



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV INFORMAČNÍCH SYSTÉMŮ

DEPARTMENT OF INFORMATION SYSTEMS

PREEMPTIVNÍ BEZPEČNOSTNÍ ANALÝZA DOPRAVNÍHO CHOVÁNÍ Z TRAJEKTORIÍ

PREEMPTIVE SAFETY ANALYSIS OF ROAD USERS' BEHAVIOR FROM TRAJECTORIES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. DOMINIK ZAPLETAL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Doc. Ing. JAROSLAV ZENDULKA, CSc.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Řešitel: **Zapletal Dominik, Bc.**

Obor: Počítačová grafika a multimédia

Téma: **Preemptivní bezpečnostní analýza dopravního chování z trajektorií**
Preemptive Safety Analysis of Road Users' Behavior from Trajectories

Kategorie: Počítačová grafika

Pokyny:

1. Prostudujete problematiku posuzování bezpečnosti dopravních uzlů na základě analýzy časoprostorových informací o účastnících dopravního proudu.
2. S ohledem na uvažovanou metodu získávání časoprostorových dat zvolte vhodné parametry dopravních konfliktů, případně navrhněte vlastní parametry, a proveďte jejich citlivostní analýzu na přesnost vstupních měření.
3. Navrhněte a implementujte systém pro detekci konfliktních situací a jejich evaluaci z hlediska bezpečnosti. Proveďte experimenty na simulačních a reálných datech.
4. Demonstrujte a vyhodnoťte funkčnost vytvořeného řešení na reálných datech, a to ve spolupráci s dopravními experty na bezpečnostní problematiku.
5. Zhodnoťte dosažené výsledky a navrhněte možnosti dalšího pokračování práce. Vytvořte plakátek a krátké video pro prezentování projektu.

Literatura:

- Autey, J., Sayed, T., Zaki, M. H.: Safety evaluation of right-turn smart channels using automated traffic conflict analysis. *Accident Analysis & Prevention*, March 2012, vol. 45, pp. 120 - 130.
- SOHEL. Mahmud, M. S. at al. Application of proximal surrogate indicators for safety evaluation: A review of recent developments and research needs. *IATSS Research*, online March 2017.

Při obhajobě semestrální části projektu je požadováno:

- Body 1 a 2.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování diplomové práce naleznete na adrese

<http://www.fit.vutbr.cz/info/szz/>

Technická zpráva diplomové práce musí obsahovat formulaci cíle, charakteristiku současného stavu, teoretická a odborná východiska řešených problémů a specifikaci etap, které byly vyřešeny v rámci dřívějších projektů (30 až 40% celkového rozsahu technické zprávy).

Student odevzdá v jednom výtisku technickou zprávu a v elektronické podobě zdrojový text technické zprávy, úplnou programovou dokumentaci a zdrojové texty programů. Informace v elektronické podobě budou uloženy na standardním nepřepisovatelném paměťovém médiu (CD-R, DVD-R, apod.), které bude vloženo do písemné zprávy tak, aby nemohlo dojít k jeho ztrátě při běžné manipulaci.

Vedoucí: **Zendulka Jaroslav, doc. Ing., CSc., UIFS FIT VUT**

Konzultant: Herman David, Ing., RCE

Datum zadání: 1. listopadu 2017

Datum odevzdání: 23. května 2018

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta informačních technologií
Ústav informačních systémů
602 00 Brno, Božetěchova 2

doc. Dr. Ing. Dušan Kolář
vedoucí ústavu

Abstrakt

Tato práce se zabývá preemptivní bezpečnostní analýzou dopravního chování účastníků silničního provozu. Bezpečnostní analýza je založena na zpracování trajektorií pohybu účastníků silničního provozu ve scéně, které jsou získávány z leteckých záznamů pořízených drony. V rámci této práce byl implementován systém, který je schopen detekovat dopravní konflikty v prostorově-temporálních datech. Standardní přístup pro stanovení hodnot proaktivních indikátorů dopravních konfliktů byl rozšířen o simulaci pohybu objektů ve scéně dle Ackermanova modelu zatáčení vozidla, díky kterému bylo dosaženo věrohodnějších výsledků při detekci dopravních konfliktů.

Abstract

This work deals with the and preemptive road users behaviour safety analysis problem. Safety analysis is based on a processing of road users trajectories obtained from processed aerial videos captured by drones. A system for traffic conflicts detection from spatial-temporal data is presented in this work. The standard approach for pro-active traffic conflict indicators evaluation was extended by simulating traffic objects movement in the scene using Ackerman steering geometry in order to get more accurate results.

Klíčová slova

analýza bezpečnosti v dopravě, indikátory dopravních konfliktů, prostorově-temporální data, predikce pohybu

Keywords

traffic safety analysis, traffic conflicts indicators, spatial-temporal data, movement prediction

Citace

ZAPLETAL, Dominik. *Preemptivní bezpečnostní analýza dopravního chování z trajektorií*. Brno, 2018. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Doc. Ing. Jaroslav Zendulka, CSc.

Preemptivní bezpečnostní analýza dopravního chování z trajektorií

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením pana Doc. Ing. Jaroslava Zendulky, CSc. Další informace mi poskytl Ing. David Herman. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

.....

Dominik Zapletal

23. května 2018

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce Doc. Ing. Jaroslavovi Zendulkovi, CSc. a konzultantovi práce Ing. Davidovi Hermanovi za podnětné rady a informace, které vedly k dokončení této práce.

Obsah

1 Úvod	3
2 Existující přístupy zabývající se bezpečnostní analýzou dopravního chování účastníků silničního provozu	5
2.1 Analýza bezpečnosti v dopravě založená na metodice sledování a vyhodnocování dopravních konfliktů TCT	7
2.2 Proximální indikátory bezpečnosti	8
2.3 Bezpečnostní analýza dopravního uzlu založená na BA studiích	14
3 Citlivostní analýza	16
3.1 Citlivostní analýza založená na kolizi	17
4 Návrh systému pro detekci konfliktních situací	21
4.1 Analytický výpočet detekce kolize objektů	21
4.2 Simulace pohybu objektů ve scéně	22
4.3 Výpočet času do kolize - TTC	24
4.4 Výpočet času po průjezdu - PET	25
5 Programová realizace navrženého systému	27
5.1 Použité technologie	27
5.2 Struktura systému	28
5.3 Vstupní data	34
5.4 Optimalizace	36
5.5 Vizualizace v aplikaci DataFromSky Viewer	37
6 Provedené experimenty a vyhodnocení funkčnosti vytvořeného řešení	41
6.1 Experimentální data	41
6.2 Provedené experimenty a dosažené výsledky	43
6.3 Výpočetní náročnost detekce dopravních konfliktů	48
6.4 Zhodnocení funkčnosti implementovaného systému	50
7 Závěr	51
Literatura	53
Přílohy	56
Seznam příloh	57
A Obsah příloženého DVD disku	58

Kapitola 1

Úvod

V posledním století je možné pozorovat znatelné zvýšení životních standardů v průmyslových zemích. Se zvyšující se populací a aglomerací měst je kladen čím dál větší důraz na mobilitu, která vyžaduje neustálý rozvoj v infrastruktuře. Klíčovým aspektem v dopravním inženýrství je nalezení rovnováhy mezi bezpečností, přístupností a kapacitou ve vztahu k danému prostředí. Snaha o dosažení co největší bezpečnosti v dopravě je jedním z hlavních cílů dopravních expertů, analytiků bezpečnosti v dopravě a inženýrů v automobilovém průmyslu.

Na základě statistických údajů z roku 2015 zemře na celém světě na následky dopravní nehody přibližně 1,25 mil. lidí, což odpovídá přibližně 3,4 tisícům úmrtí denně zapříčiněných dopravní nehodou. Existuje předpoklad, že pokud nenastanou pozitivní změny v dopravní infrastruktuře, prosazování zákona a bezpečnosti dopravních prostředků, bude v roce 2030 dopravní nehoda 7. nejčastější příčinou smrti člověka oproti současnému 9. místu. Pro osoby ve věku 15 – 29 let jsou následky dopravní nehody nejčastější příčinou smrti od roku 2012 [21]. V České republice je oficiálně zaregistrováno 7,7 mil. vozidel. V roce 2017 zde došlo k 103821 dopravním nehodám, které byly smrtící pro 502 lidí a způsobily těžká zranění 2339 lidem [8].

Metody pro vyhodnocení nebezpečných dopravních situací jsou důležité jak v oblasti autonomních řídicích systémů [22], tak v oblasti optimalizace dopravních proudů a zvyšování bezpečnosti dopravních uzlů [3, 7]. Začíná být čím dál více vyžadováno získávat informace o nebezpečných dopravních událostech nejen na základě shromážděných statistik o nehodách, ale také na základě dat získaných v reálném čase nebo v relativně krátkém časovém intervalu pomocí automatizovaných systémů. Na důležitosti nabývá možnost detekovat a vyhodnotit závažnost konfliktních dopravních situací, u kterých sice k dopravní nehodě dvou či více účastníků silničního provozu nedošlo, ale které jsou objektivně považovány za nebezpečné, jelikož takových situací vzniká v silničním provozu řádově více, než dopravních nehod, a mohou být hodnotným rozhodovacím kritériem při zavádění příslušných opatření v dopravní infrastruktuře [2].

Tato práce se zabývá bezpečnostní analýzou dopravního chování účastníků silničního provozu včetně detekce a vyhodnocení vzniklých konfliktních situací mezi nimi. Bezpečnostní analýza je založena na zpracování časoprostorových dat, trajektorií, získaných ze zpracovaných leteckých videozáznamů pořízených drony. Extrakce trajektorií z leteckých videozáznamů je provedena automatickým zpracováním obrazových dat detekčním a sledovacím systémem [1]. Práce vychází ze semestrálního projektu, ve kterém byly uvedeny teoretické základy problematiky a citlivostní analýza vstupních parametrů ve vztahu k indikátorům dopravních konfliktů. Text této práce navazuje na semestrální projekt a byl rozšířen o popis návrhu systému pro detekci dopravních konfliktů, jeho programovou realizaci a experimentální část.

Text diplomové práce je rozdělen do několika kapitol. V kapitole 2 jsou uvedeny teoretické základy významných metod pro analýzu bezpečnosti v dopravě. Matematická analýza z hlediska

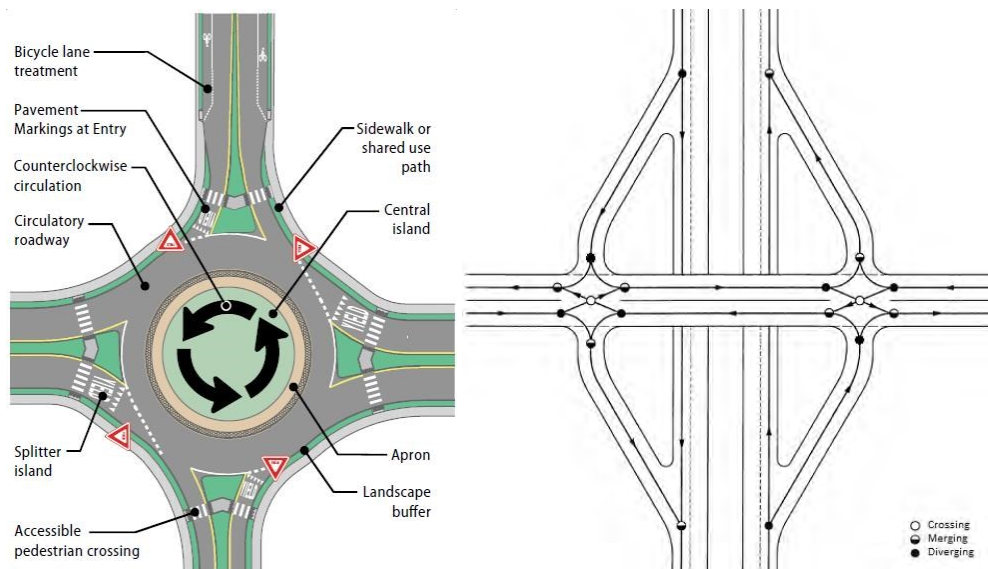
citlivosti a požadavků na přesnost vstupních parametrů systému pro detekci konfliktních situací a jejich evaluace z hlediska bezpečnosti je provedena v kapitole 3. Kapitola 4 popisuje návrh systému pro detekci dopravních konfliktů a následně je v kapitole 5 popsána programová realizace navrženého systému. Experimentální část práce včetně vyhodnocení funkčnosti implementovaného systému je uvedena v kapitole 6.

Kapitola 2

Existující přístupy zabývající se bezpečnostní analýzou dopravního chování účastníků silničního provozu

Jak již bylo zmíněno v úvodní kapitole, důvodů, proč se zabývat bezpečnostní analýzou v dopravě, je mnoho. Díky růstu světové populace a z toho vyplývajícího zvyšujícího se počtu vozidel se dostávají statistické údaje o dopravních nehodách a jejich následcích do červených čísel. Nedílnou součástí bezpečné infrastruktury je, kromě jiného, i potřeba efektivního využití stávajících dopravních uzlů a jejich optimalizace. Od počátku 20. století, kdy započal rozvoj automobilového průmyslu a s ním spojený vývoj infrastruktury, došlo k mnoha zásadním změnám týkajícím se zavedení nových typů dopravních uzlů, které lépe reflektují požadavky silničního provozu v konkrétní oblasti. V druhé polovině 20. století se začalo ustupovat od klasických průsečných křižovatek, které byly na vhodných místech nahrazovány kruhovými objezdy. Studie dokazují, že kruhové objezdy zefektivňují dopravní tok a snižují pravděpodobnost vzniku dopravních nehod v některých případech až o 80 % [15]. Nákres současné podoby moderního kruhového objezdu dle federální správy dálnic ve Spojených státech amerických (*Federal Highway Administration*) ilustruje obrázek 2.1 (levá část obrázku). Dalším příkladem nového druhu dopravního uzlu je křižovatka typu *DDI* (*Diverging Diamond Interchange*), díky které se v roce 2009 ve Springfieldu, Missouri, USA, podařilo při nájezdu a výjezdu na světově známou dálnici Route 66 snížit počet konfliktních míst pro vznik dopravní nehody z původních 32 na 18 [7]. Diagram dopravních konfliktů křižovatky typu *DDI* je zobrazen na obrázku 2.1 (pravá část obrázku). Příčiny zmíněných úspěchů, kterých bylo dosaženo v současné světové infrastruktuře, mají kořen v neustále se vyvíjejících přístupech týkajících se analýzy dopravního chování a bezpečnosti v dopravě.

Bezpečnostní analýzy v dopravě jsou většinou založeny na výzkumu dopravních nehod, ke kterým v dané lokalitě došlo, a také na závažnosti jejich následků. Úroveň bezpečnosti určité dopravní lokace bývá měřena počtem a frekvencí dopravních nehod, zejména však stupněm závažnosti následků, které mohou být klasifikovány na základě újmy na zdraví, úmrtnosti nebo velikosti škody na majetku. Tento přístup vyžaduje dostupnost dostatečného množství informací o dopravních nehodách v dané lokaci shromážděných za dostatečně velký časový úsek potřebný k odlišení náhodných a opakovaných událostí. Dopravní nehody jsou často ojedinělými událostmi i v dopravních uzlech náchylných k jejich výskytu. Dále je nutno podotknout, že ne všechny dopravní nehody jsou hlášeny a množství ohlášených nehod se liší dle daného regionu. Pro přesnou bezpečnostní analýzu v dopravě založenou na statistických metodách je zapotřebí dostatečné množství věrohodných a kvalitních dat. Metody studující dopravní cho-



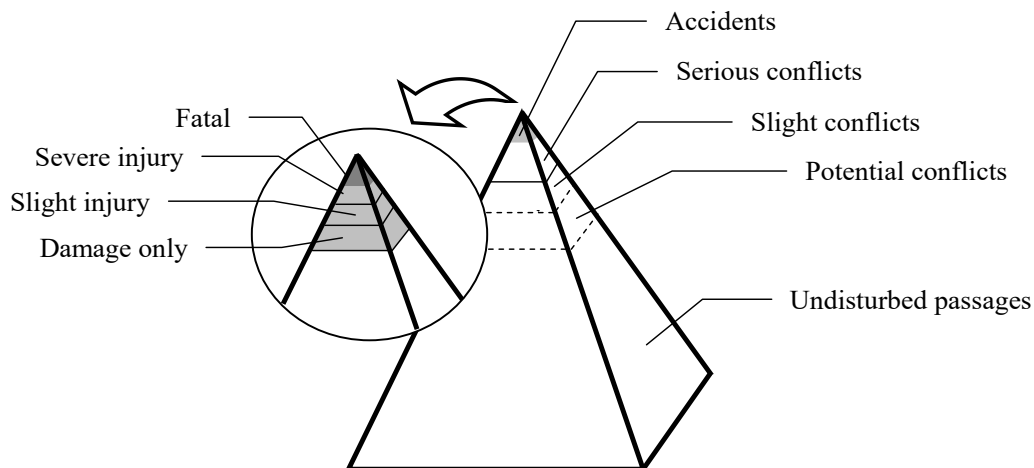
Obrázek 2.1: **Vlevo:** Návrh moderního kruhového objezdu dle federální správy dálnic ve Spojených státech amerických (obrázek převzat z [15]). **Vpravo:** Diagram dopravních konfliktů křižovatky typu DDI (*Diverging Diamond Interchange*), která významně snižuje počet možných konfliktních míst oproti standardní průsečné křižovatce (obrázek převzat z [7]).

vání účastníků silničního provozu a vyhodnocující bezpečnost konkrétní části infrastruktury založené na vzniklých dopravních nehodách zahrnují tzv. *reaktivní přístup (after-the-fact)*, při kterém je nutný předpoklad výskytu dopravní nehody dříve, než jsou provedena potřebná měření vedoucí k zavedení příslušných bezpečnostních opatření. Tento přístup je také často zmiňován v otázkách etických.

Na základě výše uvedených náročných požadavků na statistická data o dopravních nehodách vznikají tendence nalézt metody, které jsou nezávislé na výskytu dopravních nehod, jsou více efektivní na zdroje, rychlejší z hlediska délky pozorování a mají vyšší informační hodnotu o vzniklých dopravních situacích. Do popředí se začínají dostávat metody vycházející z pozorování dopravních konfliktů¹ nebo událostí blízkých dopravním nehodám (*near-crash events*). Četnost takových událostí je mnohonásobně vyšší, než četnost dopravních nehod samotných. V problematice bezpečnostní analýzy v dopravě je proto žádoucí nalézt nástroje napomáhající identifikaci konfliktních dopravních situací [18, 2]. Díky znatelnému pokroku v oblasti informačních technologií, zpracování obrazu a kamerových systémů začíná docházet na poli bezpečnosti v dopravě k přeměrování pozornosti na automatizované metody, které v krátkém časovém horizontu dosahují pozoruhodných výsledků.

V této kapitole jsou uvedeny přístupy zabývající se problematikou detekce dopravních konfliktů, na jejichž základě je možné studovat chování účastníků silničního provozu a vyhodnotit bezpečnost dopravních uzlů nebo jejich částí. V kapitole 2.1 jsou uvedeny základy metodiky sledování a vyhodnocování dopravních konfliktů. Dále jsou v kapitole 2.2 vyjmenovány nejpoužívanější indikátory dopravních konfliktů včetně jejich vlastností. Nakonec jsou v kapitole 2.3 popsány způsoby použití indikátorů dopravních konfliktů pro analýzu bezpečnosti dopravního uzlu.

¹Termín „(dopravní) konflikt“ je v této práci používán společně s termíny „(dopravní) konfliktní událost“, „(dopravní) konfliktní situace“, „skoro-nehoda“ nebo „situace blízká dopravní nehodě“.



Obrázek 2.2: Grafické znázornění kvantitativního rozdílu mezi dopravními nehodami a dopravními konflikty pomocí pyramidy bezpečnosti (obrázek převzat z [14]).

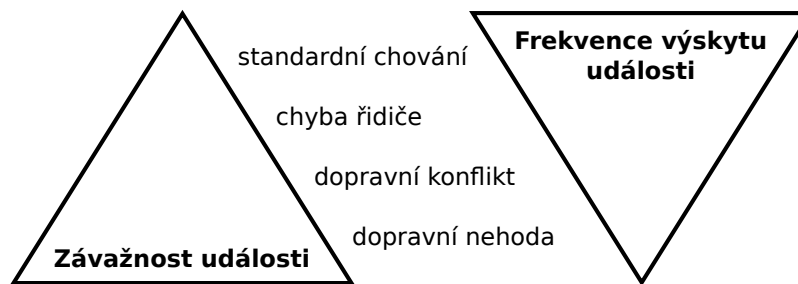
2.1 Analýza bezpečnosti v dopravě založená na metodice sledování a vyhodnocování dopravních konfliktů TCT

Metodika sledování a vyhodnocování dopravních konfliktů *TCT* (*Traffic Conflict Technique*) má svoje kořeny ve výzkumu vedeném v Detroitu pod záštitou General Motors v roce 1960, který probíhal za účelem identifikace problémů bezpečnosti v dopravě ve vztahu ke konstrukci vozidel. Předmětem studie bylo pozorování a zaznamenávání nebezpečných interakcí mezi vozidly, které se odlišovaly od ostatních výskytem úhybných manévrů zahájených s cílem vyhnout se dopravní nehodě [2]. TCT je založena na pozorování a studii konfliktních událostí nebo událostí blízkých dopravním nehodám, jejichž výskyt je mnohonásobně častější, než výskyt kolizních dopravních nehod. Obecná definice dopravního konfliktu byla předmětem mnoha studií v oblasti bezpečnostní analýzy v dopravě. Jedna z definic dopravního konfliktu je formulována jako „pozorovatelná situace, ve které se dva nebo více účastníků silničního provozu přibližují k sobě v prostoru a čase v takové míře, že jejich vzájemná kolize je bezprostřední, pokud zachovají svůj směr a rychlost pohybu“ [28]. Dle mezinárodního výzkumného programu dálnic (*National Cooperative Highway Research Program*) je dopravní konflikt charakteristický zahájením úhybného manévru² vozidla, který je doprovázen signalizací brzdovými světly nebo náhlou změnou jízdního pruhu.

Dopravní konfliktní události jsou pozorovatelné a mají úzký vztah k pravděpodobnosti výskytu dopravní nehody [18]. Vztah mezi četností dopravních nehod a četností dopravních konfliktů včetně kategorizace dle jejich závažnosti lze ilustrovat pyramidou bezpečnosti (obrázek 2.2). Pyramida bezpečnosti vypovídá o enormně vyšším počtu výskytu dopravních konfliktů oproti dopravním nehodám. Jiný způsob vizualizace vztahu závažnosti dopravních situací a frekvencí jejich výskytu je znázorněn na obrázku 2.3.

Vztah mezi dopravní nehodou a dopravním konfliktem je matematicky definován také v metodě *SSAM* (*Surrogate Safety Assessment Model*), která spojuje mikrosimulaci dopravního provozu s automatickou analýzou dopravních konfliktů. Na základě experimentů byla odvozena matematická rovnice, která definuje vztah mezi četností výskytů dopravních nehod za rok a čet-

²Termín „úhybný manévr“ je v této práci volným překladem anglického pojmu „evasive action“.



Obrázek 2.3: Vizualizace vztahu mezi závažností dopravní události a frekvencí jejího výskytu (idea obrázku převzata z [2]).

typ úhybného manévru	dopravní nehoda	dopravní konflikt
brzdění	68 %	79 %
brzdění a změna směru	20 %	14 %
změna směru	10 %	5 %
zrychlení	2 %	2 %

Tabulka 2.1: Tabulka znázorňující kategorizaci a procentuální zastoupení typů úhybných manévru řidiče před výskytem dopravní nehody a dopravního konfliktu. Hodnoty převzaty z [2].

ností výskytů dopravních konfliktů za hodinu v pozorované oblasti [4]. Rovnice 2.1 reprezentuje tento vztah.

$$\frac{\text{počet dopravních nehod}}{\text{rok}} = 0,119 \times \left(\frac{\text{počet dopravních konfliktů}}{\text{hodina}} \right)^{1,419} \quad (2.1)$$

Metodika TCT byla všeobecně přijata s velkým pozitivním ohlasem, jelikož stanovení vztahu mezi dopravním konfliktem a dopravní nehodou samotnou bylo v minulosti předmětem mnoha dalších studií. Hlavní výhodou této metody je poměrně krátká doba pozorování nutná pro stanovení věrohodných výsledků. Existují také negativní pohledy na tuto metodu zejména díky často rozdílnému subjektivnímu pojetí významu a definice dopravního konfliktu. Další názorové nekonzistence jsou také spojeny pojetím definice a identifikace úhybného manévru řidiče, který je v metodice TCT považován za počátek konfliktní situace. Reakce řidiče nemusí být vždy úhybným manévrem před dopravní nehodou, ale může být často pouhým bezpečnostním opatřením při zpozorování vnikajícího dopravního konfliktu. Tabulka 2.1 znázorňuje kategorizaci a procentuální zastoupení typů úhybných manévru řidiče před výskytem dopravní nehody a dopravního konfliktu, které byly zpozorovány při studii dopravních nehod a konfliktů. Dalším zajímavým poznatkem je skutečnost, že některé dopravní nehody nebo situace blízké dopravní nehodám jsou důsledkem selhání řidiče úhybný manévr vůbec zahájit [2].

2.2 Proximální indikátory bezpečnosti

V úvodu této kapitoly byly rozvedeny vlastnosti statistického a reaktivního přístupu pro bezpečnostní analýzu v dopravě, který je založen na zpětném zkoumání dopravních nehod a jejich následků a který s sebou nese značné nevýhody v podobě nedostatečného množství špatně dostupných dat o dopravních nehodách, etická negativa a nedostatečnou informační hodnotu pro kvalitní stanovení příčiny výskytu dopravní nehody. Alternativou k použití informací o do-

pravních nehodách jsou *proximální indikátory bezpečnosti*³. Hlavní důležitou vlastností těchto indikátorů je jejich řádově častější výskyt oproti dopravním nehodám. Díky tomu je použití proximálních indikátorů bezpečnosti v bezpečnostních analýzách dopravního chování účastníků silničního provozu velice efektivní na zdroje. Indikátory dopravních konfliktů jsou v oblasti bezpečnostních analýz v dopravě v kontrastu s *přímými* metrikami (počet dopravních nehod, finanční následky, zdravotní následky, atd.) označovány za metriky *nepřímé*. Jsou obecně považovány za určité indície, které samy o sobě nevytváří kompletní obraz o dané dopravní situaci, ale napomáhají vytvářet její kontext. Metody využívající indikátorů dopravních konfliktů se nazývají *proaktivní* (také *preemptivní*), jelikož využívají prediktivních modelů, pomocí kterých je predikován budoucí stav účastníka silničního provozu, ze kterého je hodnota konkrétního indikátoru dopravního konfliktu odvozena. Proximální indikátory bezpečnosti jsou definovány jako míra blízkosti k dopravní nehodě a jsou založeny na prostorově-temporálních informacích. Na indikátory dopravních konfliktů jsou kladeny následující požadavky [18, 17, 2]:

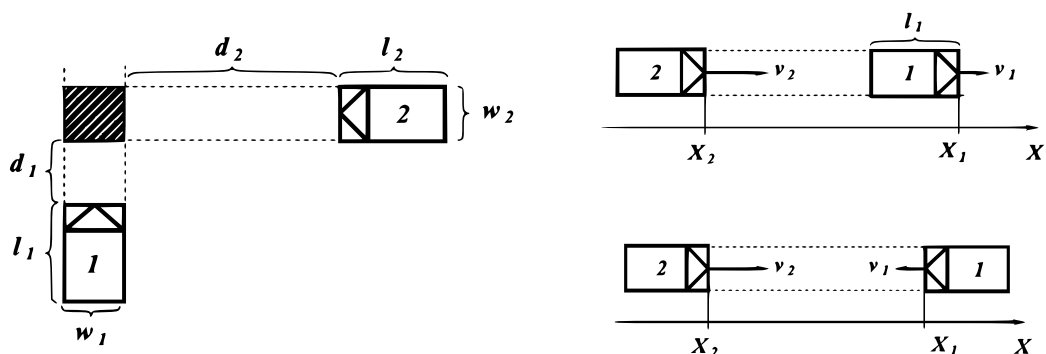
- Jsou komplementární k dopravním nehodám.
- Mají statistický vztah k dopravním nehodám.
- Měly by popisovat úroveň závažnosti interakce mezi účastníky silničního provozu, kde dopravní nehoda je nejvyšší úroveň závažnosti a bezpečný průjezd je nejnižší úroveň závažnosti.

V této kapitole jsou popsány nejčastěji používané indikátory dopravních konfliktů, které slouží jako další ukazatele v metodách zabývajících se bezpečnostní analýzou v dopravě, včetně jejich vhodnosti použití pro daný typ dopravní situace a analýzy hraničních hodnot pro odlišení závažných dopravních konfliktů od konfliktů méně závažných.

2.2.1 Čas do kolize (TTC)

Čas do kolize TTC (Time To Collision) je jedním ze základních indikátorů pro detekci konfliktní situace v dopravě. Je také často použit 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 mezi dvěma objekty v dané dopravní situaci, tím větší je pravděpodobnost vzniku vzájemné kolize. Čas do kolize ovšem nevypovídá o závažnosti nadcházejícího dopravního konfliktu, ale pouze o její existenci. Mohou nastat případy, kdy se dva účastníci silničního provozu k sobě přibližují vysokou rychlostí s velkou rozdílovou vzdáleností nebo naopak velice malou rychlostí s malou rozdílovou vzdáleností, při kterých bude hodnota TTC totožná. Následky těchto dvou příkladů při potenciálním vzniku dopravní nehody budou evidentně rozdílné. Závažnost dopravního konfliktu lze částečně odvodit z konfliktní rychlosti v okamžiku zahájení úhybného manévru vozidla směřujícího do kolize s jiným vozidlem, která je parametrem výpočtu času do nehody TA (viz kapitola 2.2.3). Zároveň tento indikátor nebere v potaz potenciální vzájemné dopravní konflikty účastníků dopravního provozu způsobené náhlou změnou rychlosti v důsledku zrychlení nebo prudkého zabrzdění. Určení indikátoru času do kolize předpokládá, že rychlost vedoucího objektu je menší, než rychlost objektu sledujícího v případě shodného směru pohybového vektoru obou těchto objektů. Další případy rozdílných směrů vektorů pohybu účastníků silničního provozu, při kterých lze hodnotu indikátoru času do kolize spočítat, jsou zobrazeny na obrázku 2.4.

³V textu je pojem „proximální indikátor bezpečnosti“ zaměňován také s pojmem „indikátor dopravního konfliktu“.



Obrázek 2.4: Grafické znázornění indikátoru času do kolize TTC (obrázek převzat z [25]).

TTC je spojitou funkcí času po dobu zachování kolizního směru obou účastníků silničního provozu. Jinými slovy se předpokládá, že kolize může mezi těmito dvěma účastníky v konečném čase kolize nastat. Indikátor čas do kolize je často uváděn v souvislosti s dopravními situacemi, kdy dva objekty nemění svůj kurz (příklad za sebou jedoucích vozidel), nebo je jeden z objektů statický, případně je jeho pohyb zanedbatelný (případ kolize jedoucího vozidla a nehybného vozidla či chodce) [17].

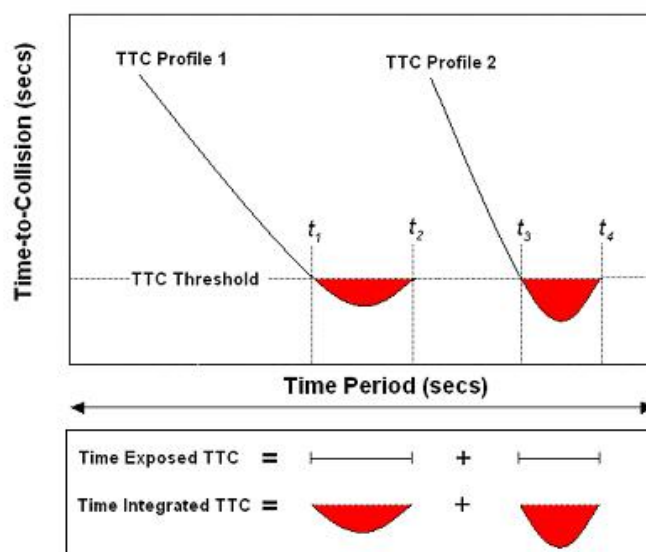
Hodnotu indikátoru času do kolize dvou za sebou jedoucích objektů je možné vypočítat pomocí vzorce 2.2. V případě objektů přibližujících se k sobě čelně lze hodnotu TTC vypočítat vzorcem 2.3. K určení prahové hodnoty TTC, pod kterou je konfliktní situace považována za alarmující, jsou použity různé přístupy. Obecně lze říci, že tento práh nelze jednoznačně určit, jelikož je ovlivněn typem dopravní situace, typem objektů, kterých se kolizní směr týká, složitostí dopravního uzlu, reakční dobou účastníků silničního provozu, povětrnostními podmínkami, účinností brzdných soustav vozidel, atd. Dle Elefteriadou [9] je dobrým pravidlem si při následování vozidla udržovat bezpečnou vzdálenost o velikosti délky automobilu (přibližně 15 stop neboli $4,57\text{ m}$) pro každých 10 mil za hodinu ($4,47\text{ m/s}$), což při dodržení této podmínky a instantním zabrzdění vedoucího vozidla odpovídá hodnotě TTC rovné přibližně $1,02\text{ s}$ při teoreticky nulové brzdě vzdálenosti vedoucího vozidla. 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 křižovatce z vedlejšího směru byla zjištěna hraniční hodnota TTC v rozsahu $1 - 2\text{ s}$. V případě světelných křižovatek se jedná o rozmezí $1,6 - 3\text{ s}$. Pro vozidla jedoucí v městském tunelu se hraniční hodnoty pohybují v rozsahu $2 - 4\text{ s}$ [17].

$$TTC_f(t) = \frac{X_1(t) - X_f(t) - L_l}{V_f(t) - V_l(t)} \quad (2.2)$$

$$TTC(t) = \frac{X_1(t) - X_2(t)}{V_1(t) + V_2(t)} \quad (2.3)$$

kde je:

- $V(t)$ rychlost 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*)

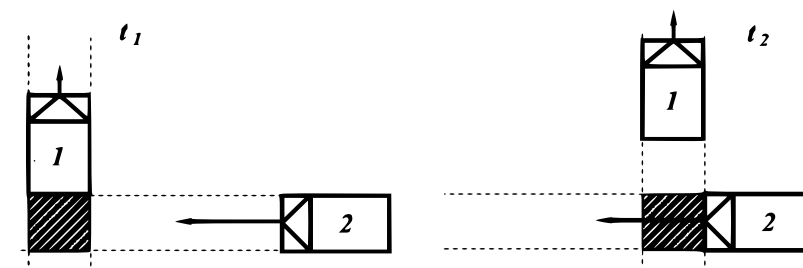


Obrázek 2.5: Obrázek popisuje proximální indikátory TET a TIT, jejichž hodnoty vycházejí z průběhu hodnoty indikátoru TTC v čase (obrázek převzat z [2]).

Společně s indikátorem času do kolize lze vypočítat také indikátor časového intervalu, ve kterém byla mezi danou dvojicí objektů naměřena podprahová hodnota času do kolize. Tento indikátor se označuje *TET* (*Time Exposed Time To Collision*). Dále je možné také určit hodnotu indikátoru *TIT* (*Time Integrated Time To Collision*), který reprezentuje integrál průběhu hodnoty TTC v čase, ve kterém byla hodnota času do kolize pod stanoveným prahem. Obrázek 2.5 popisuje vztah těchto indikátorů s hodnotami indikátorů času do kolize.

2.2.2 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 vznik kolize dvou účastníků dopravního provozu. Sleduje se časový interval mezi průjezdy stejné oblasti dvěma různými dopravními objekty. V prostorově-temporálním zobrazení pohybu dvou účastníků silničního provozu se jedná o studii případu, kdy existuje průsečík trajektorií těchto účastníků. V čase průsečíku obou trajektorií je ovšem pozice sledovaných objektů vzájemně nekolizní. Na obrázku 2.6 je graficky znázorněn indikátor času pro průjezdu. V praxi se ovšem nejedná o jeden bod, který by byl v různých časech dvěma trajektoriím společný, ale o průnik oblastí, jejichž plocha je odvozena z rozměrů daného dopravního objektu (nejčastěji automobilu), pro které je hodnota PET počítána. Přesná hodnota PET je tedy vypočítána jako časový úsek od opuštění kritické oblasti prvním dopravním objektem do vstupu do kritické oblasti druhým dopravním objektem. Tento indikátor je vhodné použít v případě existence průsečných trajektorií. Hodnota času po průjezdu nevypovídá o míře závažnosti konfliktní situace ani o možných následcích z důvodu faktu, že rychlost a vzdálenost vozidla nejsou předmětem měření. V případě výskytu průsečných trajektorií v datech je indikátor PET vhodnější pro určení dopravního konfliktu než u indikátoru času do kolize TTC (viz kapitola 2.2.1). Jsou-li trajektorie dvou účastníků silničního provozu podobné rovnoběžkám, je vhodnější použití indikátoru času do kolize. Nevýhodou indikátoru PET je požadavek na pevný kolizní bod/oblast [17, 2].



Obrázek 2.6: Grafické znázornění indikátoru času po průjezdu PET (obrázek převzat z [25]).

Hodnotu indikátoru PET je možné vypočítat pomocí vzorce 2.4. Čím nižší je hodnota času po průjezdu, tím vyšší je pravděpodobnost výskytu dopravní nehody. Obecně je za kritickou hodnotu indikátoru PET považován čas menší nebo rovný 1 – 1,5 sekundy [17].

$$PET = t_2 - t_1 \quad (2.4)$$

kde je:

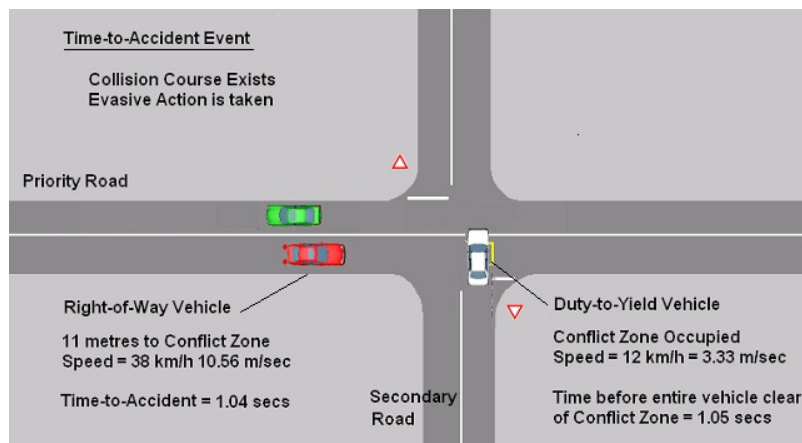
- t_1 čas opuštění konfliktní zóny vozidlem 1
- t_2 čas vstupu do konfliktní zóny vozidlem 2

Od indikátoru času po průjezdu jsou odvozeny i další podobné indikátory. Jedná se o časový rozdíl GT (*Gap Time*), čas přijetí ET (*Encroachment Time*) a tzv. IAPT (*Initially Attempted Post Encroachment Time*) [2]:

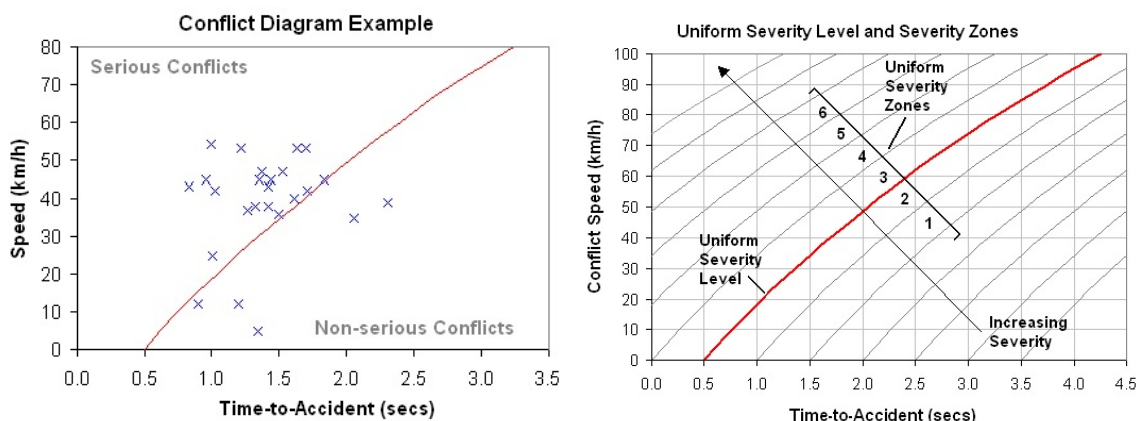
- **GT** - indikátor časového rozdílu je definován jako čas do přijetí do kritické oblasti druhým vozidlem v případě zachování rychlosti a směru pohybu od okamžiku průjezdu prvním vozidlem kritickou oblastí. Cílem indikátoru GT je stanovení předpokládané hodnoty PET v okamžiku vzniku dopravního konfliktu. Volně by bylo možné tento indikátor přeložit jako čas do kritické oblasti. Indikátor časového rozdílu vychází ze stejného konceptu jako indikátor TTC, který je založen na předpokládaném stavu v budoucnosti.
- **ET** - jedná se o čas, po který se „ohrožující“ vozidlo nachází v kritické oblasti.
- **IAPT** - časový interval od zahájení vstupu do konfliktní oblasti otáčejícího se vozidla po opuštění konfliktní oblasti rozšířený o čas dosažení konfliktní oblasti druhým vozidlem.

2.2.3 Čas do nehody (TA)

Čas do nehody TA (*Time to Accident*) je indikátor dopravního konfliktu, který je definován jako „čas zbývající do nehody od okamžiku zahájení úhybného manévru jedním z účastníků provozu za předpokladu nezměněné rychlosti a směru“. Tuto definici je také možné použít v případě jednoho účastníka dopravního uzlu. Indikátor času do nehody je speciálním druhem indikátoru času do kolize založený na úhybném manévru vykonaném kterýmkoliv z účastníků silničního provozu pro vyhnutí se kolizi [17]. Hodnota indikátoru je spočítána pouze jednou, a to v okamžiku zahájení úhybného manévru jedním z účastníků silničního provozu [2]. Jedná se o indikátor využívaný v mnoha studiích zabývajících se bezpečností v dopravě. Lze vypočítat manuálně (reaktivně) i pomocí automatizovaných metod založených například na počítačovém vidění [17]. Pokud je hodnota času do nehody velice nízká a je vypočítána z vysoké rychlosti vozidla, pak indikátor TA vypovídá o závažné dopravní události [18]. Obrázek 2.7 ukazuje názorný příklad situace, ve které je vhodné stanovit hodnotu indikátoru času do nehody.



Obrázek 2.7: Ukázkový příklad pro výpočet času do nehody (obrázek převzat z [2]).



Obrázek 2.8: **Vlevo:** Příklad nelineární funkce pro rozdělení množiny naměřených časů do nehody TA mezi závažné a nezávažné dopravní konflikty. **Vpravo:** Klasifikace závažnosti dopravního konfliktu určeného indikátorem času do nehody rozdělením možných hodnot TA do několika úrovní za použití vícero nelineárních funkcí. Obrázky převzaty z [2].

Hodnotu času do nehody lze vypočítat pomocí vzorce 2.5. Pro rozlišení vážných dopravních konfliktů určených dle indikátoru času do nehody od méně závažných dopravních událostí se často stanovuje prahová hodnota 1,5 sekundy [2]. Hranice mezi vážným a lehkým konfliktem je odvozena podle optimální doby brzdění vozidla *OBT* (*Optimal Breaking Time*), která vychází z doby intenzivního brzdění průměrného automobilu na suchém asfaltu včetně časové rezervy o velikosti 0,5 sekundy. Prahová hodnota 1,5 pro oddělení vážných dopravních konfliktů od událostí méně nekonfliktních se osvědčila v mnoha studiích. Mimo městské oblasti, ve kterých dosahují vozidla vyšších rychlostí, je vhodné tento práh snížit [17]. Na obrázku 2.8 je zobrazen příklad nelineární funkce, která pro danou rychlost stanovuje práh hodnoty času do nehody pro odlišení vážného dopravního konfliktu od méně závažného. Za použití vícero takových funkcí lze vytvořit stupnici závažnosti dopravního konfliktu.

$$TA = 1,5 \frac{v_i}{16,7 \exp^{-0,0306 \cdot 0,5 v_m}} \quad (2.5)$$

kde je:

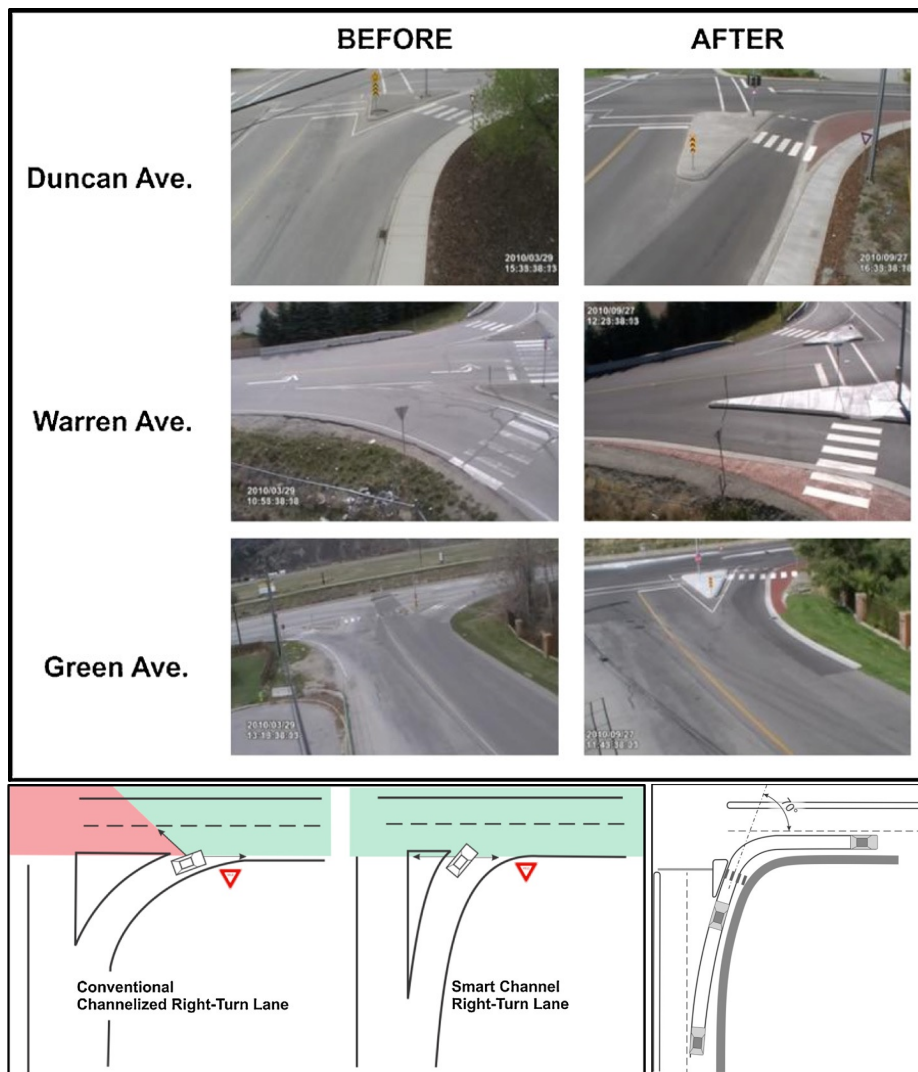
v_i počáteční rychlost
 v_m průměrná rychlost

2.3 Bezpečnostní analýza dopravního uzlu založená na BA studiích

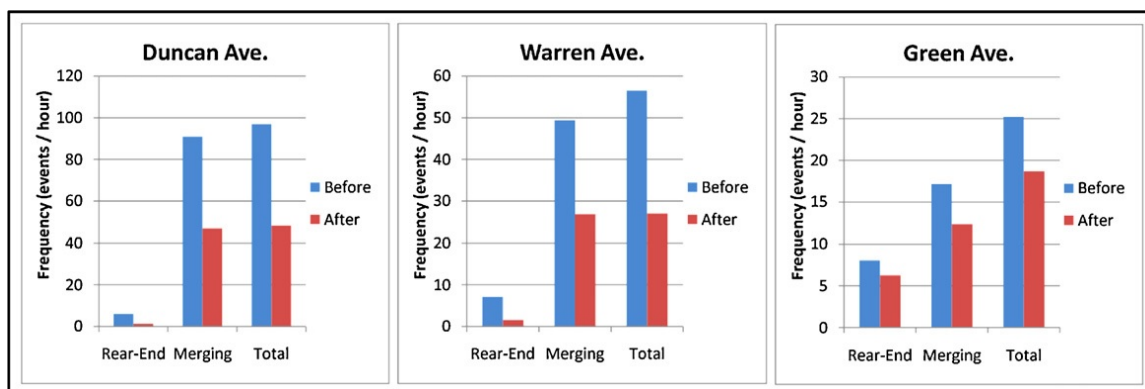
Autey aj. [3] zaměřili svoji práci vyhodnocení bezpečnosti dopravního uzlu na pozorování změn v počtu vzniku dopravních konfliktů způsobených u pravého odbočovacího pruhu průsečné a styčné křižovatky před a po její úpravě (viz obrázek 2.9). Jejich práce je založena na tzv. BA studii (*before-and-after study*). Principem takových studií je nashromáždění dostatečného množství dat před a po zavedení úpravy v daném dopravním uzlu a následné vyhodnocení dopadu změny v dopravním uzlu na frekvenci vzniku dopravních konfliktů. Důvodem pro tento přístup je pozorovatelná změna v počtu výskytů dopravních nehod nebo dopravních konfliktů detekovaných za pomoci různých indikátorů bezpečnosti (viz kapitola 2.2). Data jsou v těchto studiích shromažďována před a po změně v dopravním uzlu statisticky nebo automaticky za pomoci zpracování obrazu.

Změna, kterou ve své práci studoval Autey aj. [3], spočívala v převedení standardního odbočovacího pruhu na takový, který má lepší pozorovací úhly na hlavní silnici. Předpoklad takového odbočovacího pruhu je úhel 70° , který je svírán s hlavní silnicí. Data o provozu byla shromážděna automatickým detekčním systémem z pouličních kamer. Pro věrohodné vyhodnocení změny v bezpečnosti dopravního uzlu shromáždili potřebná data před a po provedení změny v takových časových obdobích, aby byla vytíženost dopravního uzlu co nejpodobnější.

Jako hlavní indikátor pro detekci dopravních konfliktů mezi účastníky silničního provozu sledovali hodnotu času do kolize *TTC* (viz kapitola 2.2.1). Statisticky analyzovali dopravní konflikty, u kterých byla hodnota indikátoru času do kolize menší než 3 s. Na obrázku 2.10 je vidět pozitivní dopad na zavedenou změnu v odbočovacím pruhu s lepšími pozorovacími úhly v podobě menší frekvence výskytů hodnoty času do kolize menší než 3 sekundy za hodinu. Snížení počtu dopravních konfliktů se pohybuje od 22 % do 75 %.



Obrázek 2.9: Zavedení změny v pravém odbočovacím pruhu u třech různých křižovek - obrázky nahoře. Provedené změny ovlivnily pozorovací úhly řidičů přijíždějících z vedlejší silnice - obrázky dole. Převzato z [3].



Obrázek 2.10: Srovnání počtu vzniklých dopravních konfliktů za hodinu před a po zavedení změny v dopravních uzlech (obrázek převzat z [3]).

Kapitola 3

Citlivostní analýza

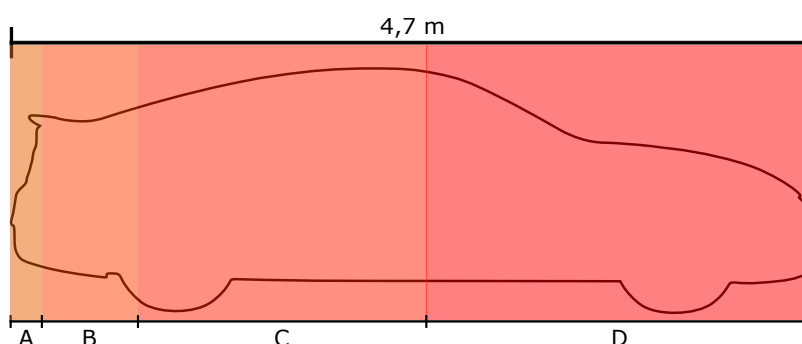
Vstupem pro bezpečnostní analýzu mohou být prostorově-temporální data v různé podobě a také z různých zdrojů (analýza obrazu, GPS souřadnice, akcelerometr, atd.). Příkladem mohou být trajektorie získané automatickou analýzou videozáznamů natočených drony [1] (obrázek 3.1). Při analýze časoprostorových dat je potřeba brát v potaz chybu měření, která je zapříčiněna různými faktory. Tato kapitola se nezabývá hledáním příčiny chyby měření způsobenou při získávání prostorově-temporálních dat nebo stanovením její velikosti, ale zabývá se matematickou analýzou některých indikátorů dopravních konfliktů uvedených v kapitole 2.2, které jsou relevantní pro tuto práci, z hlediska jejich citlivosti na vstupní parametry. Cílem této kapitoly je oboustranná analýza vstupních a výstupních parametrů indikátorů vypovídajících o bezpečnosti dopravního chování jednotlivých účastníků silničního provozu a hledání požadavků na vstupní data při zachování požadované přesnosti výpočtu jejich hodnoty.



Obrázek 3.1: Příklad výstupů z detekčního systému zpracovávající letecké záznamy pořízené drony v podobě trajektorií pohybu účastníků silničního provozu vytvořených automatickou analýzou obrazových dat.

3.1 Citlivostní analýza založená na kolizi

V citlivostní analýze založené na kolizi bude vycházeno z předpokladu, že ke kolizi dvou vozidel dojde. Jinými slovy obě vozidla udržují kolizní směr a rychlost. Nebudou zde tedy analyzovány indikátory, které nepředpokládají kolizi dvou automobilů, jako je například indikátor čas po průjezdu PET (viz kapitola 2.2.2). Pro následující výpočty citlivostní analýzy budou zavedeny tzv. kolizní zóny vozidla, které vypovídají o míře závažnosti vzniklé kolize dvou vozidel. Příklad kolizních zón, se kterými se bude v následujících výpočtech pracovat, je ilustrován na obrázku 3.2. Na obrázku je vozidlo rozděleno do čtyř kolizních zón označených písmeny A-D. Kolizní zóny definují intervaly průniku dvou vozidel. Čím většímu průniku dvou automobilů dojde, tím větší je závažnost. Specifikace těchto zón je uvedena v tabulce 3.1. Délka vozidla 4,7 m vychází z průměrné délky automobilu střední velikosti. V následujících výpočtech budou stanovovány požadavky na přesnost vstupních parametrů s ohledem na míru jistoty detekce kolize dané kategorie. Hodnota velikosti kolizních zón byla stanovena na základě konzultace s dopravním expertem.



Obrázek 3.2: Ilustrace rozdělení automobilu do kolizních zón. Kolizní zóny jsou označeny písmeny A-D v pořadí jejich závažnosti a definují intervaly velikostí průniku dvou vozidel. Podrobnější popis kolizních zón je uveden v tabulce 3.1. Uvedená hodnota 4,7 m je průměrná délka automobilu kategorie střední velikosti.

Označení KZ	Míra závažnosti KZ	Šířka pásma KZ
A	lehká kolize	20 cm
B	středně vážná kolize	60 cm
C	vážná kolize	180 cm
D	extrémní kolize	vzdálenost od konce KZ D po konec vozidla

Tabulka 3.1: Specifikace kolizních zón (v tabulce uvedeny pod zkratkou KZ) ilustrovaných na obrázku 3.2 označených písmeny A-D.

Jak bylo uvedeno v kapitole 2.2, čas do kolize (TTC) patří mezi základní indikátory ve většině bezpečnostních analýz dopravního chování [17, 3, 16]. Je proto vhodné tento indikátor prozkoumat hlouběji v rámci citlivostní analýzy.

Čas do kolize za sebou jedoucích vozidel je možné vypočítat pomocí vzorce 3.1. Vzorec pro výpočet TTC je funkcí času vycházející z relativní pozice dvou vozidel (nebo jiných objektů vyskytujících se v daném dopravním uzlu směřujících k vzájemné kolizi) $X_l(t) - X_f(t)$ a jejich relativní rychlosti $V_f(t) - V_l(t)$. Jelikož se jedná o výpočet času do kolize dvou objektů a nikoliv času do dosažení stejné pozice, je nutné zohlednit délku vedoucího vozidla l . Po odečtení vzdá-

lenosti L_l pak bude v čitateli vyčíslena vzdálenost od předního nárazníku sledujícího vozidla f do zadního nárazníku vedoucího vozidla l v daném čase t .

$$TTC_f(t) = \frac{X_l(t) - X_f(t) - L_l}{V_f(t) - V_l(t)} \quad (3.1)$$

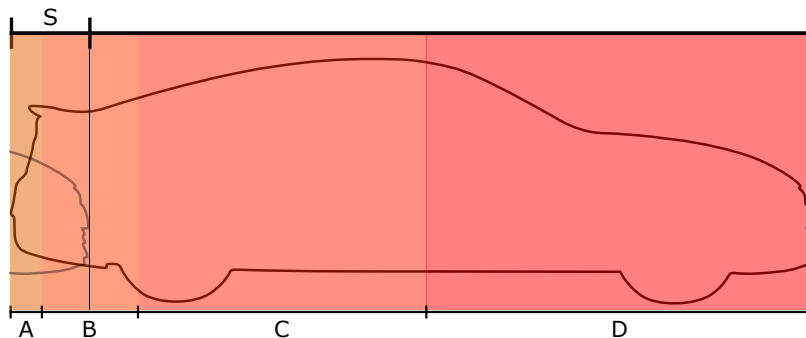
V následujících výpočtech budeme provádět citlivostní analýzu v okolí hodnoty času do kolize rovné 2 sekundy. Tento čas je mediánem všech prahových hodnot uvedených ve studiích bezpečnosti v dopravě dle Mahmud *aj.* [17]. Požadavky na vstupní parametry, tedy pozice a rychlost vozidel, budou stanoveny na základě míry jistoty, se kterou bude požadováno rozlišit závažnost kolize (viz obrázek 3.2) v dané dopravní situaci.

Mějme příklad situace dvou vozidel jedoucích v obci. Hodnota času do kolize bude rovna přibližně 2 s v daném čase t například při následujících parametrech:

- Pozice předního nárazníku sledujícího vozidla f je rovna $X_f(t) = 0 [m]$.
- Pozice předního nárazníku vedoucího vozidla l je rovna $X_l(t) = 23,6 [m]$.
- Délka vedoucího vozidla je rovna $L_l = 4,7 [m]$.
- Rychlost vedoucího vozidla l je rovna $V_l(t) = 13,889 [\frac{m}{s}]$, což odpovídá rychlosti přibližně $50 \frac{km}{h}$.
- Rychlost zadního vozidla f je rovna $V_f(t) = 23,339 [\frac{m}{s}]$, což odpovídá rychlosti přibližně $84 \frac{km}{h}$.

Na základě kolizních zón, které jsou definovány v tabulce 3.1 a ilustrovány na obrázku 3.2, budou stanoveny upravené hodnoty času do kolize označené dle uvedených kategorií jako TTC_A , TTC_B , TTC_C a TTC_D , obecně označené jako TTC_S ¹. Tyto upravené indikátory času do kolize s indexy A-D budou slovně označovány jako *čas do lehké kolize*, *čas do středně vážné kolize*, *čas do vážné kolize* a *čas do extrémní kolize*. Hodnotu upraveného času do kolize lze vypočítat dle vzorce 3.2. Parametr S je vzdálenost od zadního nárazníku vedoucího vozidla do středu dané kolizní zóny. Tedy v případě TTC_A je parametr S roven 0,1 m, v případě TTC_B je parametr S roven 0,5 m, atd. Příklad pro TTC_B s parametrem S roven 0,5 m je ilustrován na obrázku 3.3.

$$TTC_{S_f}(t) = \frac{X_l(t) - X_f(t) - L_l + S}{V_f(t) - V_l(t)} \quad (3.2)$$



Obrázek 3.3: Příklad situace pro výpočet hodnoty TTC_B s parametrem S roven 0,5 m. Hodnota parametru S je odvozena od velikostí rozptylů kolizních zón specifikovaných v tabulce 3.1.

¹Index S označuje vážnost dané kategorie TTC (odvozeno z anglického slova *severity*).

Na základě dopravní situace uvedené výše budou indikátory TTC_S pro kategorie A-D rovny hodnotám 2,01 s, 2,05 s, 2,18 s a 2,38 s. Časové intervaly hodnot TTC_S budou 2 – 2,02 s pro čas do lehké kolize TTC_A , 2,02 – 2,09 s pro čas do středně vážné kolize TTC_B , 2,09 – 2,25 s pro čas do vážné kolize TTC_C a 2,25 – 2,5 s pro čas do extrémní kolize TTC_D . Jednotlivé rozptyly pro danou dopravní situaci mají tedy hodnotu 0,02 s, 0,07 s, 0,16 s a 0,25 s. Pro výpočet času do kolize v dané kategorii závažnosti s určitou přesností je potřeba pracovat se zúženým časovým intervalem, který se následně zpětně projeví v požadavcích na přesnost určení pozice dvou vozidel směřujících do vzájemné kolize. Požadavky na přesnost stanovení relativní pozice vozidel pro danou přesnost určení času do kolize v dané kategorii pro vstupní parametry dopravní situace uvedené výše jsou zobrazeny v tabulce 3.2. Z výsledků v tabulce lze pozorovat vysoké požadavky na přesnost určení relativní vzdálenosti dvou vozidel o velikosti 2 cm v případě požadavku dosažení 90% přesnosti určení času do lehké kolize TTC_A .

Přesnost určení TTC_S	Velikost časového intervalu [ms]				Přesnost určení relativní vzdálenosti vozidel [cm]			
	A	B	C	D	A	B	C	D
60 %	8,5	25,4	76,2	88,9	8	24	72	84,5
70 %	6,3	19	57,1	66,7	6	18	54	63
80 %	4,2	12,7	38,1	44,4	4	12	36	42
90 %	2,1	6,3	19	22,2	2	6	18	21

Tabulka 3.2: Výpočty potřebné přesnosti určení relativní vzdálenosti vozidel pro daný zúžený časový interval na základě požadované přesnosti určení hodnoty TTC_S .

Pro hlubší pochopení požadavků na přesnost v závislosti na konkrétní dopravní situaci bude následně uveden další případ kolizní situace dvou vozidel na dálnici. Řidič vozidla l jedoucí za kamionem se v kopci rozhodne zahájit předjíždění kamionu a bez pohledu do zpětného zrcátka změni jízdní pruh. Řidič vozidla l tak vstoupí do kolizního směru s rychleji jedoucím vozidlem f vyskytující se za vozidlem l . Parametry dopravní situace jsou následující:

- Pozice předního nárazníku sledujícího vozidla f je rovna $X_f(t) = 0$ [m].
- Pozice předního nárazníku vedoucího vozidla l je rovna $X_l(t) = 21,37$ [m].
- Délka vedoucího vozidla je rovna $L_l = 4,7$ [m].
- Rychlost vedoucího vozidla l je rovna $V_l(t) = 25$ [$\frac{m}{s}$], což odpovídá rychlosti přibližně 90 $\frac{km}{h}$.
- Rychlost zadního vozidla f je rovna $V_f(t) = 36,111$ [$\frac{m}{s}$], což odpovídá rychlosti přibližně 130 $\frac{km}{h}$.

Při vstupních parametrech uvedené dopravní situace dosahuje standardní hodnota TTC hodnoty 1,5 s. Hodnoty časů do kolize TTC_S pro středy kolizních zón $A - D$ stanovených obdobně jako v předchozím případě jsou 1,509 s, 1,545 s, 1,653 s a 1,829 s. Časové intervaly kolizních zón $A - D$ jsou analogicky v rozmezí 1,5 – 1,518 s, 1,518 – 1,572 s, 1,572 – 1,734 s a 1,734 – 1,923 s. Po vzoru tabulky 3.2 jsou v tabulce 3.3 stanoveny požadavky na přesnost určení relativní vzdálenosti vozidel pro nové parametry dopravní situace. Z tabulky jsou zřetelné shodné požadavky

na přesnost stanovení relativní vzdálenosti vozidel, jako je tomu u předchozího příkladu. Důvodem shodných výsledků u obou těchto případů je lineární závislost relativní vzdálenosti na relativní rychlosti vozidel, která zapříčiní zobrazení poměrné části (10 %, 20 %, 30 % a 40 %) časového intervalu kolizní zóny vždy do shodného vzdálenostního intervalu konstantní kolizní zóny.

Přesnost určení TTC_S	Velikost časového intervalu [ms]				Přesnost určení relativní vzdálenosti vozidel [cm]			
	A	B	C	D	A	B	C	D
60 %	7,2	21,6	64,8	75,6	8	24	72	84,5
70 %	5,4	16,2	48,6	56,7	6	18	54	63
80 %	3,6	10,8	32,4	37,8	4	12	36	42
90 %	1,8	5,4	16,2	18,9	2	6	18	21

Tabulka 3.3: Výpočty potřebné přesnosti určení relativní vzdálenosti vozidel pro daný zůžený časový interval na základě požadované přesnosti určení hodnoty TTC_S .

Na základě výše uvedených příkladů lze konstatovat, že pro stanovení požadované přesnosti pro výpočet času do méně závažné kategorie dopravního konfliktu je zapotřebí větší přesnosti určení relativní vzdálenosti dvou vozidel. Nejvíce striktní případ nastává při požadavku určení času do lehké kolize s 90% přesností, který dovoluje odchylku stanovení relativní vzdálenosti dvou vozidel o velikosti 2 cm. Nejbenevolentnější na požadavek přesnosti určení relativní pozice dvou vozidel je pak určení času do extrémní kolize s 60% přesností, kdy je dovolena chyba o velikosti 84,5 cm.

Kapitola 4

Návrh systému pro detekci konfliktních situací

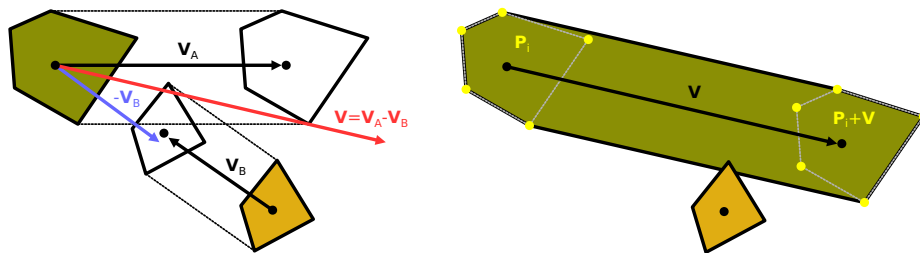
Na základě teoretických znalostí získaných při studiu problematiky bezpečnosti v dopravě z hlediska detekce dopravních konfliktů byl proveden návrh systému, který má za úkol tyto konflikty rozpoznávat v prostorově-temporálních datech. Cílem je vytvořit snadno rozšiřitelný systém nezávislý na konkrétní podobě vstupních prostorově-temporálních dat, který bude schopen stanovit hodnoty některých již existujících proximálních indikátorů bezpečnosti v dopravě, jejichž výpočet bude v případě preemtivních indikátorů rozšířen o simulaci pohybu účastníků silničního provozu.

V této kapitole je rozveden návrh řešení problému detekce dopravních konfliktů ve scéně definované vstupními prostorově-temporálními daty. Je zde popsán analytický přístup pro detekci kolize dvou pohybujících se objektů v prostoru a čase (kapitola 4.1) a predikce pohybu účastníků silničního provozu za pomoci simulace (kapitola 4.2), díky které je možné preemtivně stanovit hodnoty proximálních indikátorů bezpečnosti (kapitoly 4.3 a 4.4).

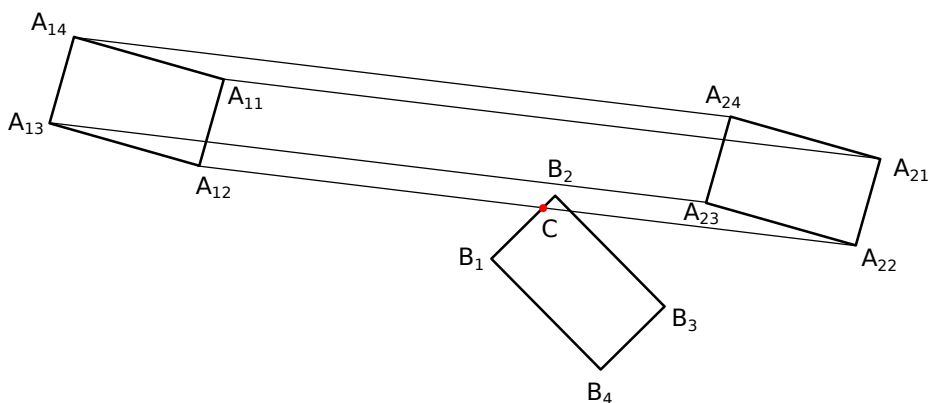
4.1 Analytický výpočet detekce kolize objektů

Pro stanovení hodnot některých proximálních indikátorů bezpečnosti je nutné umět detekovat kolizi dvou pohybujících se objektů v prostoru a čase. Příklad takového indikátoru je čas do kolize TTC. Jedním z přístupů pro detekci kolize dvou pohybujících se objektů je přístup analytický [10]. Obrázek 4.1 ilustruje analytický způsob výpočtu, který je založen na převedení problému dvou pohybujících se polygonů na dva polygony statické. Jeden z polygonů je ponechán ve výchozím stavu a druhý polygon je „prodloužen“ o rozdílový vektor rychlostí původních objektů. Prodloužení polygonu je realizováno nejdříve jeho posunutím ve směru rozdílového vektoru a následným vytvořením konvexní obálky. Pokud existuje průnik polygonů ve scéně, pak byla úspěšně detekována kolize mezi těmito objekty. Uvedený přístup umožňuje pouze detekovat, zdali na základě výchozího stavu ke kolizi objektů ve scéně dojde či nikoliv. Zmíněný výpočet tedy nestanovuje pro polygony obecného tvaru místo střetu, není tedy možné stanovit čas, za který by z výchozího stavu ke kolizi došlo. V případě, že je tvar polygonů ve scéně omezen na orotovaný obdelník, je možné detekovat také místo kolize a z něj vycházející čas do kolize. Tato situace je ilustrována na obrázku 4.2.

Uvedený přístup detekce kolize dvou pohybujících se polygonů ve scéně a stanovení času do kolize v případě pohybujících se obdelníků je velice efektivní na výpočet a dostačující pro základní stanovení hodnoty proximálního indikátoru bezpečnosti času do kolize, jehož definice



Obrázek 4.1: Ilustrace analytického řešení detekce kolize pro libovolné dva pohybující se polygony v prostoru. Polygony se pohybují rychlostí V_A a V_B . Rozdílem těchto rychlostí je vytvořen rychlostní vektor V (obrázek vlevo). Díky vypočítanému rozdílovému rychlostnímu vektoru V je možné problém detekce kolize polygonů A a B převést na dva statické polygony (obrázek vpravo). Z polygonu A a polygonu A posunutého o rozdílový vektor V je vytvořen nový polygon v podobě jejich konvexní obálky. Na základě kontroly existence průniku nově vzniklých polygonů je možné detekovat jejich kolizi v prostoru a času. Obrázek je byl převzat a upraven z [10].



Obrázek 4.2: Ilustrace detekce kolize a místa kolizního bodu popsané v kapitole 4.1. Při omezení obecného tvaru pohybujících se polygonů ve scéně pouze na obdelníky je možné určit i kolizní bod, který je v obrázku označen písmenem C .

je uvedena v kapitole 2.2.1. Pro stanovení času do kolize v případě jiné interpretace významu zachování směru pohybu dvou účastníků silničního provozu, pro který neexistuje analytické řešení nebo by toto řešení bylo velice komplexní, je nutné přejít k simulaci pohybu účastníků silničního provozu z výchozího stavu scény, která je popsána v kapitole 4.2.

4.2 Simulace pohybu objektů ve scéně

Analytické řešení pro univerzální predikci pohybu účastníků silničního provozu není vhodné v případě složitějšího popisu chování řidiče, jak již bylo řečeno v předchozí kapitole. Proto je vhodné pro detekci dopravních konfliktů v dané scéně použít simulace, díky kterým je možné ovlivňovat průběh predikovaného pohybu v kterémkoliv čase. Analyticky složitě popsatelný koncový stav objektu ve scéně však není jediným důvodem, proč je použití simulace pohybu vhodným přístupem pro detekci dopravních konfliktů. Díky možnosti stanovení pozice objektu v libovolném čase na základě simulace je možné vytvářet „prostorově-temporální“ polygony, které jsou užitečné pro efektivnější stanovení hodnot proximálních indikátorů bezpečnosti (viz následující kapitoly).

Princip simulace je založen na vypočtení budoucího stavu objektu ve scéně na základě stavu výchozího. Pro každý časový okamžik je pak možné vygenerovat množinu stavů popisujících možný nový scénář vývoje scény. Tento přístup je užitečný pro většinu detekcí dopravních konfliktů, které vycházejí z hodnot preemtivních indikátorů bezpečnosti. Způsob pohybu objektu pak může být ovlivňován typem řidiče, který objekt ve scéně ovládá. V rámci návrhu systému pro detekci dopravních konfliktů byly stanoveny dva typy pohybu, kterými může objekt dále z výchozího stavu pokračovat v prostoru.

První způsob predikce pohybu objektu ve scéně vychází z aktuálního vektoru rychlosti a případně také zrychlení. Na směr vektoru rychlosti a jeho velikosti je založen výpočet většiny preemtivních indikátorů dopravních konfliktů, které předpokládají, že účastníci silničního provozu v dané konfliktní situaci „zachovají svůj směr a rychlost“. Vzdálenost, o kterou se má objekt ve scéně z výchozího stavu posunout ve směru vektoru rychlosti za čas t , se vypočítá podle známého vzorce 4.1.

$$s = v \cdot t + \frac{1}{2} a \cdot t^2 \quad (4.1)$$

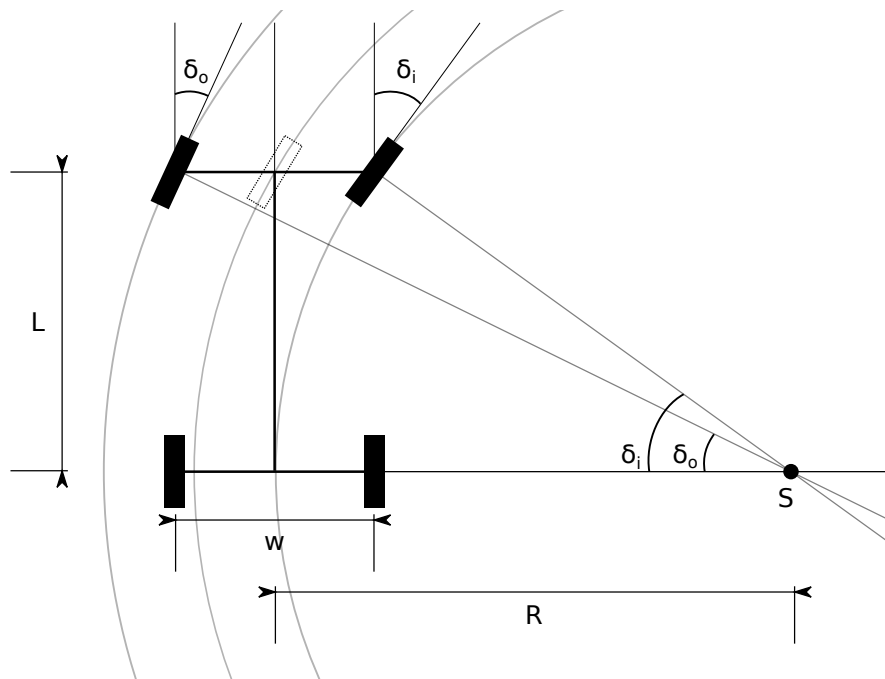
kde je:

s	dráha
v	rychlost
a	zrychlení
t	čas

Druhý způsob predikce pohybu objektu ve scéně vychází z předpokladu, že se objekt nachází ve stavu zatáčení, ve kterém opisuje kružnici se středem S . Predikce pohybu objektu je pak založena na pokračování v opisování této kružnice. Princip opisování kružnice při pohybu jednostopého nebo dvoustopého objektu je popsán Ackermanovým modelem zatáčení [29], který je znázorněn na obrázku 4.3. Z modelu vyplývá, že všechny body na vozidle se v daném okamžiku pohybují po kružnicích o shodném středu, avšak rozdílného poloměru. Pro možnost predikovat budoucí stav objektu pohybujícího se po kružnici dle Ackermanova modelu zatáčení je nejprve nutné určit střed kružnice, po které se objekt pohybuje. Z definice modelu je známo, že střed opisující kružnice leží na přímce p procházející zadní osou vozidla, na kterou jsou připevněna kola. Pro stanovení středu opisující kružnice v čase t z prostorově-temporálních dat pak stačí nalézt průsečík přímek p_t a p_{t-1} . Pokud průsečík těchto přímek neexistuje, pak se vozidlo pohybuje dokonale rovně a střed opisující kružnice leží v nekonečnu. Po nalezení středu kružnice je pak možné stanovit další parametry vycházející z Ackermanova modelu, jako je například úhel natočení předních kol vozidla. Úhel natočení předního kola δ_o opisující vnější kružnici otáčení vozidla a úhel natočení předního kola δ_i opisující vnitřní kružnici otáčení vozidla lze pak na základě zmíněného modelu zobrazeném na obrázku 4.3 vypočítat pomocí rovnic 4.2 a 4.3. Pro predikci pozice objektu opisující kružnici dle Ackermanova modelu zatáčení pak stačí převést jeho rychlost pohybu a zrychlení na rychlost a zrychlení úhlové, která je vztažena k určitému místu, a posunout na základě vypočítané úhlové rychlosti a zrychlení příslušné body polygonu reprezentující daný objektu v prostoru o uraženou vzdálenost po kružnici, na které daný bod leží.

$$\delta_o = \arctan\left(\frac{L}{R + \frac{w}{2}}\right) \quad (4.2)$$

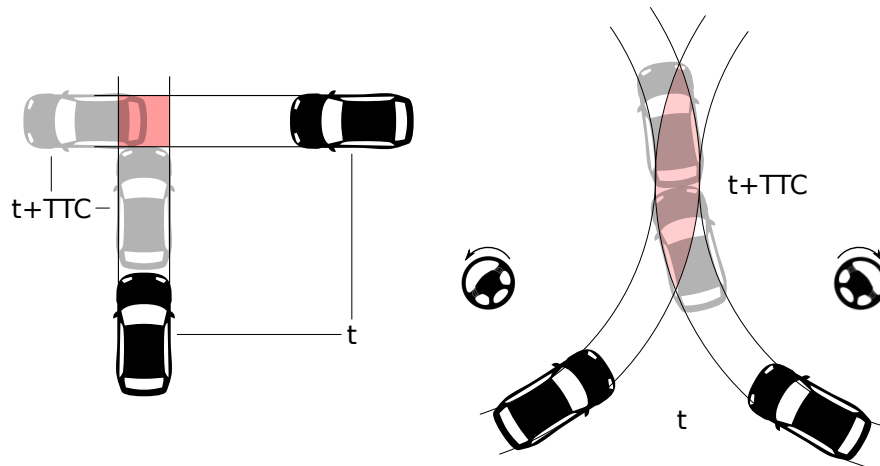
$$\delta_i = \arctan\left(\frac{L}{R - \frac{w}{2}}\right) \quad (4.3)$$



Obrázek 4.3: Ilustrace Ackermanova modelu zatáčení dvoustopého vozidla.

4.3 Výpočet času do kolize - TTC

Proximální indikátor času do kolize je podrobněji popsán v kapitole 2.2.1. Jelikož se jedná o hodnotu, pro jejíž výpočet se předpokládá nezměněný pohyb dvou účastníků silničního provozu, je možné ji vypočítat na základě simulace popsané v kapitole 4.2. Algoritmus 1 napsaný v pseudo-programovacím jazyce popisuje způsob výpočtu hodnoty indikátoru času do kolize. Příklad situací, které jsou dle zmíněného algoritmu cílem pro detekci dopravního konfliktu podle hodnoty času do kolize, jsou ilustrovány na obrázku 4.4. Společně s indikátorem času do kolize lze vypočítat také hodnoty indikátorů TET a TIT popsané na konci kapitoly 2.2.1.



Obrázek 4.4: Obrázek ilustruje příklad dopravního konfliktu detekovatelný podprahovou hodnotou indikátoru času do kolize za pomoci predikce pohybu účastníků silničního provozu popsané v kapitole 4.2. Na obrázku jsou vizualizovány stavy scény v čase t a $t + TTC$.

Algorithm 1 Výpočet TTC

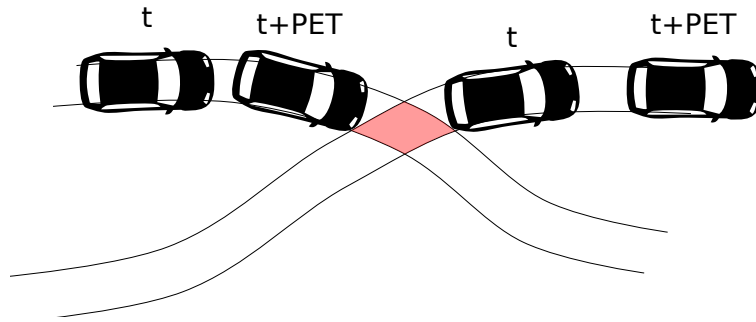
```

1: procedure TTC(time, trafficObjects)
2:   trafficConflicts
3:   for timeShift = 0 ; timeShift < TTC_THRESHOLD; timeShift += SIMULATION_STEP do
4:     trafficObjectStates
5:     for each trafficObject in trafficObjects do
6:       trafficObjectStates.pushBack(trafficObject.predictState(time,
7:         timeShift))
8:       for i = 0; i < trafficObjectStates.size; i++ do
9:         for y = i+1; y < trafficObjectStates.size; y++ do
10:          levelPolygonA = trafficObjectStates[i].levelPolygon
11:          levelPolygonB = trafficObjectStates[y].levelPolygon
12:          if levelPolygonA.intersects(levelPolygonB) then
13:            if timeShift <= TTC_THRESHOLD then
14:              idA = trafficObjectStates[i].id
15:              idB = trafficObjectStates[y].id
16:              trafficConflicts.pushBack(idA, idB, timeShift)
17:   return trafficConflicts

```

4.4 Výpočet času po průjezdu - PET

Popis proximálního indikátoru bezpečnosti čas po průjezdu je uveden v kapitole 2.2.2. Pro vypočtení hodnoty indikátoru PET není potřeba simulace, jelikož je tato hodnota vypočtena na základě reálného průběhu scény. Indikátor PET umožňuje detekovat ve scéně dopravní situace, při kterých se dva různé objekty ve scéně minuly v konkrétní konfliktní oblasti. Hodnotu indikátoru PET lze vypočítat pomocí algoritmu 2. Obrázek 4.5 ilustruje příklad, při kterém je možné stanovit hodnotu proximálního indikátoru čas po průjezdu.



Obrázek 4.5: Obrázek ilustruje příklad dopravního konfliktu detekovatelný podprahovou hodnotou indikátoru času po průjezdu. Na obrázku jsou vizualizovány stavy scény v čase t a $t + PET$.

Algorithm 2 Výpočet PET

```

1: procedure PET(trafficObjects)
2:   trafficConflicts
3:   for  $i = 0; i < \text{trafficObjects.size}; i++$  do
4:     for  $y = i+1; y < \text{trafficObjects.size}; y++$  do
5:        $sTimeA = \text{trafficObjects}[i].startTimestamp$ 
6:        $eTimeA = \text{trafficObjects}[i].endTimestamp$ 
7:        $sTimeB = \text{trafficObjects}[y].startTimestamp$ 
8:        $eTimeB = \text{trafficObjects}[y].endTimestamp$ 
9:       if  $eTimeA > sTimeB$  and  $sTimeA < eTimeB$  then
10:         $tPolyA = \text{trafficObjects}[i].trajectoryPolygon$ 
11:         $tPolyB = \text{trafficObjects}[y].trajectoryPolygon$ 
12:         $interPoly = tPolyA.intersectionWith(tPolyB)$ 
13:        if  $!interPoly.isEmpty$  then
14:           $enterTimeA = \text{trafficObjects}[i].findEnterTime(interPoly)$ 
15:           $leavingTimeA = \text{trafficObjects}[i].findLeavingTime(interPoly)$ 
16:           $enterTimeB = \text{trafficObjects}[y].findEnterTime(interPoly)$ 
17:           $leavingTimeB = \text{trafficObjects}[y].findLeavingTime(interPoly)$ 
18:           $timeDifference$ 
19:          if  $leavingTimeA < leavingTimeB$  then
20:             $timeDifference = enterTimeB - leavingTimeA$ 
21:          else
22:             $timeDifference = enterTimeA - leavingTimeB$ 
23:          if  $timeDifference \leq PET\_THRESHOLD$  then
24:             $idA = \text{trafficObjects}[i].id$ 
25:             $idB = \text{trafficObjects}[y].id$ 
26:             $\text{trafficConflicts.pushBack}(idA, idB, timeDifference)$ 
return trafficConflicts

```

Kapitola 5

Programová realizace navrženého systému

Na základě znalostí uvedených v předchozích kapitolách byl implementován systém, který zpracovává prostorově-temporální data reprezentující trajektorie pohybu účastníků dopravního provozu v dané scéně a detekuje v těchto datech dopravní konflikty. Systém byl navržen a implementován s cílem zachovat obecnost jeho použití. Jádrem systému je rozhraní pro detekci dopravních konfliktů, které může být použito pro různou podobu vstupních dat v odlišných aplikacích.

V kapitole 5.1 je uveden výčet technologií a nástrojů použitých při implementaci systému pro detekci dopravních konfliktů společně s důvody jejich použití. Struktura programového systému z hlediska dekompozice problému detekce dopravních konfliktů na podproblémy je popsána v kapitole 5.2. Popis vstupních dat včetně požadavků na jejich formát je popsán v kapitole 5.3. V kapitole 5.4 je popsána optimalizace programové realizace systému. Způsob, jakým byly dopravní konflikty vizualizovány v aplikaci DataFromSky Viewer, je popsán v kapitole 5.5.

5.1 Použité technologie

Jedním z hlavních požadavků na výsledný systém pro detekci dopravních konfliktů byla možnost překladu a následného spuštění na různých platformách. Za tímto účelem byl vybrán programovací jazyk společně s knihovnami, které tento požadavek splňují.

Systém byl naprogramován v objektovém programovacím jazyce C++ ve standardu *c++11* [13]. Důvod pro výběr tohoto programovacího jazyka mimo důvod možnosti multi-platformního překladu a kompatibility s již existující aplikací DataFromSky Viewer, ve které je rozhraní pro detekci dopravních konfliktů využito (více v kapitole 5.5), je také vlastnost efektivních výpočtů jazyka C++ a možnost překladu optimalizovaných sestavení pro konkrétní cílovou platformu. Detailní výpočetní náročnost rozhraní pro detekci dopravních konfliktů je rozvedena v kapitole 6.3.

Při implementaci byla použita multi-platformní knihovna *Qt* ve verzi 5.10 [24], ze které byl použit mechanismus signálů a slotů v ladící aplikaci (podrobněji v kapitole 5.2.2), který umožňuje vytvářet přehledné modularizované aplikace, a geometricky orientované datové typy, které knihovna *Qt* nabízí (*QPointF*, *QPolygonF*, *QLineF*, atd.), včetně *Qt*-verze standardních datových typů (*QVector*, *QList*, atd.).

Dále byla při implementaci systému použita knihovna *OpenCV* ve verzi 3.3.1 [19], která byla použita pro vizualizaci scény v ladící aplikaci, ve které jsou vykreslováni jednotliví účastníci sil-

ničního provozu společně se směry pohybu, trajektoriemi, dopravními konflikty, atd. Dále byly z knihovny OpenCV při implementaci rozhraní pro detekci dopravních konfliktů použity různé datové typy (cv::Mat, cv::Point2d, cv::Size2d, atd.).

Pro zpracování souborů ve formátu CSV, ve kterých jsou uloženy trajektorie, které systém zpracovává, byla použita knihovna třetí strany *Qt-CSV* [5], která umožňuje načtení CSV souborů splňující standard RFC 4180 [26] včetně kontroly dodržení správného formátu a snadného přístupu k jednotlivým hodnotám. Formát CSV souboru je podrobně popsán v kapitole 5.3.

Z důvodu pomalého zpracování trajektorií bylo použito aplikační programovací rozhraní *OpenMP* [20], díky kterému bylo možné urychlit výpočet pro detekci dopravních konfliktů na vícevláknových procesorech. Detailnější poznatky týkající se optimalizace prováděných výpočtů jsou popsány v kapitole 5.4.

Pro pokročilejší optimalizaci programové realizace systému bylo také využito nástroje *gperf-tools* [11] (viz kapitola 5.4) původně uváděn pod názvem *Google Performance Tools*. Nástroj nabízí uživatelsky příjemný způsob profilování aplikací, díky kterému je možné odhalit části zdrojového kódu, které jsou výpočetně náročné a vyžadují optimalizaci.

Při implementaci bylo použito vývojové prostředí *Qt Creator* [23], které disponuje přehledným zvýrazněním syntaxe, snadnou správou projektů, efektivní navigací ve zdrojovém kódu, nápovědou, doplňováním klíčových slov, atd.

5.2 Struktura systému

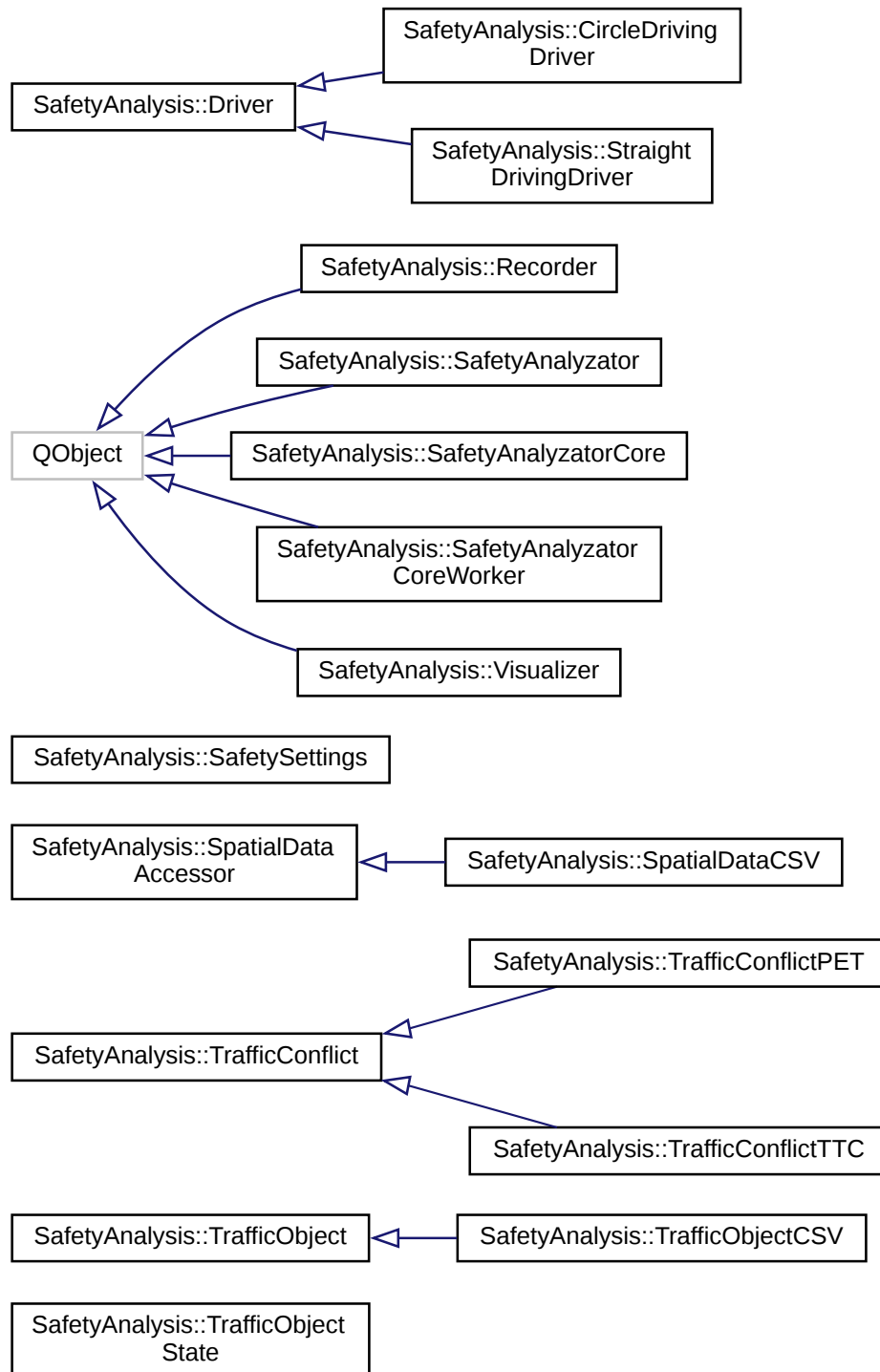
Systém byl navržen a implementován tak, aby byla zachována multi-platformnost a obecnost jeho použití, jak již bylo uvedeno v kapitole 4 a 5.1. V této kapitole je popsána struktura systému a způsob, jak byl komplexní problém detekce dopravních konfliktů z trajektorií pohybu účastníků silničního provozu dekomponován na podproblémy, které jsou řešeny jednotlivými moduly. V kapitole 5.2.1 je nejdříve popsána implementace rozhraní pro detekci dopravních konfliktů a následně je v kapitole 5.2.2 popsána implementace ladící aplikace, která zmíněné rozhraní používá. Při odkazování na jednotlivé třídy¹ definované v jazyce C++ je vycházeno z diagramu hierarchie tříd, který je zobrazen na obrázku 5.1. Diagram hierarchie tříd byl vygenerován ze zdrojových kódů pomocí nástroje *Doxygen* [12] v rámci programové dokumentace, která je součástí paměťového média přibaleného společně s tímto dokumentem (viz přílohy dokumentu).

5.2.1 Rozhraní pro detekci dopravních konfliktů

Stěžejními třídami v rozhraní pro detekci dopravních konfliktů jsou třídy *SafetyAnalyzerCore*, *SpatialDataAccessor*, *SafetySettings* a *TrafficConflict*. Skrze tyto třídy je programátorovi umožněn přístup k výpočtu dopravních konfliktů v prostorově-temporálních datech včetně ovlivnění jeho chování na základě vstupního nastavení. V následujícím výčtu bude popsána funkce těchto tříd společně s dalšími třídami, které jsou pro bezpečnostní analýzu použity:

- **SpatialDataAccessor** je abstraktní třída, která definuje rozhraní pro přístup k prostorově-temporálním datům. Instance tříd, které toto rozhraní implementují, jsou parametrem konstruktoru třídy *SafetyAnalyzerCore* (popsána níže). Příklad třídy, která abstraktní

¹Společným jmenným prostorem pro všechny třídy je název *SafetyAnalysis*, který v popisu implementace již nebude zmiňován.



Obrázek 5.1: Diagram hierarchie tříd implementovaného systému používající rozhraní pro detekci dopravních konfliktů z trajektorií.

třidu `SpatialDataAccessor` implementuje, je třída `SpatialDataCSV`, která implementuje rozhraní pro přístup k prostorově-temporálním datům uložených ve formátu CSV. V rámci implementace systému byla implementována také třída `SpatialDataDFS`, která implementuje přístup k trajektoriím skrze interní rozhraní aplikace `DataFromSky Viewer`

(viz kapitola 5.5). Klíčovou funkcí tříd implementující tuto třídu je přístup k instancím objektů účastníků silničního provozu reprezentovaných třídou `TrafficObject` (popsána níže) a dále přístup k obecným informacím o vstupních datech, jakými jsou frekvence výskytu dat (metoda `videoFps`), hranice jednoznačných identifikátorů záznamů vstupních dat (metody `firstFrameID` a `lastFrameID`), převodní poměr z metrické soustavy reálného světa do pracovního prostoru scény (metoda `metricToWorkspaceRatio`) a rozměr pracovního prostoru scény (metoda `analyzedAreaSize`).

- **SafetyAnalyzerCore** je třída, která reprezentuje hlavní přístup k detekci dopravních konfliktů mezi účastníky silničního provozu ve scéně. Parametrem konstruktoru této třídy je chytrý ukazatel na instanci abstraktní třídy `SpatialDataAccessor` popsané výše, která umožňuje přístup k prostorově-temporálním datům. Při instanciaci této třídy je nutné zkontrolovat validitu vstupních dat pomocí metody `isValid`. Změna přístupu k datům za běhu programu využívající rozhraní pro detekci dopravních konfliktů je možná pomocí metody `setDataAccessor`. Samotná funkcionalita této třídy je implementována ve třídě `SafetyAnalyzerCoreReq-Worker` mající stejné rozhraní jako třída `SafetyAnalyzerCore`, ale která je umístěna mimo hlavní vlákno aplikace používající toto rozhraní. Výpočet dopravních konfliktů je ovlivněn nastavením, které je reprezentováno třídou `SafetySettings` (třída popsána níže) a nastaveno pomocí metody `setSettings`. Pro přístup k dopravním konfliktům na základě jednoznačného identifikátoru dopravního konfliktu (metoda `getTrafficConflictByID`) nebo na základě jednoznačných identifikátorů dopravních objektů, kterých se dopravní konflikt týká (například metoda `getTrafficConflictsTTCBySet`), je nejdříve potřeba zavolat metodu `preCompute`, respektive metodu `preComputeAsync`, která na základě daného nastavení provede bezpečnostní analýzu všech dostupných dopravních dat v hlavním, respektive vedlejším vlákne aplikace. Pokud nejsou dopravní konflikty předpočítány, pak na základě zavolání metody `computeTrafficConflicts`, jejímž parametrem je unikátní identifikátor² záznamu v prostorově-temporálních datech, dojde k výpočtu dopravních konfliktů vztahujících se k danému záznamu v reálném čase. V opačném případě dojde k rychlejšímu obdržení výsledku z předpočítaných dat. Výsledkem této operace je list chytrých ukazatelů na instance třídy `TrafficConflict`, která je podrobněji popsána níže. Další metody a signály, které jsou generovány touto třídou pomocí knihovny Qt, jsou podrobněji popsány v programové dokumentaci.
- **SafetySettings** je třída reprezentující nastavení ovlivňující vlastnosti výpočtu při detekci dopravních konfliktů. Instance této třídy je parametrem metody `setSettings` třídy `SafetyAnalyzerCore`. Je zde definován časový rozsah, ve kterém má být provedena bezpečnostní analýza, v podobě hraničních hodnot jednoznačných identifikátorů záznamů prostorově-temporálních dat stanovující jejich začátek a konec. Dále je zde specifikace typů dopravních objektů ve scéně, které budou do bezpečnostní analýzy zahrnuty, prahová hodnota indikátorů, minimální rozdílová rychlost objektů ve scéně pro výpočet dopravních konfliktů, typ řidiče, který má být použit při simulaci pohybu dopravního objektu, a typ indikátoru, podle kterého budou detekovány dopravní konflikty.
- **SpatialDataCSV** je třída implementující abstraktní třídu (rozhraní) `SpatialDataAccessor` popsanou výše, která umožňuje přístup k prostorově-temporálním datům uložených v sou-

²Příkladem může být například jednoznačný identifikátor video snímku, ze kterého byla prostorově-temporální data vytvořena automatickým zpracováním obrazu.

borech ve standardu CSV. Přesný popis formátu vstupních dat pro tuto třídu je popsán v kapitole 5.3.

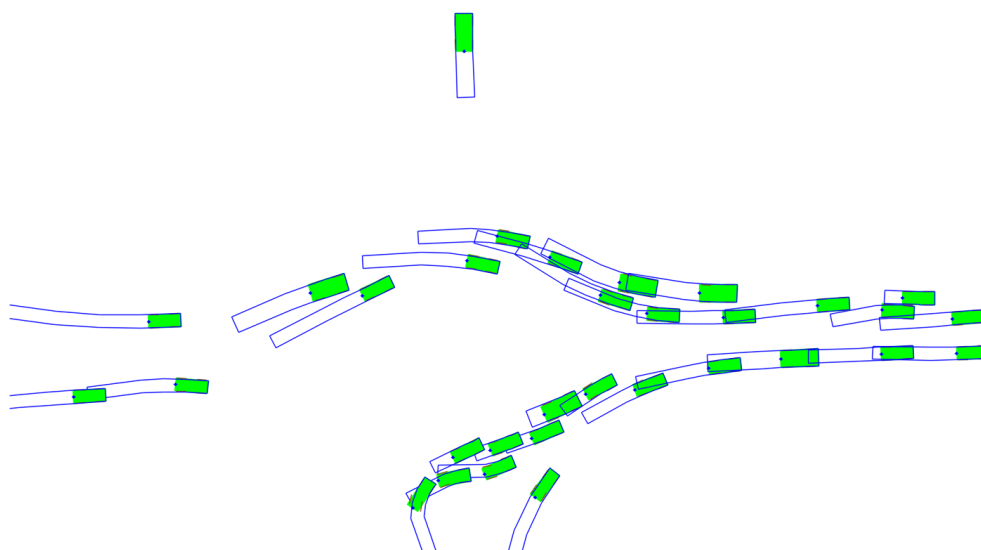
- **TrafficConflict** je abstraktní třída reprezentující dopravní konflikt, který byl detekován ve scéně v prostorově-temporálních datech. Třídy implementující tuto třídu pak reprezentují konkrétní typ dopravního konfliktu (například třída `TrafficConflictTTC` reprezentuje dopravní konflikty typu čas do kolize), který byl detekován na základě daného indikátoru dopravního konfliktu. Dopravní konflikt má jednoznačný identifikátor (přístupný metodou `getID`) a vztahuje se ke konkrétnímu jednoznačnému identifikátoru záznamu v prostorově-temporálních datech (přístupný metodou `frameID`). V případě obdržení instance této třídy jakožto ukazatele je možné pomocí metody `getTrafficConflictType` identifikovat typ dopravního konfliktu.
- **TrafficConflictTTC** je třída implementující abstraktní třídu `TrafficConflict` reprezentující dopravní konflikt typu čas do kolize. Návrátová hodnota virtuální metody `getTrafficConflictType`, kterou tato třída implementuje, je `TrafficConflictType::TTC`. Instance této třídy obsahují informace o jednoznačných identifikátorech dopravních objektů (přístupné metodami `idFirstObject` a `idSecondObject`), kterých se dopravní konflikt typu čas do kolize týká, naměřené hodnotě času do potenciální kolize mezi těmito objekty (přístupná metodou `timeToCollision`), místě potenciální kolize těchto objektů (metoda `collisionPosition`), úhlech, pod kterými by k potenciální kolizi došlo (metody `angleFirstObject` a `angleSecondObject`) a o prostorovém umístění objektů v okamžiku potenciální vzájemné kolize v podobě polygonů reprezentující dvourozměrnou obálku o rozměrech daného objektu (metody `collisionLevelPolygonFirstObject` a `collisionLevelPolygonSecondsObject`).
- **TrafficConflictPET** - je třída implementující abstraktní třídu `TrafficConflict` reprezentující dopravní konflikt typu čas po průjezdu. Návrátová hodnota virtuální metody `getTrafficConflictType`, kterou tato třída implementuje, je `TrafficConflictType::PET`. Stejně jako v případě třídy `TrafficConflictTTC` jsou v této třídě uvedeny informace o jednoznačných identifikátorech dopravních objektů (přístupné metodami `idFirstObject` a `idLastObject`), kterých se dopravní konflikt typu čas po průjezdu týká. Metoda `postEncroachmentTime` vrací naměřenou hodnotu času po průjezdu v jednotkách *ms*.
- **TrafficObject** je abstraktní třída reprezentující objekt ve scéně jakožto účastníka silničního provozu. Skrze instance této třídy je možné přistupovat ke směrovému úhlu pohybu objektu (metoda `estimateHeadingVirtual`), rychlosti pohybu objektu (metody `estimateSpeedVirtual`), vektoru rychlosti objektu (metoda `estimateSpeedVectorVirtual`), vektoru zrychlení objektu (metoda `estimateAccelerationVectorVirtual`) a k umístění objektu ve scéně v podobě polygonu reprezentujícího dvourozměrnou obálku o rozměrech daného objektu (metoda `getLevelPolygonVirtual`). Klíčem k získání zmíněných hodnot je jednoznačný identifikátor prostorově-temporálních záznamů (v tomto případě identifikátor video snímku `frameID`). Třídy implementující tuto třídu pak definují, jakým způsobem jsou zmíněné hodnoty získány. Příkladem je třída `TrafficObjectCSV` popsána níže, jejíž instance obsahují data načtená ze souboru ve formátu CSV, a třída `TrafficObjectDFS`, která implementuje přístup k těmto hodnotám skrze interní rozhraní aplikace `DataFromSky Viewer`. Každý objekt ve scéně s sebou nese informaci o typu objektu, který nabývá hodnoty výčtového typu `TrafficObjectType` (získatelný metodou `objectType`). Možné hodnoty typu objektu ve scéně jsou popsány v tabulce 5.1. Významnými metodami

typ objektu ve scéně	numerická hodnota	popis objektu
UndefinedTrackedObjectType	0	neklasifikovaný objekt
CarTrackedObjectType	1	osobní automobil
MediumVehicleTrackedObjectType	2	středně velké vozidlo
HeavyVehicleTrackedObjectType	3	velké vozidlo
BusTrackedObjectType	4	autobus
MotorbikeTrackedObjectType	5	motocykl
BikeTrackedObjectType	6	cyklista
PedestrianTrackedObjectType	7	chodec

Tabulka 5.1: Tabulka popisující výčtový typ `TrafficObject::TrafficObjectType`.

z hlediska řešení problému detekce dopravních konfliktů je metoda `getTrafficObjectState`, která zpřístupňuje kompletní stav objektu v daném čase, a metoda `predictTrafficObjectState`, která na základě stavu objektu v daném čase a stanoveném časovém posunu predikuje budoucí stav objektu v čase a prostoru. Predikovaný stav objektu je ovlivňován typem řidiče, který se v daném objektu nachází (viz třída `Driver`). Další metody implementované v této třídě jsou zmíněny v programové dokumentaci.

- **TrafficObjectCSV** je třída implementující abstraktní třídu (rozhraní) `TrafficObject`, která zprostředkovává informace o daném objektu z dat načtených ze souborů ve formátu CSV. Podoba vstupních dat ve formátu CSV je podrobně popsána v kapitole 5.3.
- **TrafficObjectState** je třída reprezentující stav objektu třídy `TrafficObject`. Stav objektu může vycházet ze vstupních dat (získán metodou `getTrafficObjectState` třídy `TrafficObject`) nebo být predikován na základě výchozího stavu objektu, typu řidiče, který pohyb objektu ovlivňuje, a délky predikce. Stav objektu obsahuje informace o pozici objektu, rychlosti, směru pohybu, vektoru rychlosti, vektoru zrychlení, středě opisující kružnice (viz kapitola 4.2) objektu a další.
- **Driver** je abstraktní třída reprezentující řidiče, který ovlivňuje pohyb objektu ve scéně. Pomocí metody `getPredictedTrafficObjectState` je na základě výchozího stavu objektu a stanovené časové délky predikce vytvořen nový stav, jehož hodnota je odvozena od konkrétní implementace této metody. Třídy implementující rozhraní třídy `Driver` jsou třídy `StraightDrivingDriver` a `CircleDrivingDriver`, které jsou popsány níže.
- **StraightDrivingDriver** je třída implementující abstraktní třídu (rozhraní) `Driver`. Implementace metody `getPredictedTrafficObjectState` v této třídě vygeneruje novou instanci stavu objektu reprezentovaného třídou `TrafficObjectState` na základě stavu výchozího tak, že je brán v potaz vektor rychlosti a případně zrychlení, ze kterých je za daný časový posun vypočítána nová pozice objektu.
- **CircleDrivingDriver** je třída implementující abstraktní třídu (rozhraní) `Driver`. Implementace metody `getPredictedTrafficObjectState` v této třídě vygeneruje novou instanci stavu objektu reprezentovaného třídou `TrafficObjectState` na základě stavu výchozího tak, že je brána v potaz rychlost a případně i zrychlení objektu a kružnice objektem opisovaná (viz kapitola 4.2). Z těchto hodnot je odvozen nový stav objektu za daný časový posun, u kterého je počítáno s pokračováním pohybu objektu ve scéně po kružnici, kterou ve výchozím stavu opisuje.



Obrázek 5.2: Ukázka grafického výstupu vytvořeného pomocí třídy `Visualizer`. Na obrázku jsou vykresleny objekty ve scéně společně s jejich „prostorově-temporálními“ polygony, které reprezentují predikci pohybu do času $t + 2s$.

5.2.2 Ladící aplikace

Společně s rozhraním pro bezpečnostní analýzu, jehož implementace je posána v kapitole 5.2.1, byla vytvořena aplikace využívající toto rozhraní pro účely testování, ladění a vizualizace pohybu účastníků silničního provozu ve scéně včetně dopravních konfliktů, které mezi nimi vznikají. V této kapitole jsou popsány tři hlavní třídní komponenty, ze kterých se aplikace skládá:

- **SafetyAnalyzator** je třída reprezentující celou aplikaci. Pomocí mechanismů signálu a slotů, dostupných skrze knihovnu Qt, je zde implementováno propojení mezi dalšími komponentami zmíněnými níže. Tato třída je zároveň příkladnou ukázkou způsobu použití rozhraní pro detekci dopravních konfliktů. Jedná se o instanci třídy `SafetyAnalyzatorCore` a příslušné třídy implementující rozhraní `SpatialDataAccessor` včetně patřičného nastavení detekčního systému pomocí třídy `SafetySettings` a obdržení detekovaných dopravních konfliktů v podobě instancí třídy `TrafficConflict` (třídy jsou podrobně popsány v kapitole 5.2.1).
- **Visualizer** je třída sloužící pro grafickou vizualizaci prostorově-temporálních dat a dopravních konfliktů, které mezi účastníky silničního provozu vznikají. Dále umožňuje vizualizovat příslušné vektory pohybu, trajektorie, vektory rychlosti, predikci trajektorie objektů ve scéně atd. Ukázka možného grafického výstupu je na obrázku 5.2.
- **Recorder** je třída umožňující vytvořit záznam grafického výstupu, který produkuje třída `Visualizer` popsaná výše. V případě povolení záznamu v nastavení aplikace dojde k vytvoření videozáznamu dané scény nebo zachycení a uložení snímku ve scéně.

5.3 Vstupní data

Formát vstupních dat se odlišuje na základě konkrétní implementace abstraktních tříd `SpatialDataAccessor` a `TrafficObject` (viz kapitola 5.2.1), které k těmto datům přímo přistupují. V této kapitole bude popsán formát prostorově-temporálních dat určený pro třídy `SpatialDataCSV` a `TrafficObjectCSV`, které zmíněné rozhraní implementují a přistupují k datům ve formátu CSV. Společně s těmito třídami byly implementovány také třídy `SpatialDataDFS` a `TrafficObjectDFS`, které přistupují k prostorově-temporálním datům skrze interní rozhraní aplikace `DataFromSky Viewer`.

CSV formát vstupních dat pro třídy `SpatialDataCSV` a `TrafficObjectCSV` musí splňovat standard RFC 4180 [26]. První řádek musí obsahovat obecné informace o scéně. Jedná se o šest položek oddělených čárkou:

1. `DATA_INDEX_AREA_WIDTH` (unsigned int) - šířka pracovního prostoru
2. `DATA_INDEX_AREA_HEIGHT` (unsigned int) - výška pracovního prostoru
3. `DATA_INDEX_METRIC_TO_WORK_RATIO` (float) - převodní poměr z metrické soustavy reálného světa do pracovního prostoru
4. `DATA_INDEX_VIDEO_FPS` (float) - frekvence výskytu prostorově-temporálních záznamů za sekundu
5. `DATA_INDEX_FIRST_FRAME_ID` (unsigned int) - jednoznačný časový identifikátor začátku prostorově-temporálních dat
6. `DATA_INDEX_LAST_FRAME_ID` (unsigned int) - jednoznačný časový identifikátor konce prostorově-temporálních dat

Dále následují jednotlivé záznamy prostorově-temporálních dat. Každý záznam musí obsahovat 20 položek:

1. `DATA_INDEX_TO_ID_FRAME` (unsigned int) - unikátní časový identifikátor, ke kterému se vztahuje výskyt objektu ve scéně
2. `DATA_INDEX_TO_ID` (unsigned int) - unikátní identifikátor objektu ve scéně
3. `DATA_INDEX_TO_TYPE` (unsigned int) - typ objektu ve scéně (viz tabulka 5.1)
4. `DATA_INDEX_TO_FIRST_FRAME_ID` (unsigned int) - unikátní časový identifikátor prvního výskytu objektu ve scéně
5. `DATA_INDEX_TO_LAST_FRAME_ID` (unsigned int) - unikátní časový identifikátor posledního výskytu objektu ve scéně
6. `DATA_INDEX_TO_POLYGON_P1_X` (float) - x-ová souřadnice předního levého bodu polygonu objektu
7. `DATA_INDEX_TO_POLYGON_P1_Y` (float) - y-ová souřadnice předního levého bodu polygonu objektu
8. `DATA_INDEX_TO_POLYGON_P2_X` (float) - x-ová souřadnice předního pravého bodu polygonu objektu

9. DATA_INDEX_TO_POLYGON_P2_Y (float) - y-ová souřadnice předního pravého bodu polygonu objektu
10. DATA_INDEX_TO_POLYGON_P3_X (float) - x-ová souřadnice zadního pravého bodu polygonu objektu
11. DATA_INDEX_TO_POLYGON_P3_Y (float) - y-ová souřadnice zadního pravého bodu polygonu objektu
12. DATA_INDEX_TO_POLYGON_P4_X (float) - x-ová souřadnice zadního levého bodu polygonu objektu
13. DATA_INDEX_TO_POLYGON_P4_Y (float) - y-ová souřadnice zadního levého bodu polygonu objektu
14. DATA_INDEX_TO_HEADING_X (float) - x-ová složka směrového vektoru pohybu objektu
15. DATA_INDEX_TO_HEADING_Y (float) - y-ová složka směrového vektoru pohybu objektu
16. DATA_INDEX_TO_SPEED (float) - rychlost objektu
17. DATA_INDEX_TO_SPEED_VECTOR_X (float) - x-ová složka vektoru rychlosti objektu
18. DATA_INDEX_TO_SPEED_VECTOR_Y (float) - y-ová složka vektoru rychlosti objektu
19. DATA_INDEX_TO_ACCELERATION_VECTOR_X (float) - x-ová složka vektoru zrychlení objektu (laterální)
20. DATA_INDEX_TO_ACCELERATION_VECTOR_Y (float) - y-ová složka vektoru zrychlení objektu (tangenciální)

Jednotlivé záznamy reprezentují výskyty objektů ve scéně. Klíčem záznamu je jednoznačný časový identifikátor, ke kterému se záznam vztahuje, a jednoznačný identifikátor objektu, který se v daném záznamu vyskytuje. Jeden časový identifikátor tedy může být svázán s více jednoznačnými identifikátory objektů. Dvojice časového identifikátoru a identifikátoru objektu však musí být unikátní v rámci jednoho souboru. Prostorová data uložená v jednom záznamu obsahující informace o pozicích objektu nejsou trajektoriemi v pravém slova smyslu. Nejedná se o seznam bodů ve scéně, po kterých se objekt pohybuje, ale o čtyři seznamy bodů, které reprezentují pohyb polygonu o rozměrech daného objektu. Důvodem pro tento přístup je přenechání přesnosti stanovení rozměru objektu ve scéně v konkrétním časovém okamžiku na detekční systém, který prostorově-temporální data vytváří. Pro detekci dopravních konfliktů by byl převod z bodu trajektorie na polygon stejně nutný a musel by potom být založen na předem stanovených konstantách vypovídajících o rozměru objektu konkrétního typu. Všechny hodnoty vztahující se k prostoru nebo pohybu ve vstupních datech jsou uvedeny tzv. *pracovních jednotkách*. Převodní poměr z metrické soustavy do *pracovního prostoru* musí být uveden v prvním řádku souboru obsahujícího obecné informace o scéně. Hodnoty vztahující se k pohybu objektu ve scéně musí být uvedeny v jednotkách pracovního prostoru za časovou jednotku záznamu³. Příkladem může být rychlost pohybu objektu, která je standardně uváděna v jednotkách $\frac{m}{s}$. Ve vstupních datech musí být hodnota rychlosti objektu uvedena v jednotkách $\frac{\text{jednotka pracovního prostoru}}{\text{časová jednotka záznamu}}$.

³Pokud byla vstupní data získána analýzou obrazových dat, pak může být časovou jednotkou snímek videozáznamu, u kterého je také známá snímková frekvence.

```

1334, 1144, 6, 23.976, 0, 22502
0, 19, 2, 0, 502, 760.825, 1055.98, 773.887, 1046.74, 794.101, 1075.32, ...
0, 20, 1, 0, 244, 678.622, 835.845, 690.497, 837.575, 686.173, 867.261, ...
0, 21, 1, 0, 349, 623.377, 722.811, 629.801, 712.675, 655.14, 728.735, ...
0, 22, 2, 0, 289, 556.806, 690.42, 563.114, 675.716, 595.279, 689.515, ...
0, 23, 1, 0, 228, 430.681, 596.753, 439.615, 588.741, 459.644, 611.077, ...
0, 24, 2, 0, 137, 276.704, 384.129, 289.729, 374.836, 310.056, 403.328, ...
0, 25, 1, 0, 49, 103.089, 163.871, 112.673, 156.649, 130.728, 180.607, ...
0, 26, 1, 0, 669, 458.027, 793.938, 446.027, 793.904, 446.112, 763.904, ...
0, 27, 1, 0, 305, 460.521, 700.509, 449.117, 704.246, 439.775, 675.738, ...
:

```

Obrázek 5.3: Ukázka části vstupních prostorově-temporálních dat ve formátu CSV.

Přestože jsou hodnoty týkající se rychlosti a zrychlení objektu ve scéně snadno odvoditelné z prostorově-temporálních dat, musí být tyto hodnoty uvedeny ve vstupních datech. Důvodem k tomuto přístupu je snaha o odstínění znalosti o automatizovaném systému tvořícího prostorově-temporální data. Informace o pozici, rychlosti a zrychlení objektu ve scéně mohou být získány z odlišných zdrojů stanovujících tyto hodnoty s různou přesností. Příklad části vstupních dat ve formátu CSV je možné vidět na obrázku 5.3.

5.4 Optimalizace

Po dokončení první implementace systému pro detekci dopravních konfliktů byla při experimentování s různými sadami prostorově-temporálních dat zjištěna vysoká výpočetní náročnost, která nebyla uspokojivá pro reálné použití aplikace. Aplikace byla schopna data zpracovávat v reálném čase, avšak vytížení procesoru⁴ dosahovalo maximálních hodnot. Pro vypočtení statistických výsledků, při kterých je potřeba předpočítat dopravní konflikty pro celý záznam prostorově-temporálních dat, se blížila délka výpočtu 90% časové složky délky vstupního záznamu. Zpracování vstupního záznamu o délce 10 hodin by pak trvalo přibližně 9 hodin. Pro dosažení nižších výpočetních časů bylo nutné analyzovat zdrojové kódy programové realizace systému a pokusit se o případné optimalizace.

Prvním krokem v procesu optimalizace výpočtu bylo maximální využití výpočetního výkonu vícejádrových a vícevláknových procesorů. Pro paralelizaci detekce dopravních konfliktů v prostorově-temporálních datech bylo použito programové rozhraní OpenMP [20] (viz kapitola 5.1). Paralelizace byla aplikována na cyklus, který detekoval dopravní konflikty pro každý časový okamžik ve scéně. Konkrétní implementace paralelního výpočtu dopravních konfliktů je provedena v metodě `precomputeTrafficConflicts` třídy `SafetyAnalyzerCoreWorker`. Díky paralelizaci výpočtu bylo dosaženo zrychlení až 370%. Velikost zrychlení se odvíjí od výpočetního výkonu procesoru a počtu možných paralelně běžících vláken. Neplatí ovšem předpoklad, že výsledný čas výpočtu je tolikrát menší, kolik je dostupných vláken pro výpočet v porovnání s jednovláknovou implementací detekce dopravních konfliktů. Je potřeba brát v potaz zpomalení způsobené synchronizací vláken při přístupu do sdílené paměti a také zpomalení způsobené přepínáním mezi vlákny.

⁴Procesor *Intel Core i7-8550U*.

I přes značné zrychlení výpočtu způsobené paralelizací cyklu, ve kterém je prováděna detekce dopravních konfliktů, bylo nutné dále provádět optimalizace vedoucí ke snížení výsledného času výpočtu detekcí dopravních konfliktů. Pro analýzu výpočetně náročných oblastí ve zdrojovém kódu byl použit nástroj *gperftools* umožňující nalézt konkrétní metody a funkce, ve kterých je stráveno nejvíce výpočetního času procesoru. Za pomoci zmíněného nástroje pak byly provedeny optimalizace v podobě ukládání opakovaně se používajících hodnot do hash tabulek, přechodu některých datových typů z knihovny Qt na standardní datové typy vykazující v určitých případech efektivnější práci s daty, změny použití operátorů přístupu k datům a také v podobě optimalizace simulačního kroku, který byl adaptivně stanoven na základě aktuálního stavu scény.

5.5 Vizualizace v aplikaci DataFromSky Viewer

Zmíněná implementace rozhraní pro detekci dopravních konfliktů byla také použita jako rozšíření do aplikace *DataFromSky Viewer*⁵, která nabízí pokročilou orientaci ve scéně a v prostorově-temporálních datech obecně. Výstupy z uvedeného rozhraní byly vhodně vizualizovány do scény, kterou aplikace vykresluje. Pro možnost použití rozhraní pro detekci dopravních konfliktů bylo nutné implementovat abstraktní třídy *SpatialDataAccessor* a *TrafficObject* (viz kapitola 5.2.1) tak, aby využívaly interní rozhraní aplikace *DataFromSky Viewer* pro přístup k prostorově-temporálním datům. Výsledkem jsou třídy *SpatialDataDFS* a *TrafficObjectDFS* splňující tyto požadavky.

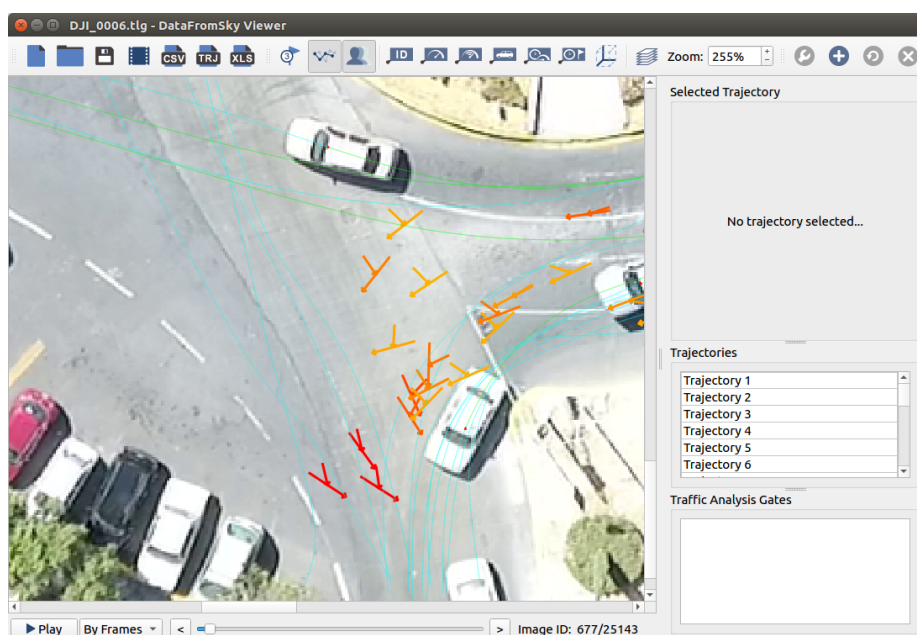
Na obrázku 5.4 je možné vidět způsob vizualizace, která byla implementována v aplikaci *DataFromSky Viewer* pro statistické zobrazení detekovaných dopravních konfliktů v bezpečnostní analýze. Po provedení analýzy prostorově-temporálních dat na základě stanovených parametrů (viz obrázek 5.6) jsou zobrazeny grafické prvky ve scéně reprezentující nejhorší případy z množiny detekovaných dopravních konfliktů mezi dvěma objekty ve scéně. Uvedený příklad ilustruje zobrazení nejhorších dopravních konfliktů detekovaných na základě proximálního indikátoru bezpečnosti času do kolize. Vykreslené grafické prvky v podobě do sebe směřujících šipek zobrazují potenciální místa střetu dvou objektů ve scéně v okamžiku nejnižší detekované hodnoty indikátoru času do kolize. Zobrazené značky jsou aktivními prvky v grafickém uživatelském rozhraní a při jejich označení dojde k přesunu v čase do okamžiku vyvolání daného dopravního konfliktu (viz obrázek 5.5). Nejhorší případy detekovaných dopravních konfliktů lze zobrazit také v podobě seznamu obsahujícího detailnější informace o daném dopravním konfliktu (obrázek 5.6).

Způsob vizualizace aktuálně se vyskytujícího dopravního konfliktu v konkrétním čase ilustruje obrázek 5.5. Typ zobrazeného dopravního konfliktu je hodnota proximálního indikátoru bezpečnosti času do kolize. Situace je graficky znázorněna v podobě spojnice mezi objekty, kterých se dopravní konflikt týká, hodnoty dopravního konfliktu a v případě typu dopravního konfliktu času do kolize také z predikovaných pozic objektů v okamžiku potenciálního střetu. Společně s objekty je vykreslen i jejich celý reálný průběh pohybu v podobě trajektorií.

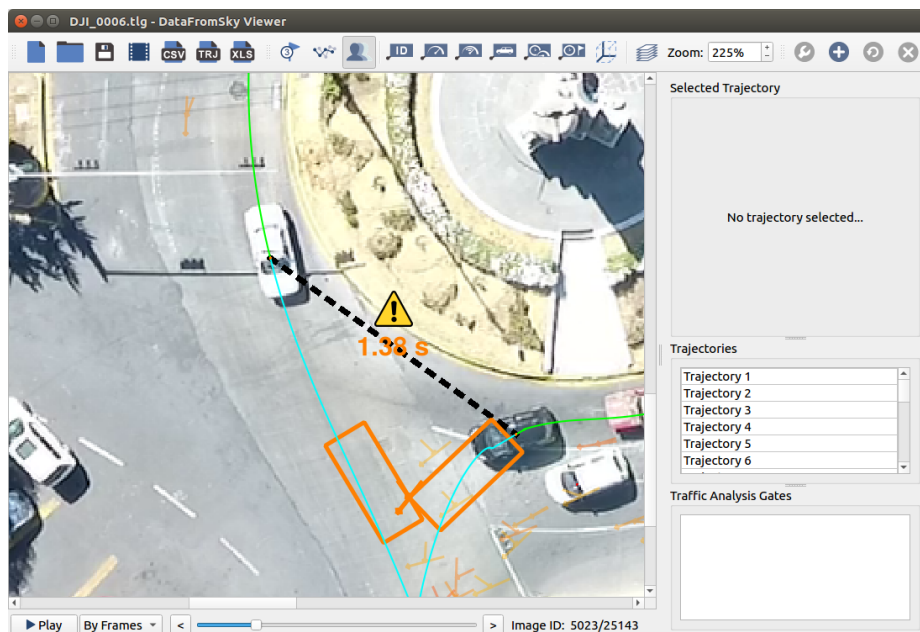
Další prvky grafického uživatelského rozhraní aplikace *DataFromSky Viewer* související s implementací dopravní bezpečnostní analýzy jsou zobrazeny na obrázku 5.6. Vlevo je zobrazeno nastavení parametrů bezpečnostní analýzy. Uživatel může stanovit časový rozsah záznamu, ve kterém budou ve vybraných trajektoriích detekovány dopravní konflikty. Dále je možné určit

⁵*DataFromSky Viewer* je aplikace sloužící pro dopravní analýzu prostorově-temporálních dat, která byla vytvořena v rámci projektu *DataFromSky* [6]. Aplikace umožňuje zobrazení trajektorií účastníků dopravního provozu, informací o jejich pohybu, výstup v podobě různých statistik o dopravním uzlu a další.

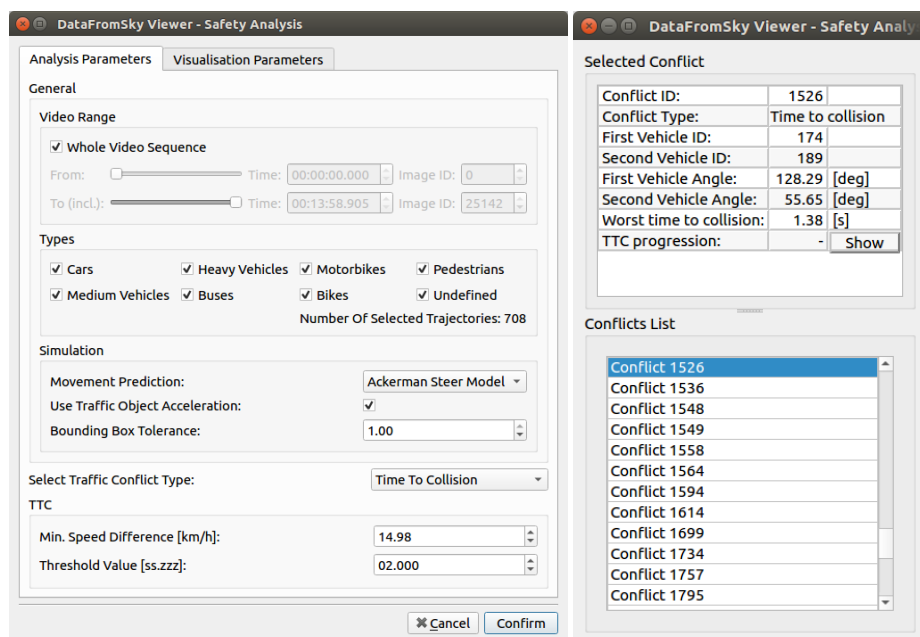
množinu typů objektů ve scéně, nad kterými má být analýza provedena, a nastavit parametry simulace jejich pohybu. Nakonec je zde možnost zvolení typu indikátoru pro detekci dopravních konfliktů, který bude použit v bezpečnostní analýze, včetně prahových hodnot. Na obrázku vpravo je možné vidět seznam detekovaných dopravních konfliktů. V případě, že je mezi konkrétními dvěma objekty ve scéně detekováno více dopravních konfliktů, pak je zde zobrazen dopravní konflikt s nejrizikovější hodnotou z nich. Seznam dopravních konfliktů je svázán se zobrazením scény a kliknutím na položku v seznamu dojde k přesunu do času vyvolání dopravního konfliktu. Pokud je vybrán dopravní konflikt přímo ve scéně (viz obrázek 5.4), dojde k jeho označení v tomto okně. V případě, že bylo u dané kombinace objektů ve scéně detekováno více dopravních konfliktů ve spojitém čase, je možné zobrazit průběh vývoje dopravního konfliktu. V ukázkovém příkladě se jedná o tlačítko *Show* v kolonce *TTC progression*. Příklad průběhu dopravního konfliktu je zobrazen na obrázku 5.7.



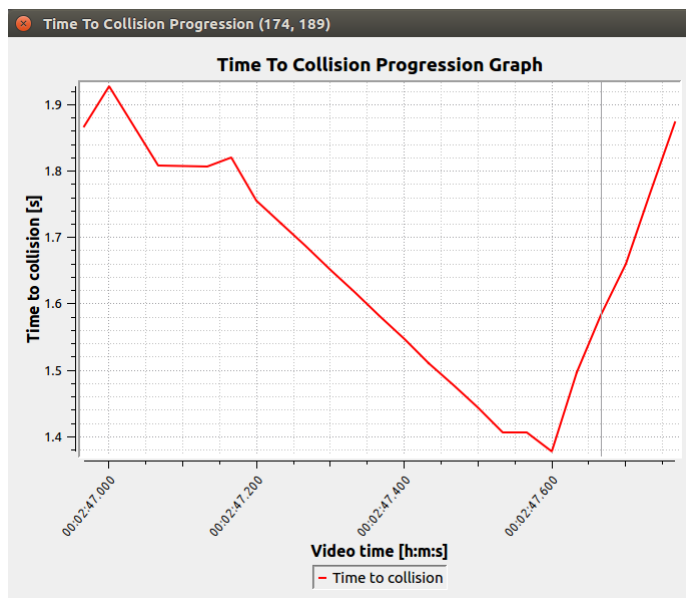
Obrázek 5.4: Obrázek ilustrující způsob vizualizace, která byla implementována v aplikaci DataFromSky Viewer pro statistické zobrazení detekovaných dopravních konfliktů v bezpečnostní analýze. Ve scéně jsou zobrazeny nehorší případy z množiny detekovaných dopravních konfliktů mezi dvěma objekty.



Obrázek 5.5: Obrázek ilustrující způsob vizualizace, která byla implementována v aplikaci DataFromSky Viewer pro zobrazení aktuálně se vyskytujícího dopravního konfliktu v konkrétním čase.



Obrázek 5.6: Na obrázku jsou další prvky grafického uživatelského rozhraní aplikace DataFromSky Viewer související s implementací dopravní bezpečnostní analýzy. **Vlevo:** Nastavení parametrů bezpečnostní analýzy. **Vpravo:** Seznam detekovaných dopravních konfliktů.



Obrázek 5.7: Graf zobrazující průběh vývoje hodnot proximálního indikátoru bezpečnosti času do kolize mezi dvěma danými objekty ve scéně, mezi kterými byla ve spojitém čase detekována podprahová hodnota tohoto indikátoru. Zobrazení průběhu vývoje daného proximálního indikátoru bezpečnosti je možné z nabídky zobrazené na obrázku 5.6.

Kapitola 6

Provedené experimenty a vyhodnocení funkčnosti vytvořeného řešení

Pro otestování funkčnosti implementovaného systému pro detekci dopravních konfliktů bylo provedeno několik experimentů. V kapitole 6.1 jsou popsána experimentální data, na kterých byla testována detekce dopravních konfliktů. Provedené experimenty na vybraných datových sadách a dosažené výsledky jsou popsány v kapitole 6.2. Kapitola 6.3 je zaměřena zejména na výpočetní náročnost při zpracování prostorově-temporálních dat. Zhodnocení dosažených výsledků a celkové funkčnosti implementovaného systému je uvedeno v kapitole 6.4.

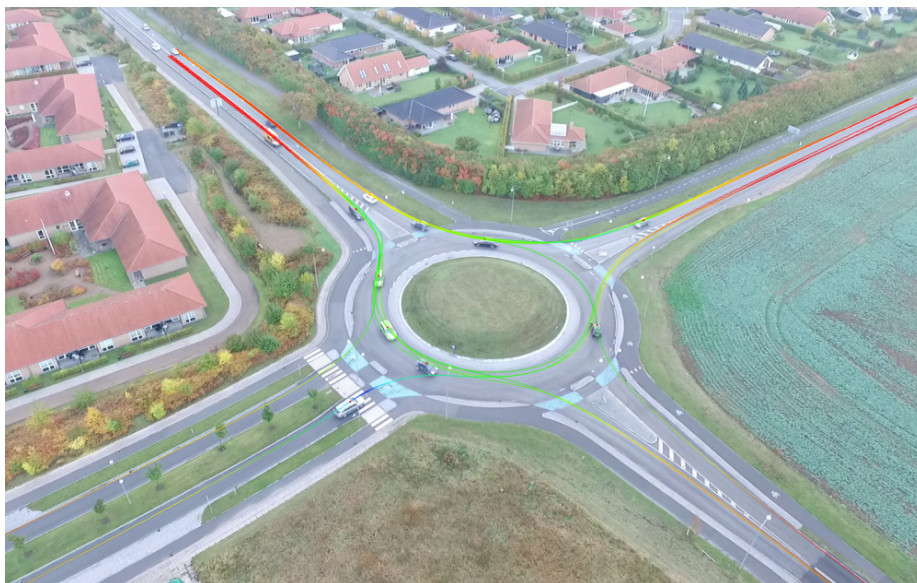
6.1 Experimentální data

Pro experimentování byly vybrány čtyři prostorově-temporálních záznamy vztahující se k různým typům dopravních uzlů. Vybrané dopravní uzly je možné vidět na obrázcích 6.1 - 6.4. Informace o vybraných záznamech jsou uvedeny v tabulce 6.1. Záznamy č. 1-3 jsou vytvořeny z reálných dat automatickou analýzou obrazových dat. Prostorově-temporální data záznamu č. 4 byla vygenerována pomocí simulačního nástroje SUMO [27].

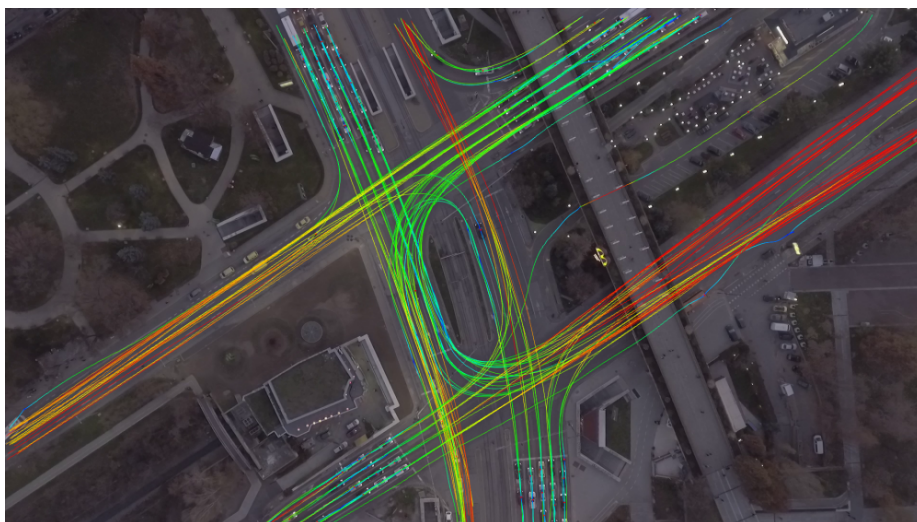
Číslo záznamu	Délka záznamu	Trajektorií za minutu	Frekvence dat za sekundu	Typ objektu dle tabulky 5.1					
				1	2	3	4	5	6
1	15min38s	19,1	24	244	21	6	5	2	20
2	7min29s	131,7	25	943	27	1	12	5	0
3	13min59s	50,6	30	560	110	0	10	28	0
4	20min	19,4	30	272	29	6	2	4	75

Tabulka 6.1: Tabulka zobrazující základní informace o vybraných experimentálních záznamech.

Záznamy byly pro experimentování vybrány tak, aby reflektovaly vlastnosti implementovaných indikátorů dopravních konfliktů a jejich vhodnost pro bezpečnostní analýzu daného typu dopravního uzlu.



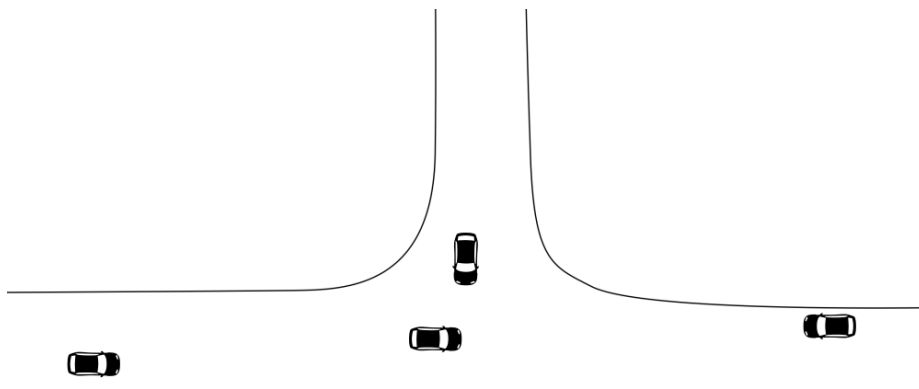
Obrázek 6.1: Obrázek experimentálního dopravního uzlu č.1. Jedná se o kruhový objezd se stezkou pro cyklisty.



Obrázek 6.2: Obrázek experimentálního dopravního uzlu č.2. Dopravní uzel má podobu průsečné křižovatky se čtyřmi hlavními proudy v každém směru a ostrůvkem uprostřed.



Obrázek 6.3: Obrázek experimentálního dopravního uzlu č.3. Dopravní uzel je neobvyklým druhem průsečné křižovatky připomínající tvar kruhového objezdu.



Obrázek 6.4: Návrh simulovaného experimentálního dopravního uzlu č.4. Jedná se o stykovou křižovatku.

6.2 Provedené experimenty a dosažené výsledky

Cílem provedených experimentů bylo prokázat vhodnost použitých indikátorů dopravních konfliktů na daný typ dopravního uzlu a jakým způsobem ovlivňuje implementované rozšíření predikce pohybu vozidel ve scéně pomocí Ackermanova modelu zatáčení výskytu preemtivně detekovaných dopravních konfliktů. V této kapitole budou postupně analyzovány jednotlivé dopravní uzly z hlediska výskytů detekovaných dopravních konfliktů.

U každé z bezpečnostních analýz je uvedena tabulka zobrazující četnost výskytu dopravních konfliktů detekovaných pomocí daného indikátoru dopravních konfliktů. U preemtivního indikátoru času do kolize je v závorce jako první parametr uveden způsob predikce pohybu objektu ve scéně (\vec{v} - vektor rychlosti, Ack - predikce pohybu pomocí Ackermanova modelu zatáčení) a jako druhý parametr je uvedeno použití zrychlení při výpočtu predikované pozice vozidla (A - predikce se zrychlením, $!A$ - predikce bez zrychlení). Četnost podprahových hodnot indikátoru

času do kolize je uvedena pouze pro nejhorší případy dosahující nejnižší hodnotu toho indikátoru mezi dvěma objekty ve scéně.

Detekované dopravní konflikty byly následně vztaženy k dopravním konfliktům vyhodnocených ve spolupráci s Ústavem soudního inženýrství Vysokého učení technického v Brně na základě studie videozáznamu, ze kterého byla prostorově-temporální data zpracováním obrazových informací získána. Tento přístup pro vyhodnocení úspěšnosti vytvořeného systému byl zvolen z důvodu nedostupných nebo neexistujících informací o dopravních nehodách v analyzovaných dopravních uzlech. Tabulka 6.2 ukazuje četnost výskytu dopravních konfliktů dané kategorie v analyzovaných videozáznamech a simulovaných datech.

Č. záznamu	Dopravní konflikt		
	Lehký	Středně vážný	Vážný
1	13	1	0
2	31	15	0
3	34	12	1
4	0	0	0

Tabulka 6.2: Tabulka zobrazující četnost výskytu dopravního konfliktu dané kategorie v analyzovaných videozáznamech.

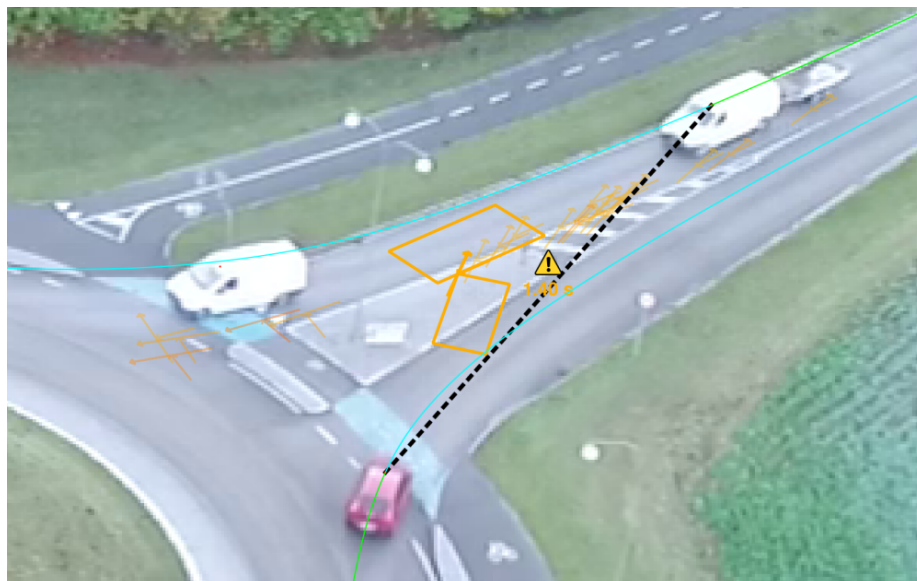
6.2.1 Bezpečnostní analýza dopravního uzlu č.1

Dopravní uzel č. 1 je možno vidět na obrázku 6.1. Jedná se o kruhový objezd mající čtyři výjezdy včetně stezek pro cyklisty ve všech směrech. Informace o dopravním uzlu jsou uvedeny v tabulce 6.1 (1. řádek). Tabulka 6.3 zobrazuje výsledky detekcí dopravních konfliktů v tomto dopravním uzlu.

	Časový interval					
	<3 s, 2,5 s)	<2,5 s, 2 s)	<2 s, 1,5 s)	<1,5 s, 1 s)	<1 s, 0,5 s)	<0,5 s, 0 s)
TTC (\bar{v}, IA)	72	115	147	22	2	2
TTC (\bar{v}, A)	69	106	138	39	2	2
TTC (Ack, IA)	64	81	31	1	0	0
TTC (Ack, A)	92	94	26	3	0	0
PET	0	0	0	0	0	0

Tabulka 6.3: Tabulka zobrazující četnost výskytu dopravních konfliktů detekovaných v dopravním uzlu č.1 dle indikátorů TTC a PET.

Z výsledných hodnot je možné pozorovat několik poznatků. Ve všech případech stanoveného časového prahu je četnost dopravních konfliktů detekovaných pomocí indikátoru času do kolize s použitím predikce pohybu objektů ve scéně dle Ackermanova modelu zatáčení vozidla v některých případech řádově menší než při použití predikce pohybu založené na vektoru rychlosti, kterou standardní varianta indikátoru času do kolize využívá. V případě kruhového objezdu se jedná o pozitivní dopad v podobě odfiltrování falešně pozitivních detekcí dopravních konfliktů, které vznikají při opouštění kruhového objezdu vozidlem s protijedoucími vozidly. Tyto případy je možné pozorovat na obrázku 6.5. Důvodem ke vzniku těchto konfliktů je neznalost kontextu tvaru dopravního uzlu v místě jeho vzniku. Tyto případy by taktéž bylo možné eliminovat stanovením dodatečných podmínek při detekci dopravních konfliktů, které by zohledňovaly tvar



Obrázek 6.5: Obrázek experimentálního dopravního uzlu č.1. Na obrázku jsou zobrazeny případy falešných detekcí dopravních konfliktů detekovaných pomocí indikátoru času do kolize způsobených při výjezdu a nájezdu na kruhový objezd.

dopravního uzlu. Se zachováním obecnosti použití vytvořeného systému bylo dosaženo shodného výsledku s použitím predikce pohybu pomocí Ackermanova modelu zatáčení vozidla, který lépe vystihuje chování jednostopých a dvoustopých vozidel ve scéně a zároveň zohledňuje tvar kruhového objezdu.

Dalším zajímavým poznatkem je nulový výskyt dopravních konfliktů detekovatelných pomocí indikátoru PET v žádném ze stanovených prahů, což také vypovídá o vhodnosti jeho použití, které je zaměřeno spíše na dopravní uzly ve tvaru průsečných křižovatek. Události blízké dopravním nehodám, které indikátor PET ohodnocuje, vznikají často při vzájemném téměř kolmém úhlu směru pohybu dvou přibližujících se objektů ve scéně.

Pokud bychom detekované dopravní konflikty dali do souvislosti s dopravními konflikty uvedenými v tabulce 6.3 vztahující se k tomuto dopravnímu uzlu, pak se klasifikovaným dopravním konfliktům nejvíce blíží analýza dopravních konfliktů se vstupními parametry TTC (Ack, A) v časovém intervalu $< 2\text{ s}, 0,5\text{ s}$.

6.2.2 Bezpečnostní analýza dopravního uzlu č.2

Dopravní uzel č. 2 je zobrazen na obrázku 6.2. Jedná se o průsečnou křižovátku se čtyřmi hlavními proudy v každém směru a ostrůvkem uprostřed. Informace o dopravním uzlu jsou uvedeny v tabulce 6.1. Výsledky detekcí dopravních konfliktů v tomto dopravním uzlu jsou zobrazeny v tabulce 6.4 (2. řádek). Výsledky četností dopravních konfliktů detekovaných v tomto dopravním uzlu dle proximálních indikátorů bezpečnosti TTC a PET jsou uvedeny v tabulce 6.4.

Ve výsledcích je vhodné poukázat na výskyt dopravních konfliktů detekovaných pomocí indikátoru PET , které se v dopravním uzlu č. 1 nevyskytovali. Z detekovaných dopravních konfliktů vyplývá vhodnost použití indikátoru PET v případě výskytu křížících se trajektorií ve scéně.

Při srovnání výskytů dopravních konfliktů v tabulce 6.2 s dopravními konflikty detekovanými v tomto uzlu je dané kategorizaci nejvíce podobný interval $< 2\text{ s}, 0,5\text{ s}$ při parametrech analýzy TTC (\vec{v}, A).



Obrázek 6.6: Obrázek experimentálního dopravního uzlu č.2. Na obrázku jsou zobrazeny případy detekcí dopravních konfliktů detekovaných pomocí indikátoru PET. Z obrázku vyplývá vhodnost použití tohoto indikátoru pro dopravní uzly, ve kterých dochází ke křížení trajektorií mezi objekty ve scéně.

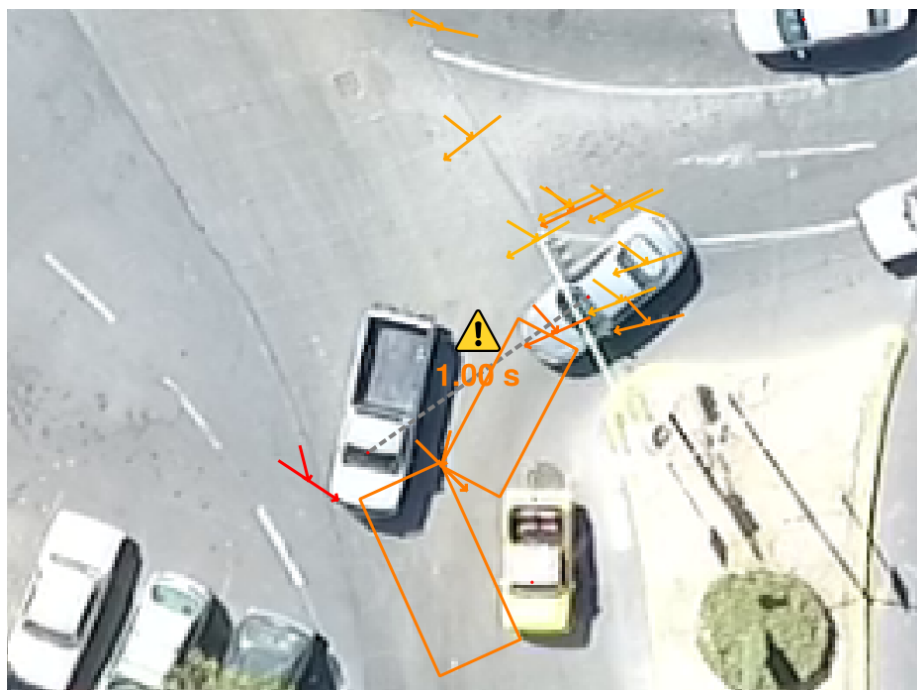
	Časový interval					
	<3 s, 2,5 s)	<2,5 s, 2 s)	<2 s, 1,5 s)	<1,5 s, 1 s)	<1 s, 0,5 s)	<0,5 s, 0 s)
TTC ($\vec{v},!A$)	90	47	42	31	1	1
TTC (\vec{v},A)	102	59	32	9	2	0
TTC (Ack,!A)	163	91	80	43	2	1
TTC (Ack,A)	218	135	79	29	4	0
PET	7	4	4	2	0	0

Tabulka 6.4: Tabulka zobrazující četnost výskytu dopravních konfliktů detekovaných v dopravním uzlu č.2 dle indikátorů TTC a PET.

6.2.3 Bezpečnostní analýza dopravního uzlu č.3

Další dopravní uzel, na kterém byl testován vytvořený systém pro detekci dopravních konfliktů, je zobrazen na obrázku 6.3. Na první pohled připomíná tento dopravní uzel kruhový objezd. Jedná se ovšem o průsečnou jednosměrnou křižovatku, ve kterém dva hlavní dopravní proudy míjí středový kruhový ostrůvek. Informace o záznamu prostorově-temporálních dat vztahující se k tomuto dopravnímu uzlu jsou v tabulce 6.1 (3. řádek). Množství detekovaných dopravních konfliktů v tomto dopravním uzlu popisuje tabulka 6.5.

Na základě získaných výsledků je vhodné zmínit případ častého výskytu dopravních konfliktů detekovaných pomocí indikátoru času do kolize v části křižovatky, kde dochází k odbočování účastníků silničního provozu doleva. V křižovatce se nevyskytuje odbočovací pruh doleva což má za důsledek vyšší četnost vzniklých dopravních konfliktů.



Obrázek 6.7: Obrázek experimentálního dopravního uzlu č.3. Na obrázku jsou zobrazeny případy detekcí dopravních konfliktů detekovaných pomocí indikátoru TTC. Detekované dopravní konfliktů indikují častý výskyt konfliktních situací v této oblasti dopravního uzlu.

Při porovnání získaných výsledků s výsledky uvedenými v tabulce 6.2 se uvedené kategorizaci závažnosti dopravních konfliktů nejvíce přibližují výsledky bezpečnostní analýzy se vstupními parametry $TTC (Ack,A)$ v časovém intervalu $< 2 s, 0,5 s$.

	Časový interval					
	<3 s, 2,5 s)	<2,5 s, 2 s)	<2 s, 1,5 s)	<1,5 s, 1 s)	<1 s, 0,5 s)	<0,5 s, 0 s)
TTC (\bar{v},IA)	77	55	55	14	5	0
TTC (\bar{v},A)	86	55	27	6	1	0
TTC (Ack,IA)	163	111	92	32	6	0
TTC (Ack,A)	154	112	31	14	1	0
PET	1	1	1	0	0	0

Tabulka 6.5: Tabulka zobrazující četnost výskytu dopravních konfliktů detekovaných v dopravním uzlu č.3 dle indikátorů TTC a PET.

6.2.4 Bezpečnostní analýza dopravního uzlu č.4

Posledním analyzovaným dopravním uzlem je styčná křižovatka, jejíž návrh je ilustrován na obrázku 6.4. Informace o simulovaných prostorově-temporálních datech vztahující se k tomuto dopravnímu uzlu jsou v tabulce 6.1 (4. řádek). Tabulka 6.6 zobrazuje výsledky detekcí dopravních konfliktů v tomto dopravním uzlu.

Důvod pro bezpečnostní analýzu simulovaných prostorově-temporálních dat je analýza chování detekčního systému na „bezchybná“ data. Lze předpokládat, že se v simulovaném dopravním provozu bude vyskytovat menší počet dopravních konfliktů než v dopravním provozu reál-

ném, a to díky absenci šumu ve vstupních datech a „nekonfliktnímu“ chování účastníků silničního provozu. Uvedený předpoklad lze potvrdit na základě množství detekovaných dopravních konfliktů, které je ve všech časových intervalech řádově nižší než v předchozích případech dopravních uzlů, kde byla bezpečnostní analýza založena na reálných datech.

Dle tabulky 2 nebyl v simulovaných datech nalezen žádný dopravní konflikt. Spojitost s tímto faktem lze nalézt ve výsledcích bezpečnostní analýzy se vstupními parametry *TTC (Ack,A)* v časovém intervalu $< 2\text{ s}, 0,5\text{ s}$.

	Časový interval					
	<3 s, 2,5 s)	<2,5 s, 2 s)	<2 s, 1,5 s)	<1,5 s, 1 s)	<1 s, 0,5 s)	<0,5 s, 0 s)
TTC (v̄,I,A)	34	15	11	3	0	0
TTC (v̄,A)	31	13	8	1	0	0
TTC (Ack,I,A)	18	12	1	0	0	0
TTC (Ack,A)	14	11	0	0	0	0
PET	2	1	0	0	0	0

Tabulka 6.6: Tabulka zobrazující četnost výskytu dopravních konfliktů detekovaných v dopravním uzlu č.4 dle indikátorů *TTC* a *PET*.

6.3 Výpočetní náročnost detekce dopravních konfliktů

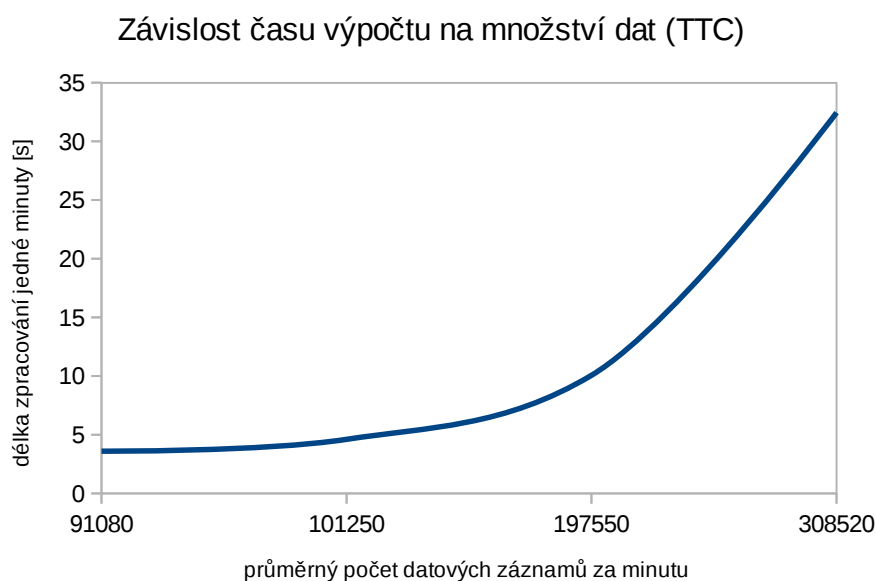
Spolu s provedenými experimenty týkající se samotné bezpečnostní analýzy vybraných dopravních uzlů, které jsou popsány v následující kapitole, je vhodné uvést také výpočetní časovou náročnost při zpracování prostorově-temporálních dat. Optimalizační kroky vedoucí ke snížení výpočetního času jsou uvedeny v kapitole 5.4. Výpočty byly provedeny na procesoru *Intel Core i7-8550U* se čtyřmi výpočetními jádry, který je schopen paralelního výpočtu v osmi vláknech. Časová výpočetní náročnost pro jednotlivé datové sady popsané v kapitole 6.1 jsou uvedeny v tabulce 6.7. Výsledné hodnoty byly změřeny na implementaci systému pro detekci dopravních konfliktů, který využívá přístup k prostorově-temporálním datům skrze interní rozhraní aplikace *DataFromSky Viewer*. Informace o pohybu (rychlost, zrychlení, směr pohybu, atd.) objektu ve scéně jsou v této implementaci vypočítány na základě informací získaných z trajektorií. Tyto informace nejsou součástí prostorově-temporálních dat, jak je tomu například v implementaci využívající vstupní data ve formátu *CSV* popsané v kapitole 5.3. Časová náročnost výpočtu při detekci dopravních konfliktů využívající shodná vstupní data ve formátu *CSV* je pro srovnání ve zmíněné tabulce také uvedena.

Je-li brána v potaz délka pořízeného záznamu, frekvence výskytu prostorově-temporálních dat a průměrný počet trajektorií za minutu, pak je možné vyjádřit závislost časové délky výpočtu jedné minuty záznamu prostorově-temporálních dat na průměrném počtu datových záznamů ve vstupních datech. Příklad takové závislosti je možné vidět na obrázku 6.8, kde je vycházeno z hodnot vztahujících se ke vstupnímu formátu *DFS* a druhu výpočtu s označením *TTC (2s, Ack)* uvedených v tabulce 6.7.

Na základě uvedených výsledků lze pozorovat, že detekce dopravních konfliktů je možné provádět v reálném čase na průměrném procesoru. Výpočetní náročnost bezpečnostní analýzy je závislá na hustotě dopravy v daném čase (množství objektů vyskytujících se zároveň ve scéně), délce analyzovaného záznamu a frekvenci výskytu prostorově-temporálních dat za sekundu. Při srovnání formátu vstupních prostorově-temporálních dat je možné konstatovat, že data ve formátu *CSV* uvedeném v kapitole 5.3 urychlují výpočet v průměru o 37% oproti formátu určenému pro aplikaci *DataFromSky Viewer*. Důvodem tohoto rozdílu jsou již předpočítané, nebo

	Délka záznamu	Počet trajektorií	Formát dat	TTC (2s, \vec{v})	TTC (2s, Ack)	PET
1	15 min 38 s	298	DFS	4,2 s	4,9 s	2,9 s
			CSV	2 s	2,8 s	1,2 s
2	7 min 29 s	988	DFS	70 s	75,5 s	80,1 s
			CSV	42,9 s	51,4 s	62,9 s
3	13 min 59 s	708	DFS	98,6 s	101,6 s	16,5 s
			CSV	70,3 s	70,6 s	13,3 s
4	9 min 20 s	800	DFS	268 s	302,8 s	61,1 s
			CSV	191,4 s	212,8 s	44 s
5	8 min 2 s	540	DFS	36 s	36,9 s	23,6 s
			CSV	27,5 s	26,4 s	14,6 s

Tabulka 6.7: Tabulka zobrazující výpočetní časovou náročnost při detekci dopravních konfliktů typu TTC a PET v různých záznamech prostorově-temporálních dat. Měření bylo provedeno pro vstupní data ve formátu CSV a formátu využívající aplikace DataFromSky Viewer. Při výpočtu hodnot indikátoru TTC bylo použito nastavení délky simulace pohybu objektů ve scéně 2s s použitím predikce pohybu založené na vektoru rychlosti (označení \vec{v}) a Ackermanova modelu zatáčení vozidla (označení *Ack*).



Obrázek 6.8: Graf zobrazuje závislost časové délky výpočtu při zpracování jedné minuty záznamu prostorově-temporálních dat na průměrném počtu datových záznamů za minutu vyskytujících se ve vstupních datech.

jiným způsobem získané, informace o pohybu objektu ve scéně, které jsou v případě formátu CSV součástí prostorově-temporálních dat.

6.4 Zhodnocení funkčnosti implementovaného systému

V rámci této práce byl proveden návrh systému pro detekci dopravních konfliktů v prostorově-temporálních datech (kapitola 4), který byl následně programově realizován (kapitola 5). Implementace systému spočívala ve vytvoření programového rozhraní, které umožňuje provádět samotnou detekci dopravních konfliktů, ladící aplikace, která zmíněné rozhraní využívá, a následné integrace vytvořeného rozhraní pro detekci dopravních konfliktů do aplikace DataFrom-Sky Viewer, ve které lze detekované dopravní konflikty přehledně vizualizovat v zobrazené scéně (kapitola 5.5). Takto se podařilo vytvořit nástroj pro bezpečnostní analýzu, který mohou využívat dopravní experti a analytici bezpečnosti v dopravě a který umožňuje hlubší pochopení vzniklých dopravních situací mezi účastníky silničního provozu v analyzovaném dopravním uzlu.

Oproti standardnímu přístupu pro výpočet hodnot indikátorů dopravních konfliktů bylo využito simulace pohybu účastníků silničního provozu, díky které je možné vytvářet různé scénáře dalšího vývoje dopravních situací. Při hledání vztahu mezi dopravními konflikty vnímanými dopravním expertem a dopravními konflikty detekovanými vytvořeným systémem byl na základě provedených experimentů zjištěn pozitivní dopad použité predikce pohybu účastníků silničního provozu podle Ackermanova modelu zatáčení vozidla, díky které detekované dopravní konflikty více odpovídali zkušenostem dopravního experta. Je ovšem nutné podotknout, že při analýze videí dopravním expertem chyběla zvuková stopa videozáznamu, která může ovlivnit subjektivní pojetí dopravního konfliktu kvůli absenci zvukových signálů s ním spojených, a také, že pohled z ptáčích perspektivy není zcela standardní.

Kapitola 7

Závěr

Tato diplomová práce se zabývala problematikou bezpečnostní analýzy dopravního chování účastníků silničního provozu na základě zpracování prostorově-temporálních dat získaných z leteckých videí pořízených drony.

Na základě metodiky sledování a vyhodnocování dopravních konfliktů bylo zjištěno, že pro bezpečnostní analýzu chování účastníků dopravního uzlu jsou dobrým nástrojem indikátory dopravních konfliktů, které lze použít při zpracování trajektorií pohybu jednotlivých účastníků silničního provozu. Pro stanovení požadavků na přesnost naměřených časoprostorových dat byla provedena citlivostní analýza vstupních parametrů pro detekci dopravních konfliktů. Dále byl navržen systém pro detekci dopravních konfliktů a následně provedena jeho programová realizace. Dopravní konflikty jsou v prostorově-temporálních datech detekovány pomocí hodnot indikátorů dopravních konfliktů času po průjezdu (PET) a času do kolize (TTC), který byl navíc oproti standardní variantě rozšířen o predikci pohybu vozidla pomocí Ackermanova modelu zatáčení automobilu. Společně s implementovaným systémem bylo rozhraní pro detekci dopravních konfliktů integrováno do aplikace DataFromSky Viewer, díky které je možné dopravní konflikty přehledně vizualizovat. Systém byl otestován na vybraných reálných a simulovaných prostorově-temporálních datech. Na základě provedených experimentů bylo zjištěno, že predikce pohybu objektů ve scéně založená na Ackermanovu modelu zatáčení vozidla umožňuje věrohodnější detekci dopravních konfliktů v prostorově-temporálních datech.

Na základě poměrně velkého množství existujících studií zabývajících se podobnou problematikou lze konstatovat, že bezpečnost v dopravě a zejména její analýza a vyhodnocení je živým tématem a stále vyžaduje pozornost dopravních expertů a analytiků bezpečnosti v dopravě. Díky pokroku informačních technologií, které dovolují efektivní získávání velkého množství informací prostorově-temporálních dat o účastnících silničního provozu z různých zdrojů, se dostává do popředí proaktivní přístup k bezpečnostní analýze v dopravě, který i přes svoji občas zavádějící objektivitu dosahuje zajímavých výsledků v krátkém časovém horizontu.

Cílem práce bylo přinést nový pohled na bezpečnostní analýzu v dopravě. I přes dosažené zajímavé výsledky je zde prostor pro možná vylepšení, která by mohla být realizována například v podobě pokročilejší simulace chování řidiče v dopravně konfliktní situaci, který by zohledňoval rozhledové úhly, okolní teplotu nebo dynamické vlastnosti vozidla. Dále by mohly být implementovány další proximální indikátory, které by vzniklé dopravní situace uvedly do širšího kontextu, nebo stanovení omezujících podmínek týkající se daného dopravního uzlu, které by eliminovaly vznik falešně pozitivních dopravních konfliktů.

Tato práce byla prezentována v podobě plakátu na studentské konferenci EXCEL@FIT2018¹, kde získala ocenění odborným panelem za přínos v oblasti bezpečnosti silničního provozu, ocenění společnosti ŠKODA AUTO a.s. za přínos v oblasti autonomního řízení a *smart city* na základě informací získaných z okolního prostředí pro zvýšení bezpečnosti v dopravě a ocenění odborné veřejnosti².

¹<http://excel.fit.vutbr.cz/>

²Cena Jiřího Kunovského.

Literatura

- [1] Apeltauer, J.; Babinec, A.; Herman, D.; aj.: Automatic Vehicle Trajectory Extraction for Traffic Analysis from Aerial Video Data. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Březen 2015: s. 9–15.
- [2] Archer, J.: *Indicators for traffic safety assessment and prediction and their application in micro-simulation modelling: a study of urban and suburban intersections*. Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology, 2005, ISBN 91-7323-119-3.
- [3] Autey, J.; Sayed, T.; Zaki, M. H.: Safety evaluation of right-turn smart channels using automated traffic conflict analysis. *Accident Analysis and Prevention*, ročník 45, č. Supplement C, 2012: s. 120 – 130, ISSN 0001-4575.
- [4] Bared, J.: Surrogate Safety Assessment Model (SSAM). In *Surrogate Safety Assessment Model and Validation: Final Report, FHWA-HRT-08-051*, 2008.
- [5] Cherepanov, A.: Qt-CSV - Library for reading and writing csv-files in Qt. 2018, [Online]. URL <https://github.com/iamantony/qtcsv>
- [6] DataFromSky - Advanced traffic analysis of aerial video data. 2018, [Online]. URL www.datafromsky.com
- [7] Diverging Diamond Interchange: Lessons Learned. May 2010, [Online]. URL <https://library.modot.mo.gov/rdt/reports/unnumbrd/or10021rpt.pdf>
- [8] Dopravní nehody – rok 2017. Leden 2018, [Online]. URL https://www.cspsd.cz/storage/files/nehody_2017.pdf
- [9] Elefteriadou, L.: *An Introduction to Traffic Flow Theory (Springer Optimization and Its Applications)*. Springer, 2013, ISBN 1461484340.
- [10] Ericson, C.: *Real-Time Collision Detection (The Morgan Kaufmann Series in Interactive 3-D Technology)*. CRC Press, 2004, ISBN 1558607323.
- [11] Gperftools - originally Google Performance Tools. Leden 2017, [Online]. URL <https://github.com/gperftools/gperftools/wiki>
- [12] Heesch, D.: Doxygen - Generate documentation from source code. Květen 2018, [Online]. URL <http://www.stack.nl/~dimitri/doxygen/>
- [13] ISO: *ISO/IEC 14882:2011 Information technology — Programming languages — C++*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, Únor 2012, 1338 (est.) s.

- [14] Laureshyn, A.: Surrogate measures in traffic safety analysis. 2017, [Online].
URL http://www.tft.lth.se/fileadmin/tft/NTSA/Seminar_2017/20170509_Laureshyn.pdf
- [15] Leuer, D.: A Study of the Traffic Safety at Roundabouts in Minnesota. October 2017, [Online].
URL <https://www.dot.state.mn.us/trafficeng/safety/docs/roundaboutstudy.pdf>
- [16] Lu, G.; Liu, M.; Wang, Y.; aj.: Quantifying the Severity of Traffic Conflict by Assuming Moving Elements as Rectangles at Intersection. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, ročník 43, č. Supplement C, 2012: s. 255 – 264, ISSN 1877-0428, 8th International Conference on Traffic and Transportation Studies (ICTTS 2012).
- [17] Mahmud, S. S.; Ferreira, L.; Hoque, M. S.; aj.: Application of proximal surrogate indicators for safety evaluation: A review of recent developments and research needs. *LATSS Research*, ročník 41, č. 4, 2017: s. 153 – 163, ISSN 0386-1112.
- [18] Meel, I. P.; Vesper, A.; Borsos, A.; aj.: Evaluation of the effects of auxiliary lanes on road traffic safety at downstream of U-turns. *Transportation Research Procedia*, ročník 25, 2017: s. 1931 – 1945, ISSN 2352-1465, world Conference on Transport Research - WCTR 2016 Shanghai. 10-15 July 2016.
- [19] OpenCV - Open Source Computer Vision. 2018, [Online].
URL <https://docs.opencv.org/3.3.1/>
- [20] OpenMP Architecture Review Board: OpenMP Application Program Interface Version 4.5. 2015, [Online].
URL <http://www.openmp.org/wp-content/uploads/openmp-4.5.pdf>
- [21] Organization, W. H.: *Global Status Report on Road Safety 2015*. World Health Organization, 2016, ISBN 9241565063.
- [22] Osipychiev, D.; Tran, D.; Sheng, W.; aj.: Human intention-based collision avoidance for autonomous cars. In *2017 American Control Conference (ACC)*, May 2017, s. 2974–2979, doi:10.23919/ACC.2017.7963403.
- [23] Qt Creator Manual. 2018, [Online].
URL <http://doc.qt.io/qtcreator/index.html>
- [24] Qt Documentation. 2018, [Online].
URL <https://doc.qt.io/qt-5.10/>
- [25] Saunier, N.: Automated Methods for Surrogate Safety Analysis. 2014, [Online].
URL <http://n.saunier.free.fr/saunier/stock/14-08-25-dcdot.pdf>
- [26] Shafranovich, Y.: Common Format and MIME Type for Comma-Separated Values (CSV) Files. 2005, [Online].
URL <https://tools.ietf.org/html/rfc4180>
- [27] SUMO - Simulation of Urban MObility. 2018, [Online].
URL <http://sumo.dlr.de/index.html>

- [28] Tiwari, G.; Mohan, D.; Fazio, J.: Conflict analysis for prediction of fatal crash locations in mixed traffic streams. *Accident Analysis and Prevention*, ročník 30, č. 2, 1998: s. 207 – 215, ISSN 0001-4575.
- [29] Weinstein, A. J.; Moore, K. L.: Pose estimation of Ackerman steering vehicles for outdoors autonomous navigation. In *2010 IEEE International Conference on Industrial Technology*, March 2010, s. 579–584, doi:10.1109/ICIT.2010.5472738.

Přílohy

Seznam příloh

A Obsah přiloženého DVD disku	58
B Plakát Excel@FIT2018	59

Příloha A

Obsah příloženého DVD disku

- /app/ - spustitelné binární soubory (Windows 64-bit)
- /app_src/ - zdrojové soubory programové realizace
- /doc/ - programová dokumentace vygenerovaná pomocí nástroje *Doxygen*
- /multimedia/ - multimedální soubory (plakát, video, ...)
- /test_data/ - data použitá při experimentování
- /thesis/ - vyexportované soubory sázecím systémem \LaTeX
- /thesis_src/ - zdrojové soubory této práce pro sázecí systém \LaTeX
- /readme.txt - návod na spuštění aplikace

Příloha B

Plakát Excel@FIT2018



Obrázek B.1: Plakát použitý při prezentaci práce na studentské konferenci inovací, technologií a vědy v IT - Excel@FIT2018.