam ki, amelyben külön kezelem a detektálható és a takarásban lévő objektumokat. Az eljárás teljesítményét absztrakt és forgalmi szimulációkban illetve autópályás radarmérések segítségével mutatom be.

2. Új eredmények

1. tézis

Közúti forgalomban alkalmazható multiszenzoros Bernoulli szűrőt fejlesztettem. A Bernoulli szűrőt részecskeszűrővel valósítottam meg, ahol a születő részecskéket a mérésekből generálom. A bemutatott eljárás a likelihood értékeket az állapot térben számítja, egyben a születő részecskék sűrűségfüggvényével. Az alkalmazási környezet egy szimulált autópályás forgalmi helyzet, ahol járművek megfigyelnek egy objektumot, ami időnként elhagyja a szenzorok látóterét. A szűrő teljesítményét a modell és mérési zaj, részecskék száma és a használt időlépés mentén vizsgáltam.

Kapcsolódó publikációk: [Toro1], [Toro7], [Toro6]

- Szimulációs környezetet készítettem Matlab-ban, amely multiszenzoros, multiobjektumos becselő eljárások fejlesztését és tesztelését teszi lehetővé.
- A tervezett forgalmi scenárióban az úton haladó autók radar-mérések segítségével figyelnek meg egy objektumot.
- A Bernoulli szűrő egy változó láthatósági viszonyok között mozgó objektum detektálására és követésére alkalmaztam.
- A szűrőt részecskeszűrőként implementáltam állandó sebességű mozgási modell felhasználásával. A részecskeszűrők tulajdonsága, hogy nem szükséges bennük a mérési modellt invertálni, az az algoritmusban azonban elvégzi az invertálást. A mérési vektor állapot térbe transzformálása lehetővé teszi a likelihood értékek hatékony számítását. A multiszenzoros korrekciós lépések iteratívan kerülnek végrehajtásra.
- A születő részecskék számára a sűrűségfüggvény az invertált mérési vektorokból épül fel, ami nem igényel külön erőforrást. A születő részecskék közvetlenül az állapot térből generálhatók.

- A bemutatott szűrőeljárás teljesítményét és skálázódását Monte Carlo szimulációkkal vizsgáltam négy független paraméter mentén.

2. tézis

Két szűrőstratégiát terveztem, amik lehetővé teszik a Bernoulli szűrő multimodelles implementálását. Az első megoldás az interacting multiple model (IMM) struktúra közvetlen kiterjesztése, amiben modellvalószínűség és létezési valószínűség értékeket kapunk. A szűrőegyenleteket részecskeszűrővel közelítem, amelyek egy gaussi interfészen keresztül kommunikálnak a magasabb szintű logikával. A második megoldás egy tisztán részecskeszűrőn alapuló Bernoulli IMM becslő, amely képes kezelni az állapotfüggő detektálási valószínűségeket és túlélési valószínűségeket. Az eljárások hatékonyságát absztrakt és közúti szituációt modellező multiszenzoros környezetben vizsgáltam.

Kapcsolódó publikációk: [Toro8], [Toro2], [Toro3]

- Az interacting multiple model struktúrában implementáltam a Bernoulli szűrőt. Az eljárás közvetlen modellvalószínűség és objektum létezési valószínűség értékeket szolgáltat.
- Az elemi szűrőket részecskeszűrők valósítják meg, amelyek egy gausszi interfészen keresztül kapcsolódnak az IMM struktúrába.
- Az bemutatott módszer könnyen megvalósítható Gauss keverék modellel is. Egy előzetes adatasszociációs lépés lehetővé teszi a multiobjektumos környezetben való használatot.
- Egy másik megközelítésben [14] munkájából kiindulva levezetem a tisztán részecskeszűrőkkel működő IMM Bernoulli szűrő egyenleteit.

- A kapott szűrő struktúrát egy multiszenzoros közúti forgalmat modellező scenárióban implementáltam és értékeltem.

3. tézis

Egy közúti forgalomban alkalmazható állapotbecslő eljárást terveztem, aminek segítségével egy megfigyelt jármű manővereit lehet detektálni. Az eljárás fő összetevői a multimodelles becslő struktúra és a kényszerezett Kálmán szűrők. Mindegyik szűrő egy előre definiált manőverhez van finomhangolva az állapottéren értelmezett kényszerfeltételek segítségével. Az elemi szűrők az interacting multiple model struktúrában működnek és a becslési hiba reziduálisai alapján kerülnek kiértékelésre.

Kapcsolódó publikációk: [Toro4], [Toro9], [Toro3]

- Az eljárás az interacting multiple model struktúrában működik, ahol az elemi szűrők Kálmán vagy részecskeszűrők.
- A β -dominancia effektus hatását a kényszerezett becslés reziduálisainak használatával sikerült elkerülni.
- Összefüggést vezettem le a model likelihood számítására a kényszerezett becslés reziduálisának és kovariancia mátrixának használatával.
- A bemutatott szűrőeljárás használható puha vagy kemény, lineáris egyenlőségi kényszerekkel. Puha, lineáris egyenlőtlenségi kényszerek esetén speciális esetekben használható.
- Lineáris egyenlőtlenségi kényszerek esetén az optimális becslés számítása egy kvadratikus programozási feladathoz vezetne. Az állapotokra függetlenül ható kényszerek esetén analitikusan számítható a megoldás és a model likelihood értékek hatékonyan számolhatóak.

- A manővereket az állapotokon értelmezett kényszerekkel definiálom. A mozgási modell minden esetben ugyanaz, a kényszerek teszik az elemi szűrőket egyedivé.
- Az eljárás hatékonyságát MATLAB/Simulink és PreScan szoftverkörnyezetben készített szimulációkban értékeltem ki.

4. tézis

A probability hypothesis density (PHD) algoritmuson alapuló, közúti forgalomban alkalmazható multiobjektumos szűrlést terveztem. Három ponton fejlesztettem tovább a klasszikus PHD szűrőt. A lineáris skálázódás igényét szem előtt tartva a sztenderd mérési modell használatával módszert dolgoztam ki a többszörös detektálás kezelésére. Egy geometriai modell segítségével becsülhető az objektumok láthatósága, ezzel pedig detektálhatóságuk valószínűsége. Az ideiglenesen takarásban lévő objektumok állapotának becslésére egy részecskeszűrőn alapuló eljárást dolgoztam ki, amelyben külön kezelem a detektálható és a takarásban lévő objektumokat. Az eljárás teljesítményét absztrakt és forgalmi szimulációkban illetve autópályás radarmérések segítségével mutatom be.

Kapcsolódó publikáció: [Toro5]

- A sztenderd mérési modellt használtam, hogy a szűrő lineáris skálázódása megmaradjon.
- Az objektumok láthatóságát egy analitikus sűrűségfüggvénnyel közelítettem. A geometriai körülményekből meghatározható az a tartomány, amelyre integrálva a sűrűségfüggvényt megkapjuk egy objektum detektálási valószínűségét.
- A PHD szűrőt részecskeszűrővel valósítottam meg. Az objektumok címkézéséhez nem bővítettem ki az állapotteret egy diszkrét változóval.

- A szűrő megkülönbözteti a nem detektált, rejtett és detektált részecskéket.
- Az adatasszociáció és a címkézés a Kullbach-Leibler divergenzia segítségével valósul meg.
- A szűrőeljárás teljesítményét egyrészt szintetikus tesztekkel vizsgáltam, mind absztrakt, mind közúti szituációkban, másrészt autópályás radarmérések offline kiértékelésével.
- A becslési hibákat az OSPA metrika segítségével számszerűsíttem.

3. Gyakorlati vonatkozások

A fejlett vezetőtámogató rendszerek számára fejlesztett eljárások szükségszerűen valós időben kell, hogy fussanak, így fontos az algoritmusok számításigényének és skálázódásának ismerete. A részecseszűrők a becslő eljárások számára olyan módon adnak közelítő megoldásokat, hogy azokat futásidőben lehet finomhangolni, optimalizálni. A multiszenzoros Bernoulli szűrő részecseszűrős megvalósítása az ismertett megközelítésben azt használja ki, hogy a szenzormodell kiértékelése elkerülhető és a különböző mozgó érzékelőkből érkező mérések közvetlenül felhasználhatóak likelihood számolásra. Ez a módszer alkalmas lehet az erőforrásigény jelentős csökkentésére, amennyiben a szenzormodell kiértékelés számításigényes és sok részecskét használunk. A részecskék számát és esetleg particionálását futás közben, adaptívan lehet változtatni úgy, hogy az aktuális forgalmi helyzetnek és a beérkező mérések számának megfelelően optimálisan fusson az algoritmus.

A manőverdetektáló eljárás egy lehetséges alkalmazása, hogy klasszikáló és adatszolgáltató szerepben segítse egy magasabb szintű logika, pl. egy ütközéd előrejelző rendszer működését [13]. A kinyert információ segíthet felismerni veszélyes helyzeteket vagy elkerülhetetlen ütközéseket és felrajzolni a járművek közötti interakciós gráfot.

Közúti közlekedésben a multiobjektumos állapotbecslés problémája természetszerűleg adódik. A PHD szűrő viszonylag könnyen implementálható egy egyszerű formában, a hatékony működéshez viszont a környezetet hűen leíró paraméterek szükségesek. Az állapotbecslésen, címkézésen és objektumkövetésen túl a PHD szűrő használható a háttérzaj becslésére vagy a többutas jelterjedlés figyelembevételére vagy egyéb, a sztenderd mérési modell által le nem írt tulajdonság modellezésére.

4. További kutatási irányok

Ebben a munkában a megfigyelő állapotának bizonytalanságát nem vettem figyelembe. Egy szenzor és egy objektum szituációban működő megoldás kiterjeszthető multiszenzoros felállásra [5]. A megfigyelő járműveknek az objektumon kívül egymást is detektálniuk és követniük kell, amihez a multi-Bernoulli filter alkalmazása szükséges [12]. Az út mentén haladó járművek puha kényszereknek vannak kitéve. Ez az információ beépíthető a szűrőbe pl. egy állandó szögsebességű mozgási modell segítségével. Egy sávdetektáló algoritmus kimenetét felhasználva a jármű várható trajektóriája megbecsülhető és ez az információ is felhasználható a megfelelő mozgási modell kiválasztására, akár adaptív modellváltási valószínűségek használatával is. Kooperatív érzékelés esetén a járművek közötti kommunikáció teljesítményét és minőségét figyelembe kell venni.

A bemutatott Bernoulli szűrő az IMM struktúrában egy koncepció, aminek hatékonysága egy egyszerű multiszenzoros szituációban lett vizsgálva. Több továbbfejlesztési irány is lehetséges. Az IMM struktúrában használhatóak különböző állapottereken értelmezett állapotvektorok [4]. A feldolgozandó mérések számának maximalizálása segíthet csökkenteni az algoritmus számítási igényét. Ebben az esetben ki kell számítani a szenzorokból érkező információ várható mennyiségét és aszerint szelektálni.

A manőverdetektáló eljárással kapcsolatos továbbfejlesztési irányok a következők. Különböző mozgási modellek, kényszerek és álla-

potteres felírások kombinációinak vizsgálata szükséges egy hatékony eszköztár létrehozásához. Ehhez megfelelő metrika definiálása szükséges, ami alapján elvégezhető a becslő algoritmus teljesítményének számszerűsítése. A bemutatott eljárás rugalmas az alkalmazott kényszerek típusainak tekintetében és sokféle manőver vagy forgalmi szituáció modellezhető segítségével. Egy átfogó tanulmány felderítheti, hogy egyes manőverek mely kényszerekkel és mozgási modellekkel detektálhatóak a leghatékonyabban. Ha görbült útszakasz közeledik, akkor egy állandó szögsebességű modellre lehet váltani, ami a változtatható struktúrájú IMM (VSIMM) becslő eljárás alkalmazását teszi indokolttá. Egy részecskeszűrőn alapuló megoldás nagyobb szabadságot tud adni az alkalmazott rendszermodell számára, és ami még fontosabb, a kényszerek számára is. Részecskéket húzhatunk egy alkalmasan konstruált eloszlásból, vagy a likelihood függvény célszerű módosításával elérhetjük, hogy egy adott, szofisztikált manővert tudjunk leírni.

A PHD szűrő implementációjával kapcsolatban elmondható, hogy az állapotfüggő detektálási valószínűség mellett az állapotfüggő túlélési valószínűség bevezetése javítania a performancián. Itt különösen az objektumok mozgásának, látótárból való kilépésének modellezésére, illetve az irreleváns tartományok definiálására kell gondolnunk. A megfigyelő jármű állapotának monitorozása illetve becslése is egy lehetséges továbbfejlesztési irány, amelynek pontosabb ismerete lehetővé tenné az objektumok hatékonyabb követését sávváltó vagy egyéb manőverek végrehajtásakor. A radar mérések tekintetében a zaj illetve az érdektelen objektumok szűrése egyelőre nem egy megoldott probléma. Állapotfüggő zajmodellek kifejlesztése robosztusabb szűrő algoritmusokat eredményezne. Amennyiben a fals mérések kellőképpen szeparálhatóak, úgy lehetőség nyílik a zero-false-alarm CPHD szűrő implementálására, amely továbbra is lineáris skálázódást mutat, de a becsült objektumok számának második momentumát is becsli.

Publikációk

- [Toro1] Olivér Törő, Tamás Bécsi, and Szilárd Aradi. Design of lane keeping algorithm of autonomous vehicle. *Periodica Polytechnica. Transportation Engineering*, 44(1):60, 2016.
- [Toro2] Olivér Törő, Tamás Bécsi, Szilárd Aradi, and Péter Gáspár. Imm bernoulli gaussian particle filter. *IFAC-PapersOnLine*, 51(22):274–279, 2018.
- [Toro3] Olivér Törő, Tamás Bécsi, Szilárd Aradi, and Péter Gáspár. Sensitivity and performance evaluation of multiple-model state estimation algorithms for autonomous vehicle functions. *Journal of Advanced Transportation*, 2019:1–13, 2019.
- [Toro4] Olivér Törő, Tamás Bécsi, Szilárd Aradi, and Adám Vellai. Multimodel state estimation in road traffic using constrained filtering. In *2018 IEEE 18th International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CIN-TI)*, pages 000205–000210. IEEE, IEEE, 2018.
- [Toro5] Olivér Törő, Tamás Bécsi, and Péter Gáspár. Phd filter for object tracking in road traffic applications considering varying detectability. *Sensors*, 21(2):472, 2021.
- [Toro6] Olivér Törő, Tamás Bécsi, and Szilárd Aradi. Performance Evaluation of a Bernoulli filter Based Multi-Vehicle Cooperative Object Detection. *Transportation Research Procedia*, 27:77–84, 2017.
- [Toro7] Olivér Törő, Tamás Bécsi, Szilárd Aradi, and Péter Gáspár. Cooperative object detection in road traffic. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1):264–269, 7 2017.
- [Toro8] Olivér Törő, Tamás Bécsi, Szilárd Aradi, and Péter Gáspár. IMM Bernoulli Filter for Cooperative Object Tracking in Road Traffic. *IFAC-PapersOnLine*, 51(9):355–360, 2018.

- [Toro9] Olivér Törö, Tamás Bécsi, Szilárd Aradi, Máté Kolat, and Péter Gáspár. Maneuver classification for road vehicles with constrained filtering techniques. *IFAC-PapersOnLine*, 53(2):15495–15500, 2020. 21th IFAC World Congress.

Hivatkozások

- [1] Chris Bachmann, Baher Abdulhai, Matthew J Roorda, and Behzad Moshiri. A comparative assessment of multi-sensor data fusion techniques for freeway traffic speed estimation using micro-simulation modeling. *Transportation research part C: emerging technologies*, 26:33–48, 2013.
- [2] Adam Danczyk, Xuan Di, and Henry X Liu. A probabilistic optimization model for allocating freeway sensors. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 67:378–398, 2016.
- [3] Nour-Eddin El Faouzi, Henry Leung, and Ajeesh Kurian. Data fusion in intelligent transportation systems: Progress and challenges—a survey. *Information Fusion*, 12(1):4–10, 2011.
- [4] Karl Granström, Peter Willett, and Yaakov Bar-Shalom. Imm without a match. In *Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing (CAMSAP), 2015 IEEE 6th International Workshop on*, pages 109–112. IEEE, 2015.
- [5] Simon J Julier and Amadou Gning. Bernoulli filtering on a moving platform. In *Information Fusion (Fusion), 2015 18th International Conference on*, pages 1511–1518. IEEE, 2015.
- [6] Bahador Khaleghi, Alaa Khamis, Fakhreddine O Karray, and Saiedeh N Razavi. Multisensor data fusion: A review of the state-of-the-art. *Information Fusion*, 14(1):28–44, 2013.
- [7] Stéphanie Lefèvre, Dizan Vasquez, and Christian Laugier. A survey on motion prediction and risk assessment for intelligent vehicles. *Robomech Journal*, 1(1):1, 2014.

- [8] R. Mahler. *Statistical Multisource-Multitarget Information Fusion*. Artech House, Boston, MA, 2007.
- [9] Philippe Moutarlier and Raja Chatila. An experimental system for incremental environment modelling by an autonomous mobile robot. In *Experimental Robotics I*, pages 327–346. Springer, 1990.
- [10] Ardhisha Pancham, Nkgatho Tlale, and Glen Bright. Literature review of slam and datmo. In *4th Robotics and Mechatronics Conference of South Africa (ROBMECH 2011)*, CSIR, Pretoria, South Africa, 23-25 November 2011, 2011.
- [11] Mahmood Rahmani, Erik Jenelius, and Haris N Koutsopoulos. Floating car and camera data fusion for non-parametric route travel time estimation. In *17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pages 1286–1291. IEEE, 2014.
- [12] Augustin-Alexandru Saucan, Mark J Coates, and Michael Rabbat. A multisensor multi-bernoulli filter. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 65(20):5495–5509, 2017.
- [13] Alvin Sebastian, Maolin Tang, Yanming Feng, and Mark Looi. Multi-vehicles interaction graph model for cooperative collision warning system. In *Intelligent vehicles symposium, 2009 IEEE*, pages 929–934. IEEE, 2009.
- [14] Feng Yang, Wanying Zhang, Yazhe Su, and Xuanzheng Yao. An adaptive mode transition probability imm bernoulli filter. In *2016 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA)*, pages 211–215. IEEE, 2016.