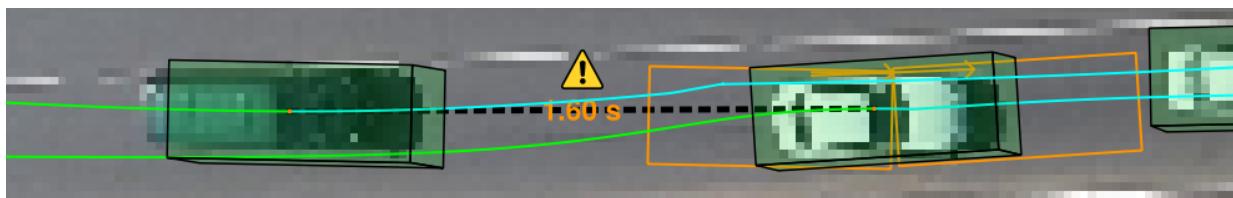


Preemptivní bezpečnostní analýza dopravního chování z trajektorií

Dominik Zapletal*



Abstrakt

Tato práce se zabývá preemptivní bezpečnostní analýzou dopravního chování účastníků dopravního uzlu. Bezpečnostní analýza je v této práci založena na zpracování trajektorií vozidel, které jsou získávány z leteckých záznamů pořízených drony. Problém bezpečnostní analýzy je řešen implementací indikátoru dopravního konfliktu času do kolize TTC, který byl rozšířen o Ackermanův model zatáčení automobilu pro věrohodnější simulaci chování řidiče.

Klíčová slova: analýza bezpečnosti v dopravě — indikátory dopravních konfliktů — vyhodnocení bezpečnosti — Ackermanův model — čas do kolize

Přiložené materiály: N/A

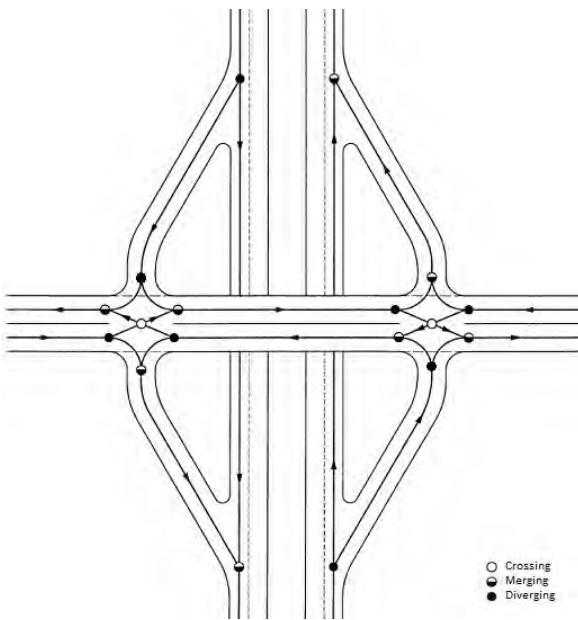
*xzapletal34@stud.fit.vutbr.cz, Fakulta informačních technologií, Vysoké učení technické v Brně
zendulka@fit.vutbr.cz, vedoucí diplomové práce, Fakulta informačních technologií, Vysoké učení technické v Brně
david.herman@rcesystems.cz, konzultant diplomové práce, RCE systems s.r.o.

1. Úvod

Snaha o dosažení co největší bezpečnosti dopravy je jedním z hlavních cílů dopravních expertů, analytiků a inženýrů v automobilovém průmyslu. Na základě dostupných statistických údajů se v roce 2017 na českých silnicích událo 103 821 dopravních nehod, při kterých zemřelo 502 osob, 2 339 osob bylo těžce zraněno a 24 740 osob bylo zraněno lehce. Hmotná škoda způsobená při těchto nehodách byla odhadnuta na 6,3 miliard Kč [1]. Podle Svazu dovozců automobilů bylo začátkem roku 2017 v České Republice registrováno celkem 5 368 660 automobilů [2]. Přibližně každé 50. vozidlo se v tomto roce zúčastnilo dopravní nehody.

Pro dosažení větší bezpečnosti v dopravě je cílem výrobců automobilů snižovat následky vzniklých dopravních nehod v podobě implementace různých ochranných prvků ve vozidle. Mnohem více žádoucí

je zavádět v dopravních uzlech taková bezpečnostní opatření, která minimalizují šanci vzniku dopravního konfliktu a zároveň optimalizují dopravní toky [3]. Typickým příkladem těchto opatření jsou v Evropě dobře známé kruhové objezdy [4] nebo například křižovatka typu *DDI (Diverging Diamond Interchange)*, díky které se v roce 2009 ve Springfieldu, Missouri, podařilo při nájezdu a výjezdu na světově známou dálnici Route 66 snížit počet konfliktních míst pro vznik dopravní nehody z 32 na 14 [5] (viz obrázek 1). Metody pro vyhodnocení bezpečnosti dopravních úseků a situací jsou důležité také v oblasti autonomních řídících systémů [6]. Začíná být čím dál více vyžadováno informace o bezpečnosti získávat ne pouze na základě shromážděných statistik o nehodách, ale také na základě dat získaných v reálném čase. Neméně důležitá je také možnost identifikovat a vyhodnotit konfliktní dopravní situace, u kterých ke kolizi dvou či více účastníků silničního

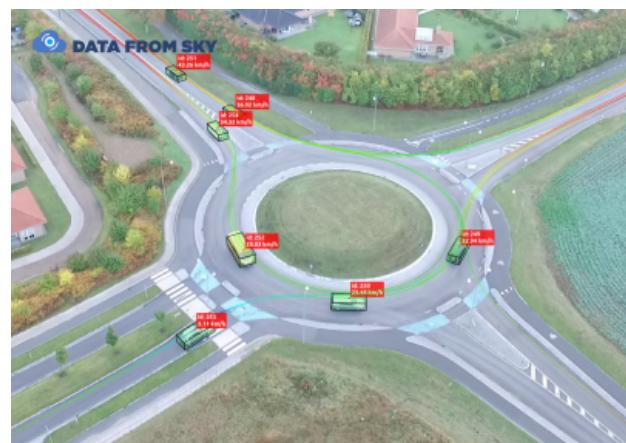


Obrázek 1. Diagram konfliktů pro křižovatku typu DDI (*Diverging Diamond Interchange*), který výrazně snižuje počet míst potenciálního vzniku dopravního konfliktu (obrázek převzat z [5]).

provozu sice nedošlo, ale které jsou objektivně považovány za nebezpečné, včetně vyhodnocení jejich závažnosti. Za tímto účelem je potřeba nalézt metriky, na základě kterých bude možné konfliktní dopravní situace identifikovat a ohodnotit jejich závažnost.

Bezpečnostní analýza dopravního chování účastníků silničního provozu je v této práci založena na analýze časoprostorových dat, trajektorií, získaných ze zpracovaných leteckých video záznamů pořízených drony. Extrakce trajektorií z leteckých video záznamů je provedena automatickým zpracováním obrazových dat detekčním a sledovacím systémem [7, 8] (obrázek 2). Data získaná z videí pořízených drony mají velký potenciál v oblasti bezpečnosti v dopravě díky jedinečným pozorovacím úhlům na dopravní uzel a neustále se zvyšující kvalitou a stabilitou pořízených videozáZNAMŮ.

V této práci byl implementován indikátor dopravního konfliktu čas do kolize TTC, který byl rozšířen o Ackermanův model zatačení automobilu pro věrohodnější simulaci chování řidiče. Dále byla rozšířena současná verze aplikace *DataFromSky Viewer*¹ sloužící k analýze časo-prostorových dat získaných ze zpracovaných leteckých videí pořízených drony o vizualizaci detekovaných dopravních konfliktů. Při testování na



Obrázek 2. Příklad výstupů z detekčního systému zpracovávající letecké záznamy pořízené drony v podobě nadetekovaných účastníků silničního provozu ve videozáZNAMU a trajektorií jejich pohybu v prostoru [7, 8].

reálných datech bylo dosaženo průměrné délky zpracování jedné trajektorie 15,5ms na procesoru i7 – 8550U.

2. Indikátory dopravních konfliktů

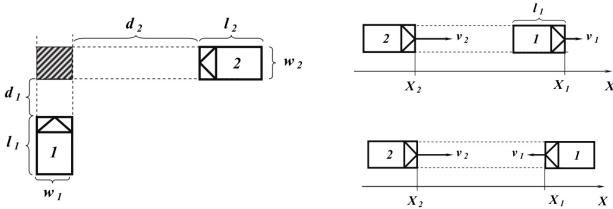
Obecná definice dopravního konfliktu byla předmětem mnoha studií v oblasti vyhodnocování bezpečnosti v dopravě. Jedna z definic dopravního konfliktu je formulována jako „pozorovatelná situace, ve které se dva nebo více účastníků silničního provozu přiblížují k sobě v prostoru a čase v takové míře, že jejich vzájemná kolize je bezprostřední, pokud zachovají svůj směr a rychlosť pohybu“ [9]. Pro detekci dopravních konfliktů se používají tzv. *indikátory dopravních konfliktů*.

Hlavním předpokladem dopravních konfliktů je jejich častější výskyt oproti samotným dopravním nehodám. Indikátory dopravních konfliktů jsou definovány jako míra blízkosti k dopravní nehodě a jsou založeny na časo-prostorových informacích. Nejčastěji se pro rozpoznání dopravního konfliktu používají *indikátory temporální* [10, 11].

Čas do kolize (TTC)

Čas do kolize TTC (*Time To Collision*) je jedním ze základních indikátorů pro detekci dopravního konfliktu. Je také často používán jako jeden ze vstupních parametrů indikátorů jiných. Je definován jako zbývající čas do kolize dvou účastníků silničního provozu v případě zachování směru jejich pohybu a rozdílu rychlosti. Čím menší je hodnota TTC, tím větší je pravděpodobnost vzniku kolize účastníků silničního provozu. Určení času do kolize předpokládá, že rychlosť vedoucího vozidla je menší než rychlosť vozidla

¹*DataFromSky Viewer* je aplikace sloužící pro vizualizaci trajektorií účastníků dopravního provozu ve videozáZNAMech pořízených drony, vyhodnocení dopravních statistik dopravního uzlu a zobrazování dalších informací o účastnících dopravního provozu [8]. V rámci této práce je aplikace rozšířena o vizualizaci detekovaných dopravních konfliktů.



Obrázek 3. Grafické znázornění indikátoru času do kolize TTC (obrázek převzat z [12]).

$$TTC_f(t) = \frac{X_1(t) - X_2(t) - L}{V_2(t) - V_1(t)} \quad (1)$$

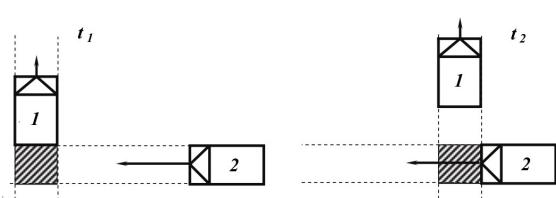
$V(t)$ rychlosť vozidla v čase t

$X(t)$ pozice vozidla v čase t

L délka vozidla

l označení vedoucího vozidla (*leading vehicle*)

f označení sledujícího vozidla (*following vehicle*)



Obrázek 4. Grafické znázornění indikátoru času po průjezdu PET (obrázek převzat z [12]).

$$PET = t_2 - t_1 \quad (2)$$

t_1 čas opuštění konfliktní zóny vozidlem 1

t_2 čas vstupu do konfliktní zóny vozidlem 2

sledujícího v případě shodného směru vektoru rychlosťi obou těchto vozidel. Další případy rozdílných směrů vektorů rychlosti vozidel, při kterých lze hodnotu času do kolize spočítat, jsou zobrazeny na obrázku 3. TTC je spojitou funkcí času po dobu zachování kolizního směru obou účastníků silničního provozu [11].

Hodnotu času do kolize dvou za sebou jedoucích vozidel je možné vypočítat pomocí vzorce 1. Uvádí se, že hodnota času do kolize menší než délka reakční doby řidiče je považována za kritickou. Na základě studií byly nalezeny různé prahy kritických hodnot TTC pro různé dopravní situace. Při přibližování vozidla k standardní styčné nebo průsečné křížovatce z vedlejšího směru byla zjištěna hraniční hodnota TTC v rozsahu 1 – 2s. V případě světelných křížovatek se jedná o rozmezí 1,6 – 3s. Pro vozidla jedoucí v městském tunelu se hraniční hodnoty pohybují v rozsahu 2 – 4s [11].

Čas po průjezdu (PET)

Čas po průjezdu PET (Post-Encroachment Time) patří mezi indikátory událostí blízkých dopravním nehodám (*near-crash events*). Při výpočtu hodnoty PET se nepředpokládá kolize dvou účastníků silničního provozu. Sleduje se časový interval mezi průjezdy stejně oblasti dvěma různými účastníky silničního provozu. Na obrázku 4 je znázorněn indikátor času pro průjezd. Hodnota PET je vypočítána jako časový úsek od opuštění kritické oblasti prvním účastníkem silničního provozu do vstupu do kritické oblasti druhým účastníkem silničního provozu. Tento indikátor je vhodné použít v případě existence průsečných trajektorií [11, 13].

Hodnotu indikátoru PET je možné vypočítat pomocí vzorce 2. Čím nižší je hodnota času po průjezdu, tím vyšší je pravděpodobnost vzniku dopravního kon-

fliktu. Obecně je za kritickou hodnotu indikátoru PET považován čas menší nebo rovnou 1 – 1,5 sekundy [11].

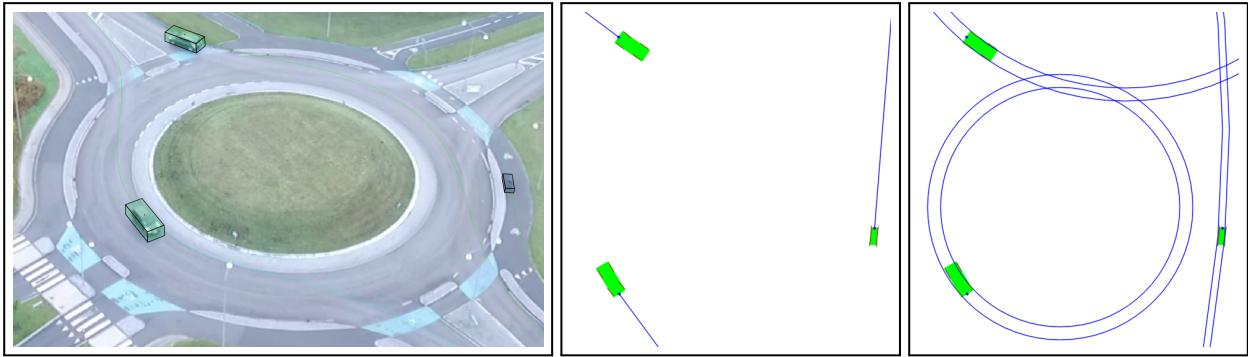
3. Detekce dopravních konfliktů a vizualizace v DataFromSky Vieweru

V rámci řešení problému bezpečnostní analýzy dopravního chování účastníků silničního provozu z trajektorií byl vytvořen simulátor, který simuluje a vizualizuje předpokládané chování jednotlivých účastníků silničního provozu a detektuje možnost vzniku vzájemné kolize mezi nimi. Implementace simulátoru byla provedena v programovacím jazyce C++ s použitím knihovny Qt [14], OpenCV [15] a programovacího rozhraní OpenMP [16] pro paralelizaci výpočtu na procesoru.

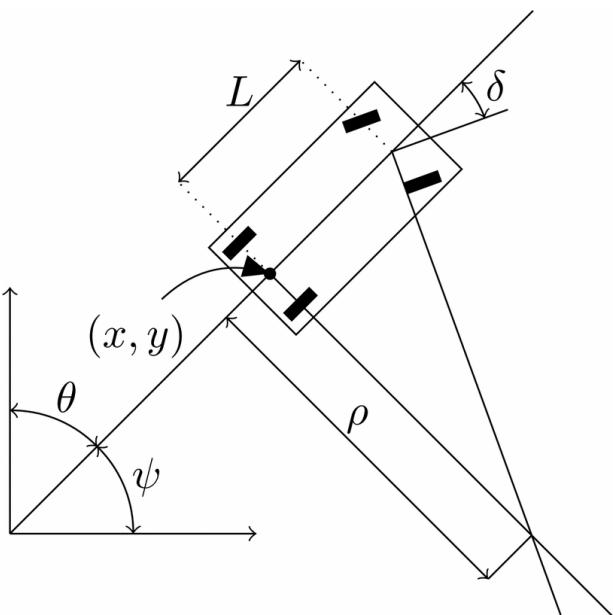
V každém stavu scény, který je odvozen od snímkové frekvence videa, je prováděna simulace pohybu jednotlivých účastníků silničního provozu. Nejdříve byla implementována predikce pohybu na základě vektoru rychlosti účastníků silničního provozu v daném stavu scény. Potenciální vznik kolize mezi účastníky ve scéně pak odpovídá standardnímu výpočtu hodnoty času do kolize TTC.

Při nastavení prahové hodnoty času do kolize a následné analýze vzniklých konfliktů mezi účastníky silničního provozu se ve scéně často opakovaly evidentně falešné případy dopravních konfliktů. Důvodem vzniku takových případů je nedostatečná informace o směru pohybu získaná z vektoru rychlosti účastníka dopravního provozu. Standardní implementace času do kolize je tedy vhodná pro dopravní situace, kdy jednotliví účastníci dopravního provozu nemění zásadně svůj směr pohybu (například na dálnici), ale pohybující se v jednom směru, případně ve směru opačném.

Pro věrohodnější simulaci pohybu účastníka dopravního provozu v daném čase byl proto nahrazen vektor pohybu Ackermanovým modelem zatáčení automobilu [17]. Ilustraci Ackermanova modelu zatáčení



Obrázek 5. Ukázka simulace pohybu účastníků silničního provozu. **Vlevo:** Vizualizace scény v aplikaci *DataFromSky Viewer*. Scéna obsahuje vozidlo opouštějící kruhový objezd. Vozidlo vyskytující se na kruhovém objezdu a cyklistu vyskytujícího na stezce pro cyklisty opisující kruhový objezd. **Uprostřed:** Vizualizace scény v simulátoru zobrazující směr vektoru rychlosti jednotlivých účastníků silničního provozu. **Vpravo:** Vizualizace scény v simulátoru zobrazující kružnice, které jednotliví účastníci silničního provozu opisují dle Ackermanova modelu zatáčení automobilu.



Obrázek 6. Ackermanův model zatáčení automobilu. Zadní kola automobilu leží na přímce ρ a opisují kružnici se shodným středem. Přední kola automobilu opisují kružnice s různým poloměrem a svírají tak rozdílný úhel vzhledem ke středové ose automobilu (obrázek převzat z [17]).

automobilu lze vidět na obrázku 6. Srovnání směru pohybu účastníků dopravního provozu získaného z vektoru rychlosti a z Ackermanova modelu zatáčení automobilu je na obrázku 5. Výpočet středu a poloměr kružnice opisované účastníky dopravního provozu jsou vypočítávány na základě aktuální a předchozí pozice účastníka v trajektorii.

Detekované dopravní konflikty je možné vizualizovat v aplikaci *DataFromSky Viewer*. V aplikaci je možné zobrazovat vznikající dopravní konflikty v reálném čase včetně approximovaného místa kolize. Dále je možné zobrazit statistiky vzniklých dopravních kon-

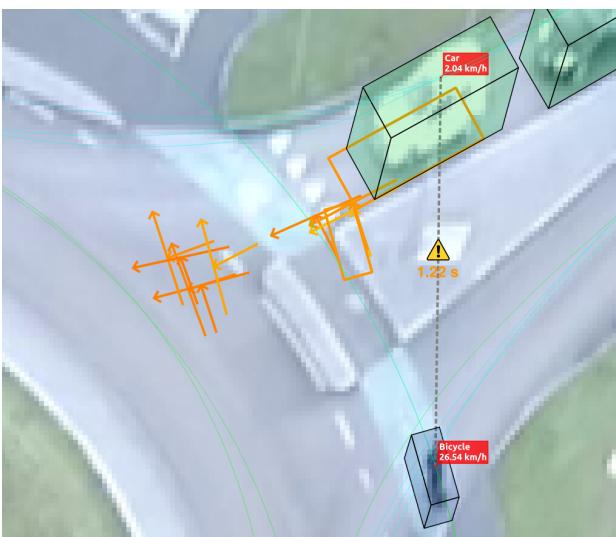
fliktů v podobě markerů, které označují místo, kde byla dosažena nejnižší hodnota času do kolize dvou účastníků silničního provozu (obrázek 7). Markery ve scéně jsou aktivními grafickými prvky a při jejich označení dojde ke změně scény do času vzniku daného dopravního konfliktu.

4. Časová náročnost detekce dopravních konfliktů

Pro statistické zobrazení nejhorších konfliktních případů je nutné provést analýzu a simulaci na všech trajektoriích současně. Při testovaní časové náročnosti detekce konfliktních situací bylo zpracováno celkem 298 trajektorií dopravních účastníků, kteří se vyskytovali ve videu dlouhém 15 minut a 38 sekund. Výpočet byl paralelizován pomocí programového rozhraní *Open-MP* a proveden na procesoru *i7 – 8550U*. Při nastavení délky simulačního času 2s a diskretizaci trajektorií odpovídající 25 snímkům videa za vteřinu trval výpočet všech konfliktních situací mezi jednotlivými účastníky silničního provozu 4,6s, což odpovídá průměrně délce výpočtu 15,5ms na jednu trajektorii. Výsledný čas výpočtu simulací v jedné trajektorii se ovšem liší na základě množství současně se vyskytujících trajektorií ve scéně, délky trajektorie a stanovené délky simulace.

5. Závěr

Data o dopravních nehodách jsou velice řídká a nadobilá. Na základě analýz těchto dat je možné pouze konstatování hrubých nedostatků infrastruktury (omezený výhled, nekvalitní kluzký povrch, absence nebo zakrytí dopravního značení, atd.). Vzniká tedy tendence hodnotit bezpečnost v dopravě také na základě



Obrázek 7. Vizualizace dopravního konfliktu v aplikaci DataFromSky Viewer. Ve scéně se vyskytuje cyklista v kolizním směru s automobilem. Při zachování rychlosti a směru pohybu by došlo k vzájemné kolizi za 1,2 sekundy.

chování řidičů, avšak ne sledováním dopravních nehod, ale konfliktních situací, které se vyskytují řadově mnohem častěji než nehody dopravní. Díky možnosti detektovat konfliktní situace v dopravě a jejich následné analýze lze předpokládat zlepšení situace bezpečnosti v dopravě například zavedením příslušných opatření v infrastruktuře (přestavba průsečné křižovatky na okružní, přidání odbočovacích pruhů, atd.). Je však obtížné tyto dopravní konflikty sledovat za delší časové období a objektivně je hodnotit.

V rámci řešení tohoto problému byl vytvořen nástroj, který na základě automatické analýzy leteckých videí pořízených drony umožňuje detektovat dopravní konflikty v daném dopravním uzlu. Standardní přístup implementace času do kolize byl rozšířen o Ackermanův model zatáčení automobilu, který lépe reflekтуje chování řidiče v dopravním uzlu a minimalizuje vznik falešných dopravních konfliktů. Dopravní konflikty je možné přehledně zobrazit v aplikaci *DataFromSky Viewer*, která může být použita například dopravními analytiky. Při experimentování na reálných datech bylo dosaženo průměrné délky zpracování jedné trajektorie 15,5ms na procesoru i7 – 8550U.

Analýza dopravních konfliktů je komplexní problém. Současný stav aplikace může být rozšířen o další indikátory dopravních konfliktů včetně pokročilejší simulace chování řidiče v dané dopravní situaci.

Poděkování

Tato práce byla vytvořena v rámci diplomové práce na základě firemního zadání pod vedením Doc. Ing. Jaroslava Zendulky, CSc.² a byla konzultována s Ing. Davidem Hermanem³. Problematika bezpečnosti v dopravě byla dále předmětem diskuzí s Ing. Jiřím Apeltauerem⁴. Tímto všem výše zmíněným děkuji za cenné rady, které napomohly úspěšnému dokončení práce.

Literatura

- [1] Dopravní nehody – rok 2017, Leden 2018. https://www.cspsd.cz/storage/files/nehody_2017.pdf.
- [2] Počet registrovaných automobilů, Leden 2017. <http://portal.sda-cia.cz/clanek.php?id=5794&v=m>.
- [3] Jarvis Autey, Tarek Sayed, and Mohamed H. Zaki. Safety evaluation of right-turn smart channels using automated traffic conflict analysis. *Accident Analysis and Prevention*, 45(Supplement C):120 – 130, 2012.
- [4] Maria Laura Delle Monache, Legesse Lemecha Obsu, Paola Goatin, and Semu Mitiku Kasa. Traffic flow optimization on roundabouts. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 111:127 – 136, 2014. Transportation: Can we do more with less resources? – 16th Meeting of the Euro Working Group on Transportation – Porto 2013.
- [5] Diverging diamond interchange: Lessons learned, Květen 2010. <https://library.modot.mo.gov/rdt/reports/unnumbrd/or10021rpt.pdf>.
- [6] D. Osipychev, Duy Tran, Weihua Sheng, and G. Chowdhary. Human intention-based collision avoidance for autonomous cars. In *2017 American Control Conference (ACC)*, pages 2974–2979, May 2017.
- [7] J. Apeltauer, A. Babinec, D. Herman, and T. Apeltauer. Automatic Vehicle Trajectory Extraction for Traffic Analysis from Aerial Video Data. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, pages 9–15, March 2015.
- [8] Datafromsky - advanced traffic analysis of aerial video data, 2018. www.datafromsky.com.
- [9] G. Tiwari, D. Mohan, and J. Fazio. Conflict analysis for prediction of fatal crash locations

²Fakulta informačních technologií, Vysoké učení technické v Brně

³RCE Systems, s.r.o., Brno, Česká Republika

⁴Fakulta Stavební, Vysoké učení technické v Brně

- in mixed traffic streams. *Accident Analysis and Prevention*, 30(2):207 – 215, 1998.
- [10] Inder Pal Meel, Andreas Vesper, Attila Borsos, and Csaba Koren. Evaluation of the effects of auxiliary lanes on road traffic safety at downstream of u-turns. *Transportation Research Procedia*, 25:1931 – 1945, 2017. World Conference on Transport Research - WCTR 2016 Shanghai. 10-15 July 2016.
- [11] S.M. Sohel Mahmud, Luis Ferreira, Md. Sham-sul Hoque, and Ahmad Tavassoli. Application of proximal surrogate indicators for safety evaluation: A review of recent developments and research needs. *IATSS Research*, 41(4):153 – 163, 2017.
- [12] Nicolas Saunier. Automated methods for surrogate safety analysis, 2014. [online].
- [13] Jeffrey Archer. *Indicators for traffic safety assessment and prediction and their application in micro-simulation modelling : a study of urban and suburban intersections*. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2005.
- [14] Qt for developers by developers, 2018. <https://www.qt.io/developers/>.
- [15] G. Bradski. The OpenCV Library. *Dr. Dobb's Journal of Software Tools*, 2000.
- [16] OpenMP Architecture Review Board. OpenMP application program interface version 3.0, May 2008.
- [17] A. J. Weinstein and K. L. Moore. Pose estimation of ackerman steering vehicles for outdoors autonomous navigation. In *2010 IEEE International Conference on Industrial Technology*, pages 579–584, March 2010.