



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV POČÍTAČOVÝCH SYSTÉMŮ

DEPARTMENT OF COMPUTER SYSTEMS

**ŘÍZENÍ AUTOMOBILŮ S INTELIGENTNÍM
ADAPTIVNÍM TEMPOMATEM**

INTELLIGENT ADAPTIVE CRUISE CONTROL OF CARS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

TOMÁŠ SMÄDO

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JOSEF STRNADEL, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce



Student: **Smádo Tomáš**
Program: Informační technologie
Název: **Řízení automobilů s inteligentním adaptivním tempomatem**
Intelligent Adaptive Cruise Control of Cars
Kategorie: Modelování a simulace

Zadání:

1. Nastudujte pojmy a principy související s činností inteligentního adaptivního tempomatu (iACC) v automobilech a proveďte rešerši v oblasti prostředků modelování systémů a analýzu jejich vlastností.
2. Navrhněte vhodnou abstrakci automobilu, jeho okolí a komponent klíčových z pohledu iACC. Zvolte prostředky vhodné pro modelování a analýzu řízení a chování vozidla.
3. Pomocí prostředků zvolených v předchozím bodě vytvořte model chování vozidla a jeho řízení i) bez iACC a poté ii) na bázi iACC s cílem sledovat děje klíčové pro řízení a jejich vliv na chování vozidla.
4. Funkčnost modelu demonstруйте v několika vhodně zvolených situacích za účelem vzájemného porovnání řízení a chování vozidla bez iACC a vozidla s iACC.
5. Diskutujte a zhodnoťte možnosti vytvořeného modelu z hlediska sledování dějů a analýzy vlivů zmíněných v bodu 3.
6. Navrhněte možné směry dalšího vývoje vytvořeného modelu.

Literatura:

- Dle pokynů vedoucího.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování práce viz <https://www.fit.vut.cz/study/theses/>

Vedoucí práce: **Strnadel Josef, Ing., Ph.D.**
Vedoucí ústavu: Sekanina Lukáš, prof. Ing., Ph.D.
Datum zadání: 1. listopadu 2021
Datum odevzdání: 11. května 2022
Datum schválení: 29. října 2021

Abstrakt

Cielom tejto bakalárskej práce je vytvorenie modelu inteligentného adaptívneho tempomatu a prostredia, v ktorom môžeme jeho schopnosti demonštrovať. Práca najprv popisuje problematiku fungovania jednotlivých druhov tempomatov a senzorov s nimi spojených. Ďalej sa venuje modelovaniu systémov a realizačným prostriedkom s tým spojených. V práci je potom popísaný návrh takéhoto modelu a jeho implementácia. Pre implementáciu bol zvolený modelovací nástroj UPPAAL Stratego. Pomocou nástroja je model realizovaný ako sieť časovaných automatov. Výsledkom implementácie je model adaptívneho tempomatu s možnosťou zapínania jeho inteligentnej nadstavby a taktiež okolie, v ktorom je daný model testovaný. Na základe dotazov do verifikátora zvoleného nástroja je potom overená požadovaná funkcionálnosť tempomatu a porovnávaná jeho základná funkcionálnosť s inteligentnou nadstavbou.

Abstract

The aim of the bachelor's thesis is to create a model of intelligent adaptive cruise control system and its surroundings, in which it is possible to demonstrate its abilities. First, in this thesis we will describe the various types of cruise controls and their sensors. Then we will discuss system modeling fundamentals and utilities for creating such models. Later, in third chapter, we will describe our model design and its implementation. We selected UPPAAL Stratego modeling tool for our implementation. The model in it is created as a network of timed automata. The result of this implementation will be a model of a car with adaptive cruise control with the possibility of switching on this intelligent module and an environment, in which our model will be tested. The model will be tested in the verifier in various scenarios to compare the basic adaptive cruise control functionality with the intelligent cruise control functionality.

Klíčové slová

inteligentný adaptívny tempomat, UPPAAL Stratego, model, simulácia, časované automaty, štatistické overovanie modelu

Keywords

intelligent adaptive cruise control, UPPAAL Stratego, model, simulation, timed automata, statistical model checking

Citácia

SMĀDO, Tomáš. *Řízení automobilů s inteligentním adaptivním tempomatem*. Brno, 2022. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Josef Strnadel, Ph.D.

Řízení automobilů s inteligentním adaptivním tempomatem

Prehlásenie

Prehlasujem, že som svoju bakalársku prácu vypracoval samostatne pod dohľadom a vedením pána Ing. Josefa Strnadela, Ph.D. Uviedol som všetky literárne pramene, publikácie a ďalšie zdroje, z ktorých som pri písaní práce čerpal.

.....
Tomáš Smädo
18. mája 2022

Podakovanie

Veľmi pekne ďakujem vedúcemu Ing. Josef Strnadel, Ph.D. za pedagogickú a odbornú pomoc, trpezlivosť a cenné rady pri tvorbe bakalárskej práce.

Obsah

1	Úvod	3
2	Rešerš k zadanej téme	4
2.1	Bežný tempomat	4
2.2	Adaptívny tempomat — ACC	4
2.3	Nedostatky ACC	5
2.4	Inteligentný adaptívny tempomat — i-ACC	6
2.4.1	Princíp fungovania i-AAC	7
2.4.2	Predikcia na základe kontextu	7
2.4.3	Fyzická predikcia	7
2.4.4	Rozhodnutie a akcia	8
2.5	Druhy senzorov	8
2.5.1	Radar	9
2.5.2	Lidar	9
2.5.3	Kamera	10
2.5.4	Ultrazvukové senzory	11
3	Rozbor problematiky a realizačných prostriedkov	12
3.1	Modelovanie systémov	12
3.1.1	Terminológia	12
3.2	Realizačné prostriedky	13
3.2.1	Simulink	13
3.2.2	SIMLIB	14
3.2.3	UPPAAL	14
3.2.4	UPPAAL SMC	17
3.2.5	UPPAAL Stratego	19
3.3	Popis abstraktného modelu	19
3.3.1	Požiadavky	20
3.3.2	Abstrakcia nášho vozidla	20
3.3.3	Popis vozovky	21
3.3.4	Popis okolitých vozidiel	21
3.3.5	Popis použitých jednotiek	22
3.3.6	Vyhodnocovanie relatívnych vzdialeností a pozícií	22
4	Implementácia navrhnutého modelu	23
4.1	Dátové štruktúry a konštanty	23
4.1.1	Object	23
4.1.2	Position	23

4.1.3	Lane	24
4.1.4	Konštanty modelu	24
4.2	Popis šablón modelu	25
4.2.1	Hlavný kontrolný cyklus	25
4.2.2	Ovládanie nášho vozidla	27
4.2.3	Logika ACC	28
4.2.4	Logika i-ACC	29
5	Overenie vlastností modelu	31
5.1	Funkcia ACC	31
5.2	Porovnanie systémov ACC a i-ACC	31
5.3	Vplyv zmeny odozvy senzorov na fungovanie i-ACC	33
5.4	Porovnanie dodržania minimálnych vzdialeností	34
5.5	Zhrnutie výsledkov	34
6	Záver	36
	Literatúra	37

Kapitola 1

Úvod

V súčasnej dobe je automobilový priemysel jeden z najrozvinutejších na trhu. Jazdenie automobilom sa rokmi stalo každodennou súčasťou života mnohých ľudí. Nakoľko je to pre veľa osôb náročná činnosť, snažili sa ju inžinieri zákazníkom čo najviac uľahčiť. Jedným z takýchto komfortných prvkov je aj tempomat, ktorý zjednodušuje riadenie vozidiel na dlhých trasách už niekoľko desaťročí. Čoraz viac sa ale pri automobiloch prihliada aj na bezpečnosť a tento trend neobišiel ani tempomaty. Dnes už poznáme rôzne adaptívne tempomaty, ktoré sú bezpečnejším variantom pôvodných systémov, avšak ani ich funkcionálnosť nie je stopercentná. Preto sa čoraz viac do popredia dostávajú rôzne formy inteligentných adaptívnych tempomatov, ktoré bezpečnosť posúvajú opäť o stupienok vyššie.

Inteligentný adaptívny tempomat je akýsi posledný medzikrok k autonómnym vozidlám. Spája v sebe výhody klasického adaptívneho tempomatu so senzormi, ktoré rozširujú jeho zorné pole a umožňujú mu lepšie analyzovať dopravnú situáciu za účelom vyššej bezpečnosti a jazdného komfortu. Vďaka týmto senzorum dokáže vyhodnocovať okolnosti cestnej premávky podobne ako človek a predvídať určité javy, ktoré môžu na ceste nastať.

Táto bakalárska práca sa zameriava na vytvorenie modelu vozidla, ktoré disponuje inteligentným adaptívnym tempomatom. Súčasťou modelu je taktiež prostredie, v ktorom sa toto vozidlo bude pohybovať za účelom overenia požadovaných vlastností. Primárnou úlohou bude konfrontovanie s bežným adaptívnym tempomatom a analýza výhod a nevýhod jeho využívania.

Kapitola 2 obsahuje rešerš ohľadom existujúcich riešení tempomatov a senzorov spojených s ich fungovaním. V kapitole 3 sú popísané základné pojmy spájajúce sa s problematikou modelovania systémov, realizačné prostriedky a taktiež popis abstraktného modelu. Kapitola 4 popisuje implementáciu vytvoreného modelu, ktorého vlastnosti sú potom v kapitole 5 testované.

Kapitola 2

Rešerš k zadanej téme

Táto kapitola poskytuje základné informácie o fungovaní jednotlivých druhov tempomatov, ich rozdiely a prípadné výhody a nevýhody. Ďalej sa venuje hlavne existujúcim riešeniam inteligentých adaptívnych tempomatov a ich spôsobu fungovania. Na záver popisuje jednotlivé druhy senzorov používaných v tempomatoch a porovnáva ich výhody, nevýhody a spôsoby využitia v popisovaných systémoch.

2.1 Bežný tempomat

Tempomat je zariadenie slúžiace k udržiavaniu konštantnej rýchlosti vozidla. Začiatok nasadzovania v automobiloch siaha do polovice minulého storočia a bol vyvinutý pre používanie hlavne na diaľniciach, teda cestách, ktoré sú široké, majú viacero pruhov a nemajú ostré zákruty. Fungovanie tempomatu ovláda riadiaca jednotka, ktorá na základe rýchlosti reguluje škrtiacu klapku motora, čím pridáva alebo uberá plyn. Taktiež zaznamenáva informácie o zošliapnutí brzdového, respektíve spojkového pedála, ktoré vedú k prerušeniu fungovania tempomatu.

Medzi hlavné výhody pri používaní patrí pohodlie, ktoré prináša vodičovi pri dlhej ceste, môže taktiež prispieť k lepšej spotrebe vozidla alebo eliminovať nežiadúce prekročenia rýchlosti.

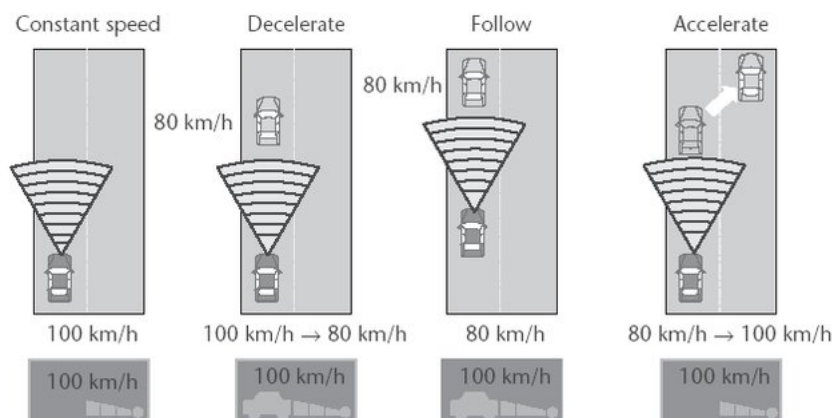
Veľkou nevýhodou však je, že nedokáže žiadnym spôsobom reagovať na akékoľvek udalosti, ktoré na ceste môžu nastať, nakoľko vie rýchlosť len zvyšovať na požadovanú hodnotu a udržiavať. Preto jeho využitie pri hustejšej premávke, poprípade pri jazde v kolóne áut je takmer nulové a môže dokonca zvýšiť riziko dopravnej nehody. Ďalšou nevýhodou môže byť znížená pozornosť vodiča voči aktuálnej situácii v okolí vozidla, čo môže negatívne prispieť k reakčnému času na nebezpečie, ktoré sa môže v premávke vyskytnúť.

2.2 Adaptívny tempomat — ACC

Nedostatky štandardných tempomatov v oblasti bezpečnosti sčasti rieši použitie adaptívneho tempomatu (anglicky *Adaptive Cruise Control*). Okrem všetkých funkcií štandardného tempomatu dokáže rýchlosť vozidla aj znižovať pomocou vyhodnocovania stavu dopravnej situácie priamo pred vozidlom a ovládaním brzdového systému. Relatívnu vzdialenosť medzi našim a prípadným vpredu idúcim automobilom riadiaca jednotka vyhodnocuje pomocou senzorov v prednej časti vozidla (napr. radar [3]), ktoré dokážu zmerať rýchlosť a vzdialenosť sledovaného vozidla. Na základe získaných dát potom ACC buď udržiava nastavenú

rýchlosť, spomaľuje aby zabezpečil bezpečný rozostup medzi vozidlami, nasleduje pomalšie vozidlo a udržiava rozostup alebo zrýchľuje na nastavenú rýchlosť v prípade, ak sa cesta uvoľní alebo rozostup zväčší. Tieto módy fungovania popisuje obrázok 2.1. Odstup od vozidla idúceho vpredu si vie vodič nastaviť na rôzne úrovne podľa svojich preferencií, pričom najkratšia možnosť je časový rozostup 1 sekundy a najdlhšia sa rovná približne 3 sekundám [1].

V prípade použitia s automatickou prevodovkou potom na rozdiel od štandardného tempomatu dokážu ACC s nadstavbou Stop & Go [6] v situáciách ako dopravná zápcha bezpečne ovládať zrýchľovanie a spomaľovanie automobilu, poprípade až úplné zastavenie a následný rozjazd. K bezpečnosti ACC môžu ďalej prispieť rôzne prediktívne funkcie. Automobilka Volkswagen pridáva napríklad aj prediktívnu funkciu, ktorá pomocou predných a zadných kamier a taktiež informácií o ceste dokáže rýchlosť vozidla znížiť ešte pred prichádzajúcou zákrutou alebo križovatkou, poprípade znížiť rýchlosť na základe obmedzení alebo vjazdu do obce [12].



Obr. 2.1: Módy fungovania ACC ¹

2.3 Nedostatky ACC

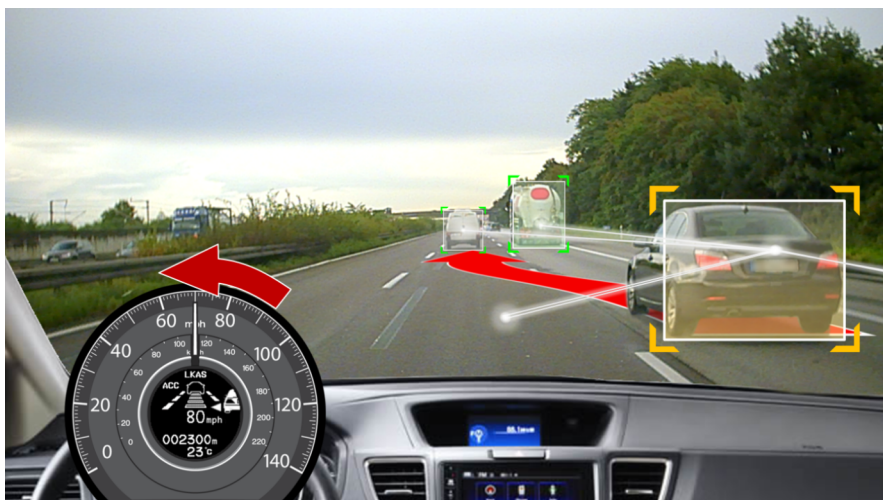
Všetky doposiaľ vyvinuté a používané asistenčné a bezpečnostné systémy v automobiloch fungujú na základe vyhodnocovania udalostí, ktoré sa už začali diať. Tieto systémy môžeme nazvať reaktívnymi, pretože správanie vozidla upravujú na základe aktuálnej situácie alebo odhadu situácie, ktorá môže nastať v krátkom časovom horizonte.

Ako príklad uvedme adaptívny tempomat, ktorého snímače zaznamenajú vpredu idúce vozidlo a jeho zmenu pruhu až vtedy, keď určitá jeho časť zasahuje do jazdného pruhu pred našim vozidlom a jeho ďalší pohyb a budúca pozícia je odhadovaná na základe predošlého pohybu. Takéto systémy umožňujú odhad len okolo 1 sekundy dopredu. Preto jedným z problémov s existujúcimi riešeniami ACC je neskorá reakcia na vozidlo, ktoré vstúpi do nášho jazdného pruhu v krátkej vzdialenosti a v nižšej rýchlosti. Táto situácia je bežná na diaľniciach a vyúsťuje do prudkého brzdzenia, poprípade do zásahu od vodiča. Človek dokáže túto situáciu vyhodnotiť omnoho lepšie sledovaním svojho okolia a predpokladaním situácií, ktoré môžu nastať, preto môže rýchlosť vozidla prispôbiť oveľa skôr a v bezpečnejšej vzdialenosti.

¹Obrázok pochádza z [22]

2.4 Inteligentný adaptívny tempomat — i-ACC

Pre zvýšenie bezpečnosti a komfortu v situáciách kedy sa vozidlo z pomalšieho pruhu pre-radí pred naše vozidlo je potrebné, aby bol ACC inteligentnejší vo svojom správaní. Preto je potrebné, aby na svoje rozhodovanie využíval procesy podobné tým prebiehajúcim v mozgu vodiča. Napodobením procesov ako je vnímanie situácie, jej pochopenie, rozhodnutie a výber akcie môžeme vytvoriť systém schopný napodobniť správanie sa reálneho vodiča.



Obr. 2.2: Ukážka fungovania i-AAC. Vozidlo predpokladá zmenu smeru vpravo idúceho vozidla a reaguje znížením rýchlosti.³

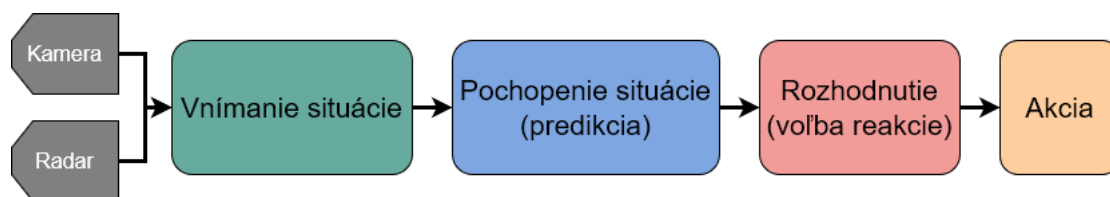
Zatiaľ jediným riešením nasadeným do výroby je Honda intelligent Adaptive Cruise Control [25] v modeli CR-V od roku 2015. V situáciách, keď v dosahu senzorov pred našim vozidlom nie je žiadne iné vozidlo a keď naše vozidlo nasleduje iné vozidlo, sa správa rovnako ako konvenčný ACC. Avšak v situáciách, kedy hrozí prechod vozidiel do nášho jazdného pruhu dokáže predvídať a reagovať ešte skôr, ako sa tieto vozidlá začnú preradovať. Túto situáciu ilustruje obrázok 2.2. To znamená že i-ACC predpokladá potenciálnu zmenu pruhu pozorovaním správania všetkých vozidiel v dosahu jeho senzorov a taktiež analýzou ich relatívnych rýchlostí, vzdialeností a na základe obsadenosti jednotlivých pruhov. Tieto informácie sú vyhodnocované neustále, aby bola zabezpečená včasná reakcia ešte predtým, ako samotný pohyb preradenia začne.

Výsledkom týchto schopností je, že má systém omnoho dlhší horizont predpovedania udalostí (až 5 sekúnd dopredu) ako bežné ACC, ktoré to dokáže len na základe bočného pohybu vozidiel. Tento systém tak dokáže riadiť vozidlo takmer na úrovni porovnateľnej s vodičom schopným tieto udalosti tiež predpokladať. Vďaka rýchlejšim reakciám dokáže i-ACC udržať bezpečný rozostup medzi vozidlami a keďže má na to viac času, potrebné spomalenie môže prebiehať s nižšou intenzitou čo prispieva k lepšiemu komfortu jazdy. Ďalším benefitom je vyššia priemerná rýchlosť vozidla ako s bežným ACC, čo opäť ovplyvňuje komfort ale aj spotrebu vozidla.

³Obrázok pochádza z [25]

2.4.1 Princíp fungovania i-AAC

Grafika systému inšpirovaná konceptom vyhodnocovania situácie podobne, ako to prebieha v ľudskom mozgu, je zobrazená na obrázku 2.3.



Obr. 2.3: Princíp fungovania systému

Modul vnímania situácie kombinuje dáta získané z kamery a radarového senzora vozidla. Tieto dáta reprezentujú aktuálnu situáciu na ceste pred našim vozidlom. Modul pre pochopenie situácie zaradí danú situáciu do jednej z preddefinovaných modelových situácií. Na základe zaradenia do jedného z modelov je potom systém schopný odhadnúť, či sa auto v susediacom pruhu preradí do nášho pruhu alebo nie. Táto časť rozhodovania sa nazýva predpoveď na základe kontextu, ďalej popísaná v časti 2.4.2. Pre úplné a robustné vyhodnocovanie je toto doplnené o fyzickú predikciu založenú na pozorovaní nedávnych pozícií a ich porovnávaní s možnými trajektóriami vozidla, ďalej popísanú v časti 2.4.3.

2.4.2 Predikcia na základe kontextu

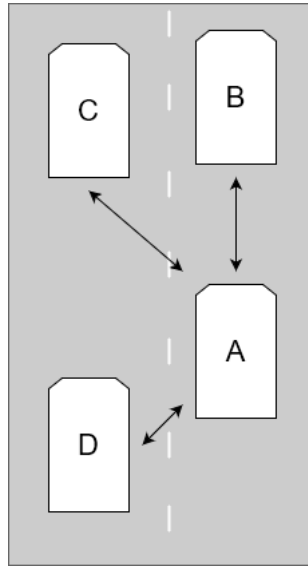
V tejto časti analýzy situácie je výstup z pozorovacieho modulu porovnávaný so známymi modelmi situácií. Každý z týchto modelov obsahuje informácie ako sa daná situácia vyvine, preto je veľmi dôležité, aby bola situácia správne rozpoznaná. Výsledkom tejto časti je odpoveď na otázku: *Nachádza sa vozidlo v situácii kedy zmení jazdný pruh?*

Problém je možné riešiť pomocou lokálnych vzťahov medzi vozidlami v blízkosti nášho vozidla. Vozidlá prichádzajúce do úvahy napríklad pre zmeny pruhu vľavo budú tie pred a naľavo od vozidla, ako ilustruje obrázok 2.4.

Pri vyhodnocovaní sú potom podstatné hlavne 2 parametre a to čas do zrážky s vpredu idúcim vozidlom a čas, kým sa medzera medzi vozidlami C a D dostane na úroveň vozidla A aby ju toto mohlo využiť na preradenie. Čas do zrážky je spočítaný pomocou relatívnej rýchlosti medzi vozidlami v jednom jazdnom pruhu (A-B, D-C) a ich vzdialenosti. Čas, kým sa medzera dostane na úroveň vyhodnocovaného vozidla je vypočítaná obdobne pomocou relatívnej rýchlosti medzi ním a najbližšou medzerou a ich vzdialenosti.

2.4.3 Fyzická predikcia

Pri predlžovaní horizontu predikovania kontextovou metódou sa zvyšuje počet možností, ktoré môže sledované vozidlo vykonať, čím sa znižuje presnosť a istota tohto odhadu. Preto je pre zaručenie spoľahlivého výsledku prítomná aj fyzická predikcia, ktorá predpokladá možnú zmenu pruhu na základe sledovania nedávnych pozícií sledovaného vozidla. Predikcia tohto typu však dokáže spoľahlivo určiť zmenu smeru až v momente, keď daný úkon začal. Problémom môže byť potom spôsob zmien pruhu u rôznych vodičov, napríklad veľmi náhle alebo veľmi pomalé preradenie, ale taktiež zákruty na ceste. Je náročné vytvoriť modely pre rôzne spôsoby preradení preto je použitý jeden model, ktorý zahŕňa priemerný spôsob zmeny jazdného pruhu a berie do úvahy taktiež minimálne odchýlky. Pre odstránenie vplyvu



Obr. 2.4: Ukážka relevantných vzťahov pre predikované vozidlo A

zákrut sú následne pozície sledovaných vozidiel upravené vzhľadom na tvar vozovky, čím je vplyv zakrivenia vozovky na systém minimalizovaný. Priečne pohyby vozidiel sú potom vyhodnotené a na ich základe je rozhodnuté či sledované vozidlo ostáva v jazdnom pruhu, alebo sa preraďuje doprava či doľava.

2.4.4 Rozhodnutie a akcia

Rozhodovací modul dostane informácie z oboch predikcií a ak aspoň jedna s vysokou istotou predpokladá preradenie sledovaného vozidla pred naše vozidlo, systém zahájí mierny spomaľovací manéver pre zachovanie bezpečnej vzdialenosti. Ak obidve predikcie vrátia vysoký predpoklad preradenia, systém podľa potreby spomalí vozidlo vyššou brzdou silou. Spomalenie závisí od relatívnych rýchlostí a vzdialeností nášho a pozorovaného vozidla.

2.5 Druhy senzorov

Dôležitou súčasťou fungovania akéhokoľvek typu tempomatu sú okrem riadiacej jednotky a rôznych čidiel monitorujúcich polohu plynového a brzdového pedála, spojky či aktuálnej rýchlosti vozidla aj senzory, ktoré sledujú okolie a zabezpečujú dôležité vstupné informácie pre správne fungovanie celého systému. Poznáme dva hlavné typy čelných senzorov, radar a lidar, ktoré bývajú doplnené optickým sensorom, napríklad kamerou alebo tiež ultrazvukovými senzormi. Rôzne prediktívne funkcie tempomatov, ako napríklad úprava rýchlosti vozidla na základe blížiacej sa ostrej zákruty alebo dopravného obmedzenia, potom vychádzajú zo senzorov GPS a informácií získaných z navigácie vozidla.

Nasledujúca sekcia popisuje fungovanie daných senzorov a porovnáva ich výhody a nedostatky.

2.5.1 Radar

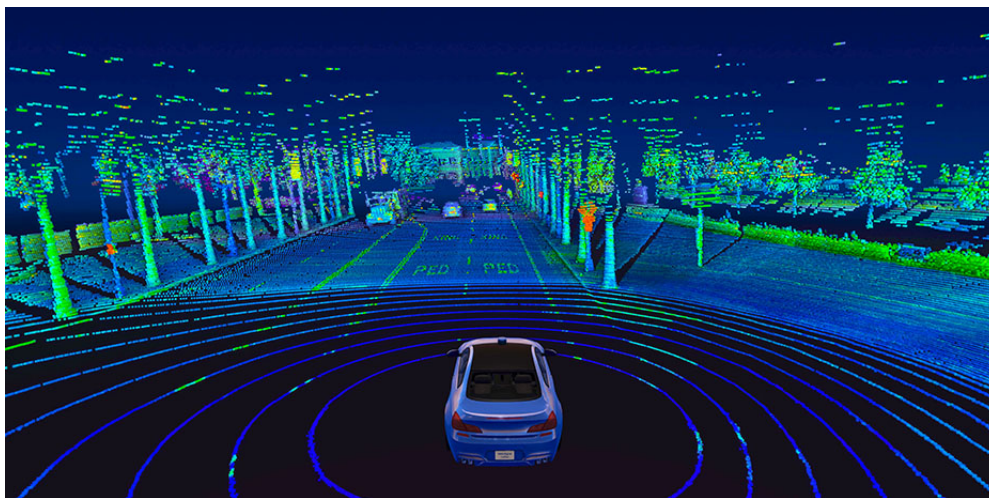
Radar (z anglického „Radio detection and ranging“) využíva pre sledovanie svojho okolia a detekovanie objektov rádiové vlny. Systém pozostáva z vysielача produkujúceho elektromagnetické vlny, antény slúžiacej pre vysielanie a spätné prijímania vln a procesora, ktorý určuje vlastnosti zaznamenaných objektov. Vysielané rádiové vlny sa odražajú od objektov a vracajú sa naspäť k anténe na základe čoho je systém schopný určiť pozíciu objektov a ich rýchlosť.

Radarová technológia má v asistenčných systémoch automobilov už dlhodobé uplatnenie vďaka svojej prijateľnej cene umožňujúcej nasadenie v širokej škále vozidiel a taktiež schopnosti pracovať v rozličných poveternostných podmienkach a situáciách. V automobiloch sa používajú radary s vlnovou dĺžkou 24 alebo 77GHz, postupne však prevláda 77GHz technológia nakoľko umožňuje použitie menšieho senzora a komponentov. Tieto systémy sú zároveň lepšie odolné voči vibráciám spôsobeným pohybujúcim sa vozidlom, čo zlepšuje presnosť detekovania okolia [16].

Radary nasadzované v adaptívnych tempomatoch a asistenčných systémoch obsahujú viacero antén, aby dokázali reagovať na rôzne situácie, ktoré môžu pri jazde nastať. Napríklad radar LRR4 („Long-range radar“) od spoločnosti Bosch [5] obsahuje 4 antény vysielajúce sústredený lúč s uhlom približne 6 stupňov, ktorého hlavnou úlohou je detekovanie objektov v jazdnom pruhu pred vozidlom hlavne pri vysokých rýchlostiach, pričom dokáže pracovať až do vzdialenosti 250 metrov. Pre monitorovanie bližšieho okolia potom obsahuje dodatočné 2 antény so zorným polom 20 stupňov do vzdialenosti 5 metrov, ktoré dokážu detekovať vozidlá preradujúce sa z alebo do pruhu pred vozidlom.

2.5.2 Lidar

Lidar (z anglického „Light detection and ranging“) je spôsob sledovania okolia pomocou svetla za účelom detekovania okolitých objektov a zmerania vzdialenosti k nim. Systém vysielá do svojho okolia svetelné lúče vo forme miliónov laserových impulzov za sekundu a čaká na ich odraz. Na základe rozdielnych časov a vlnových dĺžok odrazených lúčov potom lidar dokáže vytvoriť 3D bodovú reprezentáciu sledovaného objektu alebo celého svojho okolia ako môžeme vidieť na obrázku 2.5.



Obr. 2.5: 3D bodová reprezentácia okolia zostavená pomocou lidarů ⁴

Lidary v súčasnosti pracujú buď s kratšími vlnovými dĺžkami v rozmedzí 600 – 1000nm alebo s dlhšími na úrovni 1550nm. V komerčnom sektore sa využíva kratšia varianta, nakoľko vysielané svetelné lúče musia spĺňať štandardy pre ochranu ľudského oka. Tieto vlnové dĺžky taktiež zabezpečujú menšiu absorpciu vodou, čo napomáha fungovaniu systémov v zhoršenom počasí ako je napríklad dážď, hmla alebo sneženie. Lidary pracujúce na 1550nm technológii vysielaajú viacej svetelných lúčov aby dorovnali tieto nedostatky, preto je aj ich spotreba energie vyššia, čo ďalej obmedzuje využitie v doprave [13].

Cena laserovej technológie je však stále pomerne vysoká, využíva sa preto aktuálne primárne na vedecké účely a pri vývoji autonómnych vozidiel, v žiadnom sériovo vyrábanom vozidle však zatiaľ nebola použitá. Ďalšou nevýhodou je konzistentnosť fungovania lidar. Pri dobrých poveternostných podmienkach dokáže detekovať objekty s lepšou presnosťou ako radary s vysokým rozlíšením, ale napríklad v daždi dokážu kvapky čiastočne odraziť vysielané lúče a výsledný obraz okolia je potom neostrý.

Aj z týchto dôvodov ho napríklad Tesla neplánuje vôbec zaradiť medzi senzory svojich autonómnych vozidiel a jej CEO Elon Musk tvrdí, že je to nadbytočná a zbytočne drahá technológia pre dopravu a jej použitie v asistenčných systémoch alebo autonómnych vozidlách nemá budúcnosť [4].

2.5.3 Kamera

Kamery sú v automobiloch podobne ako radary súčasťou výbavy už dlhšiu dobu. Okrem pomoci pri parkovaní či systému sledovania čiar na vozovke a udržiavania vozidla v jazdnom pruhu sa začínajú využívať aj na rozpoznávanie objektov v ich zornom poli. Bežné kamery na rozdiel od vyššie spomenutých sensorov nedokážu určiť vzdialenosť od okolitých objektov. Z toho dôvodu sa využívajú v súčinnosti s jedným z vyššie spomenutých sensorov. Avšak svojou schopnosťou sledovať okolie podobne ako človek dokážu napríklad čítať dopravné značky alebo rozoznať zvodidlá v zákrute od statickej prekážky pred vozidlom.

Neschopnosť odhadnúť vzdialenosť pri použití kamier môže okrem použitia dodatočného senzoru riešiť tiež nasadenie stereo kamery, schopnej vďaka vizuálnemu odhadu hĺbky v obraze fungovať podobne ako lidar v mapovaní okolia [18].



Obr. 2.6: Ukážka umiestnenia stereo kamery pod čelným oknom vozidla ⁵

⁴Obrázok pochádza z [13]

⁵Obrázok pochádza z [18]

2.5.4 Ultrazvukové senzory

Ultrazvukové senzory využívajú k monitorovaniu svojho okolia zvukové vlny, ktoré sú vo frekvenciách 20 až 40kHz. Vysielané vlny sa v priestore okolo vysieláča odrážajú od okolitých objektov, pričom tieto odrazové signály potom zaznamenávajú samotné ultrazvukové senzory. Centrálna riadiaca jednotka potom na základe časových rozdielov medzi vyslaním a opätovným zachytením signálu, podobne ako radar alebo lidar, vyhodnocuje vzdialenosť k prekážkam. Pre správne fungovanie detekcie okolia sa používa väčšinou viacej senzorov súčasne.

Tento typ senzorov teda taktiež patrí k dôležitým stavebným prvkom asistenčných systémov vozidiel, či už sa jedná o rôznych asistentov parkovania, alebo pri samočinne riadených vozidlách. Veľkou výhodou sú taktiež nízke náklady na výrobu alebo schopnosť detekovať objekty nezávisle od materiálu alebo počasia. Avšak ich použitie v adaptívnych tempomatoch je kvôli obmedzenému dosahu fungovania minimálny.

Kapitola 3

Rozbor problematiky a realizačných prostriedkov

V tejto kapitole budú popísané základné pojmy potrebné pre modelovanie systémov, realizačné prostriedky, ktoré je možné využiť, a taktiež samotný popis vytvoreného modelu.

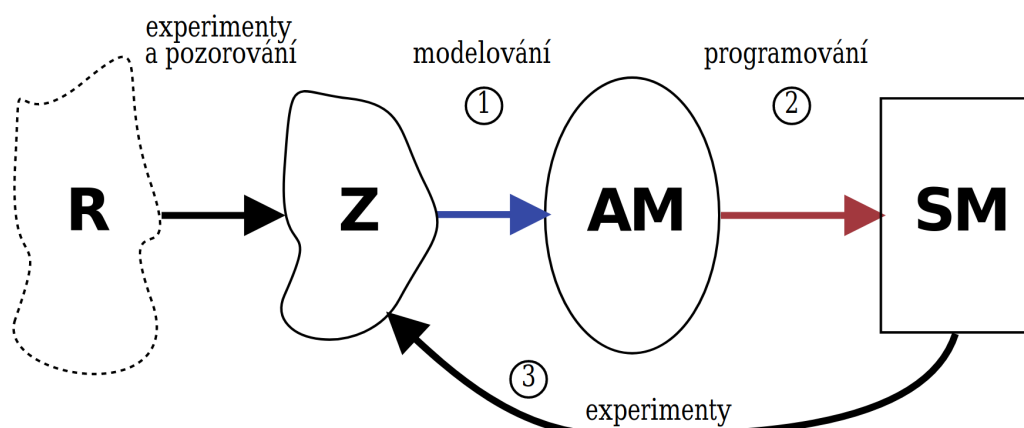
3.1 Modelovanie systémov

3.1.1 Terminológia

Pre úspešné vytvorenie modelu a simulácie je potrebné zadať základné pojmy určujúce čo vnímame ako systém, ako bude reprezentovaný a aké vzťahy bude mať tento nami vytvorený model s realitou. Táto sekcia bola prevzatá z [24].

- **Systém** môžeme definovať ako súbor elementárnych častí (prvkov systému), ktoré sú navzájom prepojené určitými väzbami. Systémy môžeme deliť na reálne, nereálne, statické a dynamické. V našom prípade sa bude jednať o reálny dynamický systém, nakoľko vychádzame z už existujúcich systémov a náš systém bude meniť svoj stav v čase.
- **Model** je napodobenina systému iným systémom - v našom prípade počítačovým programom, pričom musí napodobňovať všetky pre nás dôležité vlastnosti systému. Takto vytvorený model sa nazýva „abstraktný model“.
- **Modelovanie** je proces vytvárania modelu systému. Pre vytvorenie kvalitného modelu je dôležitá dobrá znalosť z oborov zahrňujúcich náš modelovaný systém, ktorá sa potom odrazí aj na výsledkoch získaných z experimentov.
- **Simulácia** je vykonávanie experimentov s vytvoreným modelom. Jej účelom je získanie nových poznatkov o modelovanom systéme. Simuláciu je obvykle potrebné pre získanie potrebných informácií viackrát opakovať so zmenami v jej parametroch.
- **Abstraktný model** je zjednodušením reálneho modelu, pričom zahŕňa len jeho vybrané vlastnosti, ktoré sú pre naše účely podstatné. Dôvodom je, že v počítači nedokážeme reprezentovať všetky komplexnosti reálneho sveta. Toto zjednodušenie medzi reálnym modelom a abstraktným modelom nazývame homomorfný vzťah, ktorý mapuje systém na model so zachovaním podstatných vlastností systému.

- **Simulačný model** je zobrazením reálneho systému do spustiteľnej podoby (počítačového programu). Vzniká prevodom z abstraktného modelu pomocou izomorfného vzťahu, ktorý už vlastnosti nezjednodušuje a predáva ich 1:1. Jeho implementácia závisí od zvoleného programovacieho jazyka respektíve vybraného simulačného prostredia.
- **Verifikácia modelu** je overovanie zachovania izomorfných (1:1) vzťahov medzi vytvoreným abstraktným a simulačným modelom z hľadiska štruktúry a chovania systému. Tento proces sa z hľadiska bežných programov dá prirovnať k jeho ladeniu.
- **Validácia modelu** je proces, pri ktorom sa snažíme dokázať, že vytvorený model je adekvátny k danému modelovanému systému porovnávaním reálnych dát, ktoré o systéme máme, s dátami získanými zo simulácií. Nakoľko absolútnu presnosť nie je možné dokázať, chápeme validitu modelu ako mieru použiteľnosti a správnosti získaných výsledkov.



Obr. 3.1: Ilustrácia procesu modelovania a simulácie. (Realita → Znalosti → Abstraktný Model → Simulačný Model) ²

3.2 Realizačné prostriedky

V nasledujúcej časti budú popísané niektoré simulačné prostredia alebo knižnice vhodné pre modelovanie a simuláciu systémov.

3.2.1 Simulink

Simulink je nástroj založený na MATLABe a jeho funkciách umožňujúci tvorbu a simuláciu dynamických systémov. Modely môžu byť vytvorené buď pomocou grafického editora alebo popísané rovnicami. Grafický editor obsahuje knižnice preddefinovaných blokov určené pre spojenie aj diskrétnych systémov, pomocou ktorých vie užívateľ vytvárať hierarchické blokové schémy reprezentujúce konkrétny model. Využíva sa primárne pre modelovanie fyzikálnych

²Obrázok pochádza z [24]

sústav (napríklad elektromotory, chladiace systémy) ale je možné v ňom modelovať aj algoritmy riadiacich systémov, systémy pre spracovanie signálov alebo umelú inteligenciu.

Medzi ďalšie výhody patrí možnosť vizualizácie simulačných výsledkov, priebežné testovanie a verifikácia systémov, prepojenie s hardware či automatické generovanie kódu pre embedded platformy [10].

3.2.2 SIMLIB

SIMLIB (z anglického „SIMulation LIBrary“) je jednoduchá simulačná knižnica pre programovací jazyk C++ vyvíjaná na Fakulte informačných technológií VUT v Brne od roku 1991. Knižnica funguje s prekladačom GNU C++ pod Linuxom (primárna platforma pre vývoj), FreeBSD a MS Windows. SIMLIB poskytuje základné nástroje pre popis spojitých, diskretných a kombinovaných modelov, prostriedky pre riadenie simulácie a pre zber informácií o správaní modelu počas simulácie. Knižnica uľahčuje popis modelov priamo v jazyku C++ čím sa eliminuje potreba prekladača simulačného jazyka. Výhodou je možnosť využívania všetkých ostatných prostriedkov dostupných v C++ (napríklad dodatočných knižníc) a taktiež použitie ľubovoľného grafického užívateľského rozhrania. Nevýhodou môže byť absencia dodatočných syntaktických a sémantických kontrol obsiahnutých v iných prekladačoch simulačných jazykov ako aj nutnosť znalosti programovania v C++.

Každý model musí obsahovať zahrnutie simulačnej knižnice pomocou `#include`, popis modelu a popis experimentu. Samotný popis experimentu je vo funkcii `main` a smie byť uvedený len v jednom súbore, avšak model môže byť v prípade potreby rozčlenený do viacerých súborov.

Model vychádza z princípov objektovo orientovaného programovania a skladá sa z množiny prvkov (entít), ktoré sú vzájomne poprepájané väzbami. Spolu s rôznym správaním sa prvkov tieto väzby určujú spôsob fungovania celého modelovaného systému. Objekty modelu vykonávajú akcie v reakcii na prijímané správy a zároveň uskutočňujú iné akcie nezávisle na prijímaných správach. Tieto akcie menia obsah dátových štruktúr objektov, čím sa upravuje celkový stav daného objektu. Tento popis bol prevzatý z [23].

3.2.3 UPPAAL

Pre realizáciu modelu bol zvolený nástroj UPPAAL. UPPAAL je nástroj pre tvorbu (modelovanie), verifikáciu a simuláciu real-time systémov vyvíjaný na univerzitách v Uppsala a Aalborgu. Je určený pre verifikáciu systémov, ktoré je možné modelovať ako sieť časovaných automatov. Tieto automaty rozširuje o celočíselné premenné, užívateľom definované funkcie, štrukturované dátové typy a synchronizáciu procesov pomocou komunikačných kanálov. Skladá sa z grafického užívateľského rozhrania implementovaného v jazyku Java a z verifikačného prostriedku. Jeho fungovanie je založené na použití časovaných automatov — konečných automatov rozšírených o časovú premennú. Čas je zaznamenávaný spojite a beží synchronne naprieč celým systémom. Modelovaný systém sa potom skladá z niekoľkých paralelných časovaných automatov. Stav systému je definovaný miestami všetkých automatov, hodnotami hodinových premenných a hodnotami ostatných diskretných premenných. Nasledujúce sekcie boli prevzaté z tutoriálu pre UPPAAL [21].

Definícia časovaného automatu

Časovaný automat môžeme formálne definovať ako šesticu (L, l_0, C, A, E, I) kde:

- L je množina stavov

- $l_0 \in L$ je počiatočný stav
- C je množina hodinových premenných
- A je množina akcií
- $E \subseteq L \times A \times B(C) \times 2^C \times L$ je množina prechodových hrán medzi stavmi
- $I : L \rightarrow B(C)$ priraďuje invarianty k stavom

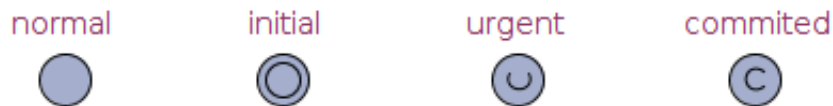
Časované automaty sú často spájané do siete súbežne pracujúcich časovaných automatov, ktoré majú spoločné množiny hodinových premenných a akcií. Formálne potom môžeme model v nástroji UPPAAL zapísať ako n časovaných automatov $A_i = (L_i, l_i^0, C, A, E_i, I_i), 1 \leq i \leq n$.

Časované automaty v UPPAALe

Sieť časovaných automatov je v editori nástroja UPPAAL umiestnená v šablónach, ktoré okrem grafického nákresu samotného automatu obsahujú taktiež deklaračnú časť. Každý časovaný automat je popísaný vlastnou šablónou. Každý stav daného automatu je v programe pomenovaný ako miesto (anglicky *location*) a prechody medzi stavmi ako hrany (anglicky *edge*).

Miesta podporované v nástroji UPPAAL ilustruje obrázok 3.2.

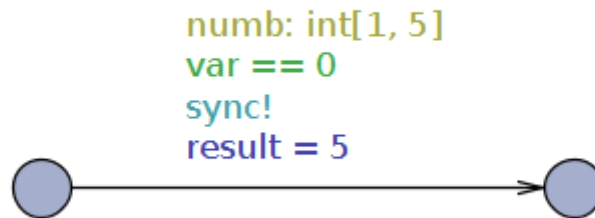
- **Normálne** miesta môžu obsahovať invariant — podmienku, ktorá musí platiť, keď sa proces nachádza v danom mieste. Pokiaľ proces čaká v normálnom mieste, čas modelu beží ďalej. Každý proces musí taktiež obsahovať presne jedno počiatočné miesto (anglicky *initial*).
- **Urgent** miesta zastavujú čas, čiže čas nebeží, ak sa proces nachádza v takomto mieste.
- **Committed** miesta sa z pohľadu času správajú rovnako ako **urgent** miesta, avšak pridávajú jednu ďalšiu vlastnosť — ak sa proces nachádza v **committed** mieste, musí nasledujúci prechod ísť po hrane taktiež z **committed** miesta.



Obr. 3.2: UPPAAL — typy miest

Hrany spájajú jednotlivé miesta v šablónach vytvorených automatov a umožňujú prechody medzi jednotlivými miestami. Hrany sa môžu vetviť do viacerých cieľových miest a je možné priradiť im pravdepodobnostné váhy. Každá hrana môže byť popísaná 4 rôznymi vlastnosťami ilustrovanými na obrázku 3.3. Na hranách je čas modelu zastavený.

- **Select** obsahuje zoznam čiarkou oddelených výrazov v tvare `meno : typ`. Tieto premenné sú dostupné len na príslušnej hrane a nadobúdajú nederministickú hodnotu z daného rozsahu.
- **Guard** obsahuje výraz, ktorý umožňuje prechod po danej hrane za predpokladu, že je pravdivý.
- **Synchronization** umožňuje synchronizovanie procesov pomocou komunikačných kanálov (dátový typ `chan`). Ak výraz obsahuje za názvom kanálu `!`, vysiela daná hrana signál do kanálov s rovnakým názvom zakončených symbolom `?` (napríklad `e!` vysiela signál pre `e?`).
- **Update** obsahuje čiarkami oddelený zoznam výrazov, ktoré sa vykonajú pri prechode po danej hrane.



Obr. 3.3: UPPAAL — vlastnosti hrany. Žltá — select, zelená — guard, tyrkysová — synchronization, modrá — update

GUI a funkcie nástroja UPPAAL

Grafické rozhranie je rozdelené do troch základných častí potrebných pre modelovanie a overovanie vytvorených modelov: editor, simulátor a verifikátor (anglicky *verifier*).

Editor slúži pre vytváranie šablón časovaných automatov, z ktorých sú potom instanciovane procesy. Je rozdelený do dvoch častí: bočný panel zobrazujúci stromovú štruktúru všetkých šablón a deklarácií a priestor pre kreslenie šablón. Bočný panel umožňuje prístup k nasledovným častiam popisu systému:

- **Globálne deklarácie** zahŕňajú globálne premenné, hodiny, užívateľom definované funkcie, synchronizačné kanály a konštanty.
- **Šablóny** jednotlivých parametrizovaných časovaných automatov, pričom každá takáto šablóna môže obsahovať lokálne deklarácie premenných, kanálov, funkcií a konštant.
- **Systémová definícia** určuje, ktoré procesy sú súčasťou systému.

Simulátor môže byť použitý tromi rôznymi spôsobmi. Prvou možnosťou je, že užívateľ ovláda beh systému ručne a vyberá, ktoré prechody sa majú vykonať. Druhý variant je zapnutie náhodného módu, ktorý umožní systému bežať samostatne. Posledný spôsob využitia

simulátora je prechod trasy, ktorá bola vopred uložená alebo importovaná z verifikátora. Simulátor je rozdelený do štyroch častí:

- **Ovládací panel** slúži k vyberaniu, ktoré z povolených prechodov sa majú vykonať, k prechodu trasy alebo k spusteniu náhodného módu.
- **Prehľad premenných** ukazuje hodnoty premenných typov `integer`, `bool` a obsah prvkov polí. Zobrazené sú taktiež premenné typu `clock`, avšak ich hodnota nie je zobrazená presne ale je vyjadrená intervalom hodnôt.
- **Systémový prehľad** zobrazuje všetky inštanciované automaty a ich aktívne miesta v súčasnom stave simulácie.
- **Sekvenčný diagram** slúži k zobrazeniu synchronizácie medzi rozličnými procesmi a zároveň ukazuje aktívne miesta v každom kroku simulácie.

Verifikátor umožňuje užívateľovi za použitia dotazov overiť dostupnosť požadovaných stavov na základe prechodu celého stavového priestoru. Trasy takto overených dotazov je potom možné načítať späť do simulátora a prejsť krok za krokom. Ak je podmienka dotazu uspokojená, označí ju nástroj zelenou farbou, neuspokojené podmienky sú označené červenou. Stavový riadok v spodnej časti ukazuje komunikáciu so serverom, ktorá obsahuje zaujímavé údaje ako napríklad čas potrebný pre overenie dotazu a jeho pamäťovú náročnosť.

Dotazovací verifikačný jazyk

Hlavnou úlohou overovania modelu je jeho verifikácia s ohľadom na požadovanú špecifikáciu. Tak ako model, aj špecifikácia musí byť vyjadrená formálne dobre definovaným jazykom, ktorý je spracovateľný počítačom. Vo vedeckej literatúre existuje viacero takých logík, pričom UPPAAL využíva zjednodušenú verziu TCTL. Dostupné dotazy pre verifikátor sú:

- $A \langle \rangle p$ — pre všetky cesty podmienka p niekedy platí
- $A [] p$ — pre všetky cesty podmienka p vždy platí
- $E \langle \rangle p$ — existuje cesta, pre ktorú podmienka p niekedy platí
- $E [] p$ — existuje cesta, pre ktorú podmienka p vždy platí
- $p \rightarrow q$ — pokiaľ bude niekedy splnená podmienka p , bude potom splnená aj podmienka q

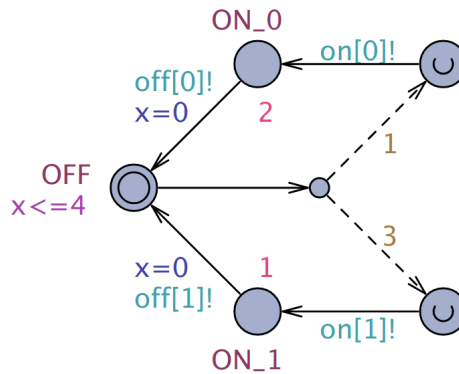
3.2.4 UPPAAL SMC

Nástroj UPPAAL SMC [20] je nadstavbou základného UPPAAL nástroja, pričom k jeho bežným funkciám pridáva schopnosť štatistického model checkingu (anglicky *Statistical Model Checking*)[17]. Štatistický model checking je prístup, ktorý bol navrhnutý ako alternatíva k úplnému prehľadávaniu stavového priestoru modelu. Základnou myšlienkou je monitorovanie niekoľkých simulácií systému a vyhodnotenie štatistických výsledkov. Na základe týchto poznatkov potom vieme stanoviť, či systém spĺňa požadované vlastnosti s určitou dávkou istoty. SMC je kompromisom medzi testovaním a štandardnými spôsobmi overovania modelov. Metódy overovania založené na simuláciách sú mnohokrát jediná možnosť, nakoľko

sú časovo a pamäťovo omnoho menej náročné. SMC sa využíva pre analyzovanie stochastických systémov — systémov, kde čas v jednotlivých procesoch môže ubiehať rozdielnou rýchlosťou. Tempo ubiehania času môže byť určené bežnými diferenciálnymi rovnicami.

Automaty v SMC taktiež podporujú vetvenie hrán na základe hodnôt váh priradených týmto hranám, čím môžeme pridať pravdepodobnostné rozloženie na diskrétny prechody. Hodnoty váh môžu byť určené nielen jednoduchou konštantou, ale aj všeobecnými výrazmi závislými od rôznych iných stavov systému.

Ako príklad môžeme uviesť prípad, kedy potrebujeme vykurovať dve nezávislé miestnosti pomocou jedného ohrievača, pričom v jeden moment môžeme ohrievať len jednu miestnosť. Obrázok 3.4 ukazuje automat pre ohrievač. Zapína sa po uplynutí počtu časových jednotiek určených uniformným rozložením z intervalu $[0,4]$. Ohrev v miestnosti s číslom 0 potom nastáva s pravdepodobnosťou $1/4$, pre miestnosť 1 je pravdepodobnosť $3/4$. Takýmto spôsobom vieme namodelovať situáciu, kde jedna udalosť nastáva s vyššou pravdepodobnosťou ako druhá, pričom v našom prípade ohrievač preferuje miestnosť číslo 1.



Obr. 3.4: Automat jednoduchého ohrievača dvoch miestností ³

Ďalším novým rozšírením je podpora premenných s plávajúcou desatinnou čiarkou typu `double`. UPPAAL SMC taktiež dokáže vytvárať inštancie šablón modelu počas behu simulácie, pričom takto dynamicky vytvorené inštancie sa správajú rovnako ako tie statické s výnimkou, že sa môžu kedykoľvek ukončiť a tým pádom odstrániť zo systému. Taktiež boli pridané dotazy do verifikátora podporujúce vyššie spomínané štatistické overovanie vlastností modelu:

- `Pr[<=time] (<> p)` — odhadnutie intervalu spoľahlivosti pravdepodobnosti, v ktorom bude daný výraz `p` pravdivý. Premenná `time` obmedzuje do akého času musí podmienka nastať (je možné obmedziť aj počtom diskrétnych krokov). SMC pre výpočet tohto intervalu implementuje sekvenčnú metódu, kde je šírka intervalu spoľahlivosti pravdepodobnosti vyhodnotená po každej jednej simulácii. Generovanie nových simulácií je zastavené akonáhle šírka intervalu spoľahlivosti dosiahne hodnotu menšiu ako 2ϵ .
- `simulate N [<=time] {a, b}` — simulácia `N` behov systému a monitorovanie vývoja hodnôt výrazov `a, b`, premenná `time` obmedzuje čas trvania simulácie. Umožňuje užívateľovi vykreslenie hodnôt výrazov (prepočítaných na celé číslo alebo hodnotu hodín) počas simulovaných behov, čím poskytuje náhľad do správania systému. Pomocou

³Obrázok pochádza z [20]

takto získaných informácií potom užívateľ môže v systéme hľadať ďalšie zaujímavé vlastnosti, ktoré môžu byť ďalej dotazované v model-checkeri.

- $E[\text{time}; N]([\text{min}, \text{max}]:p)$ — odhad maximálnych alebo minimálnych očakávaných hodnôt výrazu p , ktorého výsledkom je celé číslo alebo hodnota hodín. Premenná time určuje do akého času v behu simulácie sa výraz vyzodnocuje a N explicitne určuje počet simulačných behov.

3.2.5 UPPAAL Stratego

UPPAAL Stratego spája funkcie programov UPPAAL TIGA (Timed Game Automata) a UPPAAL SMC (Statistical Model Checking) a pridáva k tomu nové dotazy pre verifikátor — stratégie. Rovnako ako pri TIGA podporuje stratego časované automaty, pri ktorých je množina akcií rozdelená na kontrolovateľné a nekontrolovateľné (anglicky *Timed Game Automata*).

Tento spôsob časovanej hry sa dá najlepšie vysvetliť na príklade dvoch hráčov hrajúcich proti sebe pričom obe strany sa snažia vyhrať. Naše akcie v danej hre vieme ovládať, teda sa jedná o kontrolovateľné hrany, naopak akcie súpera ovládať nevieme. Podmienky výhry, ktorá nastane len vtedy ak sa do cieľového stavu prejde po ovládateľnej hrane, vieme špecifikovať pomocou TCTL dotazu [19].

Stratégia je návod pre hráča ovládajúceho kontrolovateľné hrany ktorý určuje, ako sa má počas hry správať. Stratégia určuje len to či má v daný moment vykonať ovládateľnú akciu alebo nevykonať žiadnu akciu.

Pre stratégiu bol do verifikátora pridaný nový dotaz **strategy A**. Do premennej A sa uloží stratégia, pomocou ktorej vieme ďalej riadiť priebeh simulácie s použitím kľúčového slova **under A** tak, že ho pridáme na koniec dotazu spúšťajúceho simuláciu. Príklady dotazov so stratégiami zobrazuje obrázok 3.5.

Za výhernú stratégiu potom môžeme považovať takú, na základe ktorej dokáže hráč vždy vyhrať bez ohľadu na to, čo spraví jeho protivník, avšak takáto stratégia nemusí vždy existovať. Stratego podporuje tri typy stratégií[11]:

- **deterministická stratégia** — špecifikuje jedinú akciu pre daný stav
- **nedeterministická stratégia** — môže ponúkať viacero akcií pre daný stav
- **stochastická stratégia** — ponúka množinu akcií, ktoré vedú k cieľu, pre každý stav

3.3 Popis abstraktného modelu

Táto sekcia popisuje požiadavky a návrh vlastností abstraktného modelu popisujúceho správanie „nášho vozidla“ disponujúceho rôznym stupňom asistenčného systému adaptívny tempomat (ACC/i-ACC), správanie sa ostatných vozidiel a taktiež vlastnosti vozovky a použité abstrakcie či jednotky.

⁴Obrázok pochádza z [19]

Safety	$A[]$ prop under NS
Liveness	$A\langle\rangle$ prop under NS
Guarantee objective	strategy NS = control: $A\langle\rangle$ prop
Guarantee objective	strategy NS = control: $A[]$ prop
Evaluation	Pr[bound] ($\langle\rangle$ prop) under SS
Expected	value E[bound;int](min: prop) under SS
Simulations	simulate int [bound]{expr1,expr2} under SS
Minimize objective	strategy DS = minE (expr) [bound]: $\langle\rangle$ prop under NS
Maximize objective	strategy DS = maxE (expr) [bound]: $\langle\rangle$ prop under NS

Obr. 3.5: UPPAAL stratego — typy dotazov so stratégiami ⁴

3.3.1 Požiadavky

Cieľom je návrh vhodnej abstrakcie automobilu, jeho okolia a ďalších komponentov kľúčových z pohľadu inteligentného adaptívneho tempomatu. Súčasťou modelu musí byť pre úspešné dokumentovanie fungovania i-ACC abstrakcia minimálne dvojprúdového úseku vozovky, po ktorej sa spolu s našim vozidlom pohybujú ostatné vozidlá. Naše vozidlo vie na základe aktivovaného asistenčného systému nasledovať pred sebou idúce vozidlo, udržiavať konštantnú preddefinovanú rýchlosť alebo spomaľovať, ak pred sebou zistí pomalšie vozidlo.

3.3.2 Abstrakcia nášho vozidla

Naše vozidlo disponuje radarom, pomocou ktorého dokáže detekovať okolité vozidlá, ich vzdialenosť a rýchlosti a na základe týchto dostupných údajov zvyšovať, znižovať alebo udržiavať rýchlosť.

Vozidlo nedisponuje žiadnym systémom schopným ovládať jeho smer a keďže sa model zameriava na tempomaty, do riadenia nezasahuje ani vodič, preto nie je schopné preradovať sa medzi jazdnými pruhmi. Pre účely modelu a demonštrácie fungovania rozličných úrovní tempomatov sa vozidlo nachádza v úplne ľavom pruhu, kde vieme ukázať ako je vozidlo schopné upravovať svoju rýchlosť či už pri nasledovaní vpredu idúceho vozidla, alebo reagovať na preradujúce sa vozidlo z pruhu napravo.

Správanie s použitím ACC

Pokiaľ má vozidlo aktivovaný len bežný adaptívny tempomat, sleduje radarový senzor výhradne pruh priamo pred vozidlom. Na základe vzdialenosti pred ním idúceho vozidla potom upravuje svoju rýchlosť. Spôsob vyhodnocovania vzdialenosti je bližšie popísaný v sekcii 3.3.6.

Pri zistení bezpečnej vzdialenosti sa bude rýchlosť vozidla zvyšovať alebo ostane na aktuálnej úrovni ak sa vozidlo momentálne pohybuje stanovenou rýchlosťou. V prípade že je jeho rýchlosť väčšia ako nastavená, znižuje pomaly svoju rýchlosť až kým nedosiahne jej požadovanú hodnotu.

Ak je vzdialenosť vyhodnotená ako nebezpečná, bude vozidlo spomaľovať s rôznymi deceleračnými hodnotami závislými opäť od relatívnych vzdialeností alebo od rozdielov v rýchlostiach. Kritická situácia môže nastať, ak sa z pravej strany vozovky začne preradovať ďalšie vozidlo. Nakoľko radar pri bežnom adaptívnom tempomate nesleduje susedné pruhy, môže takéto preradenie zaznamenať až v momente, keď už časť vozidla meniaceho pruh

zasahuje do jazdného pruhu pred našim vozidlom. Výsledkom tejto situácie môže potom byť priblíženie sa na kritickú vzdialenosť, prudké brzdenie vozidla alebo v najhoršom prípade zrážka. V porovnaní s obyčajným tempomatom bez adaptívnej funkcie by však aj prípadná zrážka bola miernejšia, nakoľko vozidlo by hneď po zistení kritického situácie zahájilo núdzové brzdenie.

Správanie s použitím i-ACC

Pri inteligentnom adaptívnom tempomate sa funkčnosť radarového senzoru rozširuje aj na sledovanie susedných jazdných pruhov. V reálnom vozidle by podobnú funkciu zabezpečovalo viacero senzorov (radar, lidar, kamera) spolupracujúcich na získavaní dát z okolia vozidla. Pre zjednodušenie modelu postačuje na naše účely, že budeme pracovať len s jedným senzorm, ktorý pokryje funkčnosť inak zložitejšieho reálneho systému senzorov.

Inteligentný adaptívny tempomat je teda nadstavbou bežného ACC. Hlavným rozdielom v modelovaní bude vyhodnocovanie okolitých pruhov. Logika i-ACC bude analyzovať potencionálne preradenia blízkych vozidiel na základe fyzickej alebo kontextovej predikcie podobne ako bolo popísané v sekcii 2.4. Ak sa nezistí žiadne potencionálne preradenie, predá sa riadenie rýchlosti bežnému ACC. Naopak v prípade zistenia preradenia, bude vozidlo upravovať svoju rýchlosť a vzdialenosť voči preradujúcemu sa vozidlu tak, aby sa pokúsilo zachovať minimálnu bezpečnú vzdialenosť nastavenú v riadiacej jednotke tempomatu.

3.3.3 Popis vozovky

Pre účely simulovania systémov popisujúcich tempomaty je ideálne uvažovať vozovku ako diaľnicu alebo rýchlostnú cestu s minimálne dvoma jazdnými pruhmi vedúcimi v tom istom smere, nakoľko využitie tempomatu na bežných cestách je minimálne. Taktiež sledovanie protismeru je v prípade tempomatu bezpredmetné, nakoľko neobsahuje žiadne prostriedky na vyhybanie sa možným čelným kolíziám. Pre jednoduchosť modelu na vozovke neberieme do úvahy akékoľvek zákruty alebo prevýšenia a je reprezentovaná ako dvojrozmerný priestor.

Šírka jazdného pruhu na diaľniciach sa v Európe pohybuje v rozmedzí 3,50-3,75 metra, preto bola pre model zvolená stredná hodnota 3,60 metra [14], ktorú je však možné podľa potrieb simulácie upravovať. Maximálna povolená rýchlosť je na vozovke nastavená na približne 130km/h. Zadefinovaných rýchlostí je možné meniť podľa požiadaviek simulácie. Počet jazdných pruhov je stanovený na dva, nakoľko i-ACC vyhodnocuje len relatívne vzdialenosti k najbližším vozidlám ako bolo ukázané na obrázku 2.4, preto pre účely nášho modelu nie je potrebné simulovať viacero jazdných pruhov.

3.3.4 Popis okolitých vozidiel

Okolité vozidlá fungujú podobne ako naše vozidlo. Nedisponujú síce žiadnou formou tempomatu, ale keďže sú vedené vodičmi, dokážu rovnako upravovať svoju rýchlosť na základe relatívnych vzdialeností. Na rozdiel od nášho vozidla a aj pre účely modelu sú schopné predať sa medzi jazdnými pruhmi. Prechod medzi jazdnými pruhmi prebieha rýchlosťou 1m/s a trvá 3,6 sekundy s ohľadom na šírku pruhu popísanú v sekcii 3.3.3.

Na začiatku sú vozidlá rozmiestnené náhodne s náhodnými rýchlosťami (aktuálnou aj cieľovou), avšak pre účely simulácie je možné v deklarácii pomocou nastavení vyvolať rôzne správanie potrebné pre odsimulovanie určitej situácie (napríklad preradenie medzi pruhmi). Ich cieľové rýchlosti sa môžu počas behu simulácie meniť.

3.3.5 Popis použitých jednotiek

Čas je v modeli reprezentovaný celočíselne, pričom jedna jednotka času je rovná jednej milisekunde a celý hlavný cyklus sa vykoná raz za 100ms. Táto hodnota bola zvolená z dôvodu aby mohla byť do modelu zapracovaná odozva radarového senzoru, ktoré sa pohybujú na úrovni aj 30ms. Pri následnom zvýšení odozvy nad 100ms napríklad pre simulovanie horších poveternostných podmienok alebo chybovosti senzoru sa potom zmení aj správanie samotného tempomatu.

Vzdialenosť a rýchlosť je reprezentovaná v decimetroch, resp. decimetroch za sekundu, z dôvodu aktualizovania jednotlivých parametrov objektov desaťkrát za sekundu. Použitie decimetrov je praktickejšie z hľadiska bezproblémového využitia celočíselných premenných či už pre rýchlosti alebo vzdialenosti a pozície jednotlivých vozidiel modelu.

Akcelerácia a decelerácia vozidiel je reprezentovaná ako okamžitá zmena rýchlosti daného vozidla. Je reprezentovaná ako hodnota rýchlosti v decimetroch za sekundu, ktorá sa pripočíta k aktuálnej rýchlosti (pri decelerácii pripočítavame záporné hodnoty), keď nastane počas simulácie potreba takejto zmeny. Hodnoty zrýchlení boli zvolené podľa parametrov bežného osobného vozidla Škoda Octavia [7], hodnoty zpomalenia potom na základe publikácie *Acceleration-Deceleration Behaviour of Various Vehicle Types* [15].

3.3.6 Vyhodnocovanie relatívnych vzdialeností a pozícií

Pozícia nášho vozidla je v 2D priestore vozovky statická, pozície ostatných vozidiel sú potom relatívne vzhľadom k nášmu vozidlu a menia sa v závislosti od rozdielov rýchlostí v porovnaní s naším vozidlom alebo na základe preradenia sa medzi pruhmi. Pokiaľ sa nejaké z vozidiel dostane za naše vozidlo tak bude z modelu odstránené nakoľko prestáva byť z hľadiska i-ACC relevantné a namiesto neho bude do daného pruhu vložené nové vozidlo tak, aby bolo umiestnené pred naším vozidlom. Pokiaľ vychádzame zo základného modelu so štyrmi vozidlami tak podobná situácia nastane aj po úspešnom preradení, kedy sa v jednom pruhu budú nachádzať tri vozidlá a v druhom len jedno. Preto sa predné vozidlo z prvého pruhu odstráni a namiesto neho sa vloží do druhého pruhu nové vozidlo.

Vzdialenosť medzi vozidlami je jedným z hlavných faktorov ovplyvňujúcim bezpečnosť cestnej premávky. Avšak zatiaľ čo 15 metrový rozstup medzi dvoma vozidlami idúcimi po meste rýchlosťou 45 km/h môže byť dostačujúci a bezpečný, pri diaľničnej rýchlosti 130 km/h tomu už tak nie je. Preto ACC/i-ACC pracuje s časovou vzdialenosťou medzi vozidlami, ktorú môžeme popísať ako čas, za ktorý sa vzadu idúce vozidlo dostane na momentálnu pozíciu vpredu idúceho vozidla pri zachovaní aktuálnej rýchlosti. Časovú vzdialenosť teda spočítame ako podiel vzdialenosti medzi vozidlami a rýchlosti vzadu idúceho vozidla.

Všeobecne sa za minimálnu bezpečnú vzdialenosť považuje 2 sekundový rozstup medzi vozidlami [8][2], pričom toto pravidlo platí obzvlášť na diaľniciach pri vyšších rýchlostiach. Touto vzdialenosťou sa v modeli budú riadiť ostatné vozidlá.

Adaptívne tempomaty v súčasných automobiloch sú však s využitím radarových senzorov schopné nasledovať vpredu idúce vozidlá aj s polovičným len 1 sekundovým rozstupom, s ktorým budeme pracovať v našom modeli. Nakoľko reakčná doba radaru je neporovnateľná s človekom, je táto vzdialenosť za dobrého počasia dostatočne bezpečná aby sa dokázalo predísť dopravnej nehode alebo v najhoršom prípade zmierniť jej následky. Podľa preferencií vodiča sa dá časový rozstup u ACC nastaviť a to obvykle v rozmedzí 1-3 sekundy [9].

Kapitola 4

Implementácia navrhnutého modelu

V tejto kapitole bude popísaná samotná implementácia modelu vozidla fungujúceho s ACC alebo i-ACC a okolitých vozidiel. Popísané budú časované automaty tvoriace model, spôsob ako funguje ich logika, vytvorené dátové štruktúry a taktiež niektoré vybrané funkcie podporujúce fungovanie modelu na pozadí. Pre implementáciu bol zvolený nástroj UPPAAL popísaný v sekcii 3.2.3 vo verzii Stratego, ktorá okrem možností používania stratégií obsahuje aj štatistický model checking z UPPAAL SMC popísaný v sekcii 3.2.4.

4.1 Dátové štruktúry a konštanty

V tejto časti budú popísané dátové štruktúry, vytvorené pre správne fungovanie modelu.

4.1.1 Object

Dátová štruktúra `object` popisuje vlastnosti a stav všetkých objektov (vozidiel) nachádzajúcich sa v simulácii. Obsahuje informácie o pozícii, rýchlostiach, type objektu a vzdialenostiach relevantných pre daný objekt. Jej jednotlivé premenné ukazuje tabuľka 4.1.

struct object		
dátový typ	identifikátor	popis
<code>position</code>	<code>pos</code>	pozícia objektu v 2D priestore vozovky
<code>int</code>	<code>velocity</code>	aktuálna rýchlosť objektu
<code>int</code>	<code>target speed</code>	cieľová rýchlosť vozidla
<code>int</code>	<code>object_type</code>	identifikátor určujúci typ objektu
<code>int</code>	<code>distance_to_front_object_dm</code>	vzdialenosť k objektu vpredu (dm)
<code>int</code>	<code>distance_to_front_object_ms</code>	vzdialenosť k objektu vpredu (ms)

Tabuľka 4.1: Tabuľka štruktúry `object`

4.1.2 Position

Dátová štruktúra `position` popisuje polohu objektu (v našom prípade vozidla nachádzajúceho sa v simulácii) v dvojrozmernom priestore vozovky. Okrem štyroch rohov ohraniču-

júcich plochu ktorú objekt v priestore zaberá obsahuje taktiež informácie o tom, v ktorom pruhu na vozovke sa daný objekt nachádza. Dôležité pre náš model je aj uchovávanie informácie o zmene jazdného pruhu vozidla, ktoré táto štruktúra taktiež zahŕňa. Jednotlivé premenné potom môžeme vidieť v tabuľke 4.2.

struct position		
dátový typ	identifikátor	popis
int	frontL[2]	súradnice ľavého predného rohu
int	frontR[2]	súradnice pravého predného rohu
int	backL[2]	súradnice ľavého zadného rohu
int	backR[2]	súradnice pravého zadného rohu
int	lane_id[2]	identifikátor pruhu, v ktorom sa objekt nachádza
bool	changing_lanes	určuje, či sa objekt preraďuje
bool	between_lanes	určuje, či je objekt medzi dvoma pruhmi

Tabuľka 4.2: Tabuľka štruktúry position

4.1.3 Lane

Dátová štruktúra lane obsahuje informácie o jednotlivých jazdných pruhoch v našom modeli. Pre každý pruh je uchovávaný počet vozidiel, ktoré sa v ňom nachádzajú a taktiež ich identifikačné čísla. Jednotlivé premenné popisuje tabuľka 4.3.

struct lane		
dátový typ	identifikátor	popis
int	cars_count	počet vozidiel v danom pruhu
int	car_ids	identifikačné čísla vozidiel v danom pruhu

Tabuľka 4.3: Tabuľka štruktúry lane

4.1.4 Konštanty modelu

Model je implementovaný s ohľadom na čo najširšie možnosti jeho prispôsobenia, preto sa mnohé konštanty dajú nastavovať. Všetky tieto premenné sa nachádzajú v sekcii Declarations, prístupnej priamo cez GUI v nástroji UPPAAL. Pre fungovanie modelu na naše účely sú tieto hodnoty prednastavené s ohľadom na návrh abstraktného modelu popísaného v sekcii 3.3. Tabuľka 4.4 popisuje vybrané nastaviteľné konštanty a ich vplyv na fungovanie modelu. Všetky konštanty sú dátového typu integer. Vzdialenosti vozidiel a rozmery vozovky alebo vozidiel sú uvádzané v decimetroch, rýchlostné údaje v decimetroch za sekundu a časové vzdialenosti v milisekundách.

Okrem týchto vybraných konštánt je možné upraviť aj rôzne akceleračné alebo deceleračné hodnoty vozidiel, ak by sa napríklad jednalo o simulovanie nákladných vozidiel alebo autobusov s ACC. Taktiež rýchlosť preradenia vozidla medzi pruhmi je možné upraviť zo základnej hodnoty, ktorá stanovuje trvanie tohoto manévra na 3,6 sekundy pre potreby modelu.

nastaviteľné konštanty		
identifikátor	hodnota	popis
<code>my_target_speed</code>	360	nastavená hodnota nášho tempomatu
<code>number_of_vehicles</code>	4	počet vozidiel v simulácii v rátane nášho auta
<code>lane_count</code>	2	počet jazdných pruhov
<code>default_distance</code>	300	minimálna počiatočná vzdialenosť vozidiel
<code>SPEED_LIMIT</code>	360	maximálna povolená rýchlosť)
<code>IACC_switch</code>	0	prepínač medzi ACC (0) a i-ACC (1)
<code>simulate_lanechange</code>	1	spustenie simulovaného preradenia vozidla
<code>min_distance</code>	1000	min. časová vzdialenosť pre ACC
<code>safe_distance</code>	2000	min. časová vzdialenosť pre ostatné vozidlá
<code>distance_tolerance</code>	300	tolerancia časovej vzdialenosti pre plynulú jazdu
<code>lane_width</code>	36	šírka vozovky
<code>p_car_width</code>	18	šírka vozidla
<code>p_car_length</code>	45	dĺžka vozidla
<code>sensor_latency</code>	50	odozva radarového senzora
<code>sensor_range</code>	2000	dosah radarového senzora

Tabuľka 4.4: Nastaviteľné konštanty

4.2 Popis šablón modelu

V nasledujúcej sekcii budú popísané jednotlivé šablóny programu UPPAAL, z ktorých sa skladá celý modelovaný systém.

4.2.1 Hlavný kontrolný cyklus

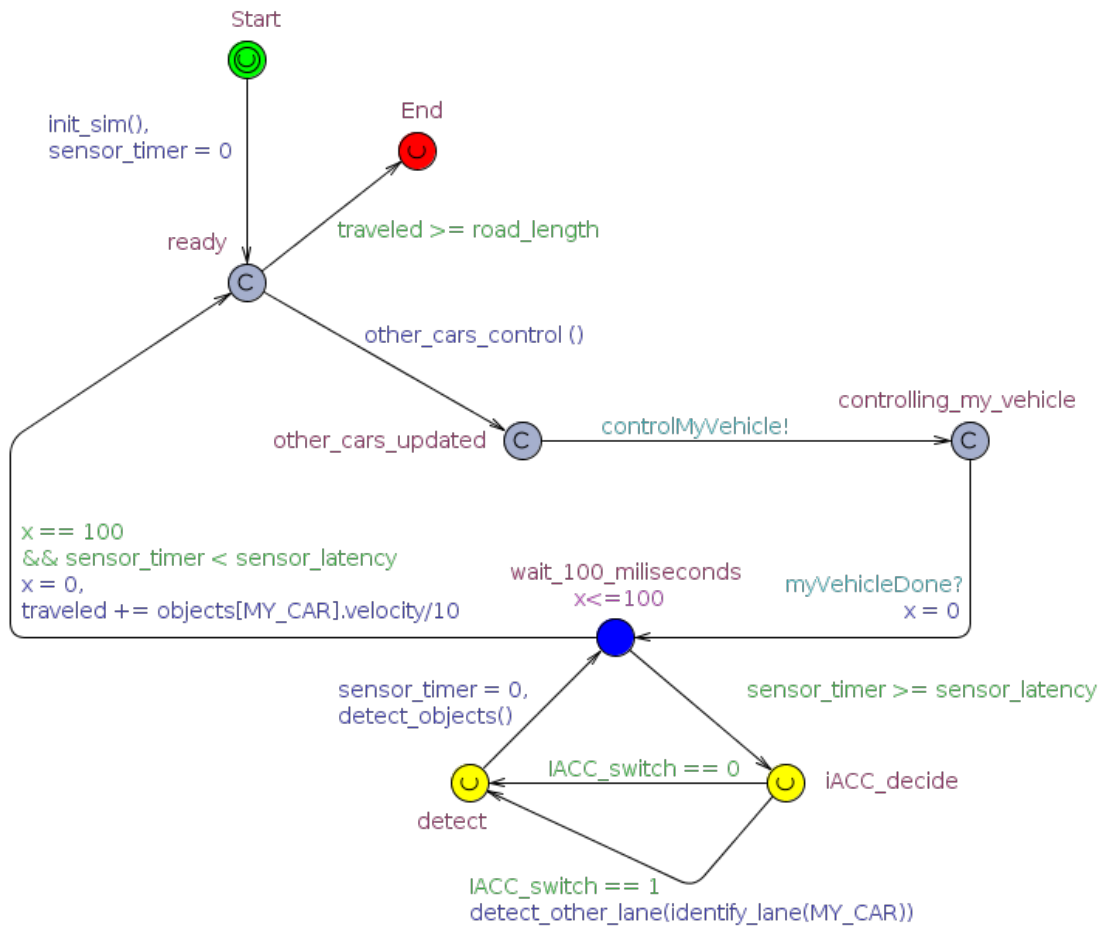
Šablóna `mainControl` zobrazená na obrázku 4.1 sa stará o riadenie celej simulácie. Počiatočný stav `Start` (označený zelenou farbou) je vstupom do simulácie. Konečný stav `End` označený červenou farbou je výstupom zo simulácie a za štandardného priebehu simulácie nastane, keď naše vozidlo prejde predom určenú vzdialenosť. Do stavu `End` sa však simulácia dostane aj pri prípadnej kolízii alebo inej poruche v simulácii.

Inicializácia experimentu

Po spustení prechádza automat po hrane do stavu `ready`, pričom sa na tejto hrane vykonáva nastavenie časovača senzoru na hodnotu 0 a zároveň je volaná funkcia `init_sim`. Jej úlohou je základná inicializácia modelu. Prebieha tu inicializácia dátových štruktúr `lane` a `object` popísaných v sekcii 4.1 na ich počiatočné hodnoty. Ďalej je volaná funkcia `place_my_car`, ktorá umiestni naše vozidlo do ľavého jazdného pruhu, pričom jeho zadná časť je na pozícii 0 v 2D priestore popisujúcom vozovku. Taktiež sú na vozovku rozmiestnené aj ostatné vozidlá v preddefinovaných počiatočných vzdialenostiach. Všetkým vozidlám vrátane nášho je zároveň vygenerovaná počiatočná rýchlosť a informácie o ich pozíciách sú priradené aj do štruktúry `lane`. Na záver sa všetkým vozidlám nastaví ich vzdialenosť od okolitých objektov, aby mohla byť zahájená simulácia premávky.

Pokiaľ je konštanta `simulate_lanechange` nastavená na nenulovú hodnotu, nastaví sa rýchlosť prvého vozidla v pravom pruhu tak, aby sa simulácia pokúsila vyvolať na úvod

svojho behu preradenie vozidla z pravého jazdného pruhu pred naše vozidlo. Tento jav je dôležitý pre overenie fungovania i-ACC a taktiež jeho porovnania s ACC.



Obr. 4.1: Riadiaci automat modelu

Kontrola okolitých vozidiel

Pri prechode do stavu `other_cars_updated` je vykonaná funkcia `other_cars_control` riadiaca správanie sa okolitých vozidiel. Funkcia prechádza postupne všetkými pruhmi zo štruktúry `lane` a upravuje rýchlosti jednotlivých vozidiel na základe ich časovej vzdialenosti k najbližšiemu vozidlu idúcemu pred nimi. Okolité vozidlá dokážu zrýchlovať ak je vzdialenosť bezpečná, tj. väčšia ako 2 sekundy ako bolo popísané v sekcii 3.3.6 a spomaľovať.

Pokiaľ je rozdiel rýchlostí vysoký a časová vzdialenosť malá, môže sa vozidlo pokúsiť o zmenu jazdného pruhu smerom doľava. Ak funkcia `check_if_lanechange_possible` nájde vo vedľajšom pruhu vhodnú medzeru medzi vozidlami, do ktorej je možné sa preraďiť, začína vozidlo vykonávať preraďovací manéver. V prípade, že takáto medzera nájdená nebola, zahajuje vozidlo núdzové brzdenie aby sa pokúsilo predísť zrážke.

Kontrola nášho vozidla

Pri prechode do stavu `controlling_my_vehicle` je kanálom `controlMyVehicle` vyslaný signál do šablóny `myVehicle`, ktorá riadi správanie nášho vozidla pomocou ACC alebo i-ACC. Táto šablóna bude popísaná v sekcii 4.2.2.

Beh času a detekcia pomocou senzorov

Po vrátení zo šablóny `myVehicle` automat prechádza do stavu `wait_100_milliseconds` vyznačeného modrou farbou, v ktorom beží čas simulácie, nakoľko sa nejedná o *committed* stav. V tomto stave zostáva po dobu 100 časových jednotiek, vyhodnocovaných pomocou hodín `x`, ktoré zodpovedajú 100 milisekundám.

Okrem hodín `x` v tomto stave bežia aj hodiny `sensor_timer` riadiace fungovanie senzoru tempomatu. Ak ich hodnota presiahne hodnotu odozvy senzoru určenej premennou `sensor_latency`, začne senzor v našom vozidle snímať svoje okolie v stavoch vyznačených žltou farbou. Spôsob snímania potom závisí od konštanty `IAAC_switch` určujúcej, po ktorej hrane zo stavu `IAAC_decide` prejdeme ďalej. Ak je i-ACC deaktivovaný, nevykonáva sa pri prechode do stavu `detect` žiadna funkcia navyše.

V prípade aktívneho i-ACC sa pri prechode vykoná aj detekcia susediaceho pruhu vo funkcii `detect_other_lane`. Táto funkcia skontroluje, či už do jazdného pruhu pred naším vozidlom nezasahuje preradujúce sa vozidlo. Ak áno, riadenie ovládania už odtiaľto zvládne aj samotný ACC, ktorý vie pracovať s vozidlami v našom pruhu. Pokiaľ žiadne preradujúce sa vozidlo v pruhu pred naším vozidlom nezistí, kontroluje relevantné vozidlá v susednom pruhu ako ilustroval obrázok 2.4. Kontrola prebieha v dvoch fázach, fyzickej a kontextovej. Kontextová predikcia analyzuje rýchlostné rozdiely a časové rozostupy sledovaných vozidiel a na ich základe rozhodne, či môže nastať preradenie. Fyzická predikcia sa riadi pozíciou vozidla v jazdnom pruhu a dokáže predpovedať preradenie, keď sa sledované vozidlo vychýli zo stredu svojho jazdného pruhu smerom k nášmu jazdnému pruhu.

Pri prechode zo stavu `detect` naspäť potom prebieha reset hodín `sensor_timer` a funkcia `detect_objects` detekuje situáciu v pruhu pred naším vozidlom a upravuje údaje o vzdialenostiach a rýchlostných rozdieloch vzhľadom k vozidlu pred naším vozidlom.

Návrat do stavu ready

Prechod po hrane do stavu `ready` prebehne po uplynutí 100 a viac časových jednotiek a za predpokladu, že zároveň netreba vykonať cyklus senzoru (stavy označené žltou farbou). Pri prechode sa resetujú hodiny `x` a k premennej `traveled` sa pripočíta vzdialenosť, ktorú v tomto cykle automatu prešlo naše vozidlo. Ak by v stave `ready` hodnota prejdenej vzdialenosti dosiahla požadovanú veľkosť, automat prechádza do koncového stavu `End` označeného červenou farbou.

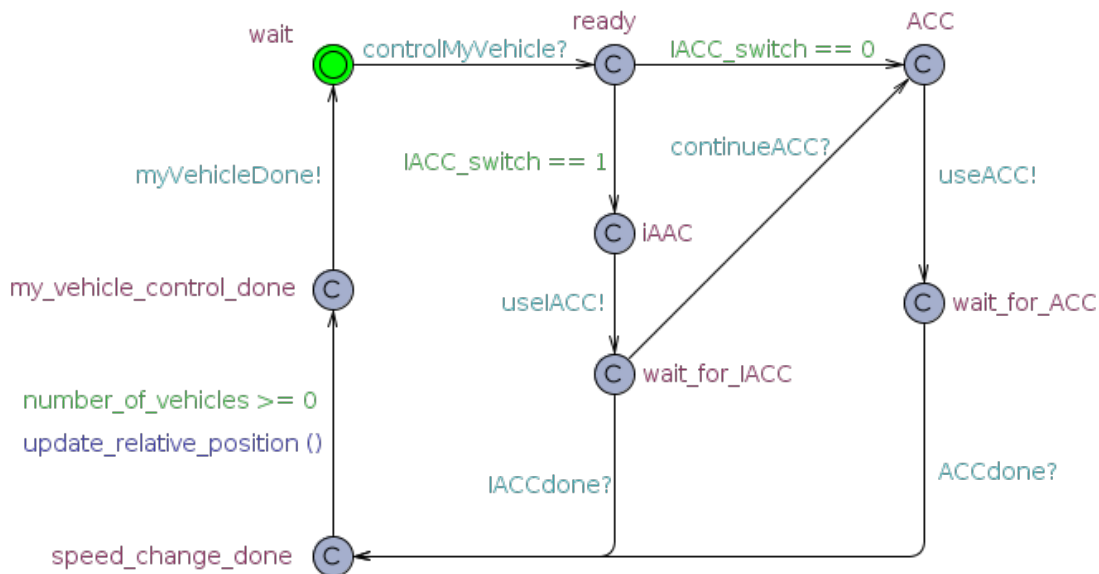
4.2.2 Ovládanie nášho vozidla

Fungovanie logiky nášho vozidla popisuje automat na obrázku 4.2. Po prijatí signálu zo šablóny `mainControl` prechádza automat z počiatočného stavu `wait` do stavu `ready`, v ktorom sa ďalej rozhoduje na základe konštanty `IACC_switch`. Pokiaľ je i-ACC aktívny, vysiela signál `useIACC` a simulácia pokračuje v šablóne `IACC` popísanej v sekcii 4.2.4. Ak je deaktivovaný, pokračuje simulácia v šablóne `ACC` popísanej v sekcii 4.2.3.

Špeciálny prípad nastáva, ak i-ACC nepredpovedá žiadne preradenie vozidiel zo susedných pruhov. Vtedy zo stavu `wait_for_iACC` prechádzame na základe signálu `continueACC`

do časti automatu ovládajúcej ACC, a teda riadenie vozidla predávame bežnému adaptívnemu tempomatu.

V poslednom kroku automatu sa vykonáva funkcia `update_relative_position`, ktorá aktualizuje relatívne pozície okolitých vozidiel vo vzťahu k nášmu vozidlu na základe relatívnych rozdielov rýchlostí. Funkcia sa taktiež stará o pohyb preradujúcich sa vozidiel v rámci 2D priestoru vozovky.



Obr. 4.2: Automat ovládania nášho vozidla

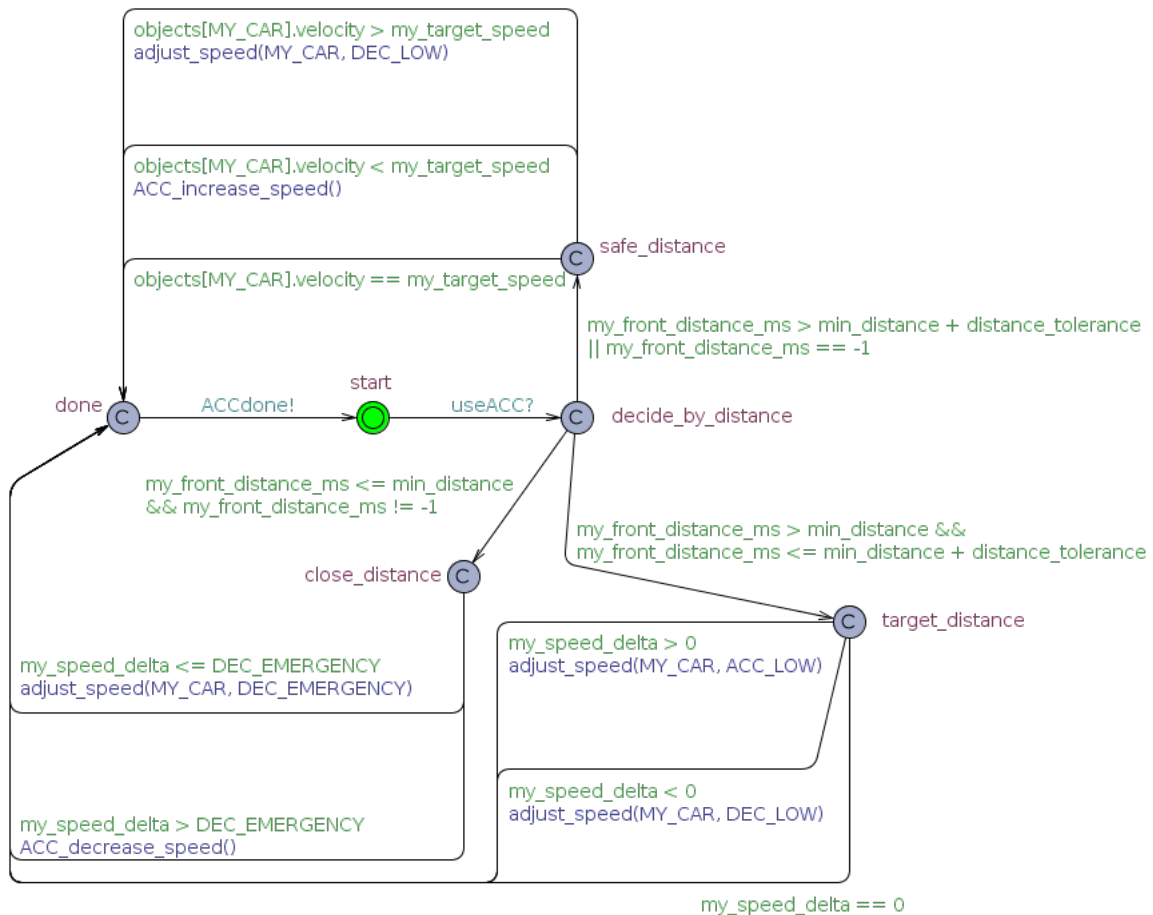
4.2.3 Logika ACC

Logiku fungovania ACC popisuje automat na obrázku 4.3. Po prijatí signálu zo šablóny `myVehicle` sa nachádza v stave `decide_by_distance`. Tu sa na základe časových vzdialeností rozhoduje, do ktorého stavu prejde.

Do stavu `close_distance` sa dostáva, ak je časová vzdialenosť k vozidlu pred našim vozidlom menšia ako minimálna vzdialenosť definovaná konštantou `min_distance`. Ďalej potom automat prechádza po hranách na základe relatívneho rozdielu rýchlostí medzi našim a vpredu idúcim vozidlom. Ak je rozdiel vyšší ako maximálna hodnota spomalenia, ktorú je naše vozidlo schopné vyvinúť, zahajuje núdzovú deceleráciu. Pokiaľ je rozdiel menší, zníži svoju rýchlosť prostredníctvom funkcie `ACC_decrease_speed`.

V prípade, že je časová vzdialenosť väčšia ako minimálna vzdialenosť a tolerancia vzdialenosti určená konštantou `distance_tolerance`, prejde automat do stavu `safe_distance`. Tu sa prechod po hranách riadi hodnotou cieľovej rýchlosti nastavenej pre tempomat určenej konštantou `my_target_speed`. Ak je aktuálna rýchlosť na požadovanej hodnote, neprebíha žiadna úprava rýchlosti vozidla. Pri nižšej ako cieľovej rýchlosti je rýchlosť zvýšená funkciou `ACC_increase_speed`, pri vyššej naopak znížená.

Pokiaľ je časová vzdialenosť väčšia ako minimálna a zároveň v intervale tolerancie vzdialenosti, prejde automat do stavu `target_distance`. V tomto stave sa ACC snaží udržiavať konštantnú vzdialenosť k vpredu idúcemu vozidlu. Na základe rozdielov rýchlostí je rýchlosť nášho vozidla potom upravovaná tak, aby sa rozdiel blížil alebo rovnal nule.

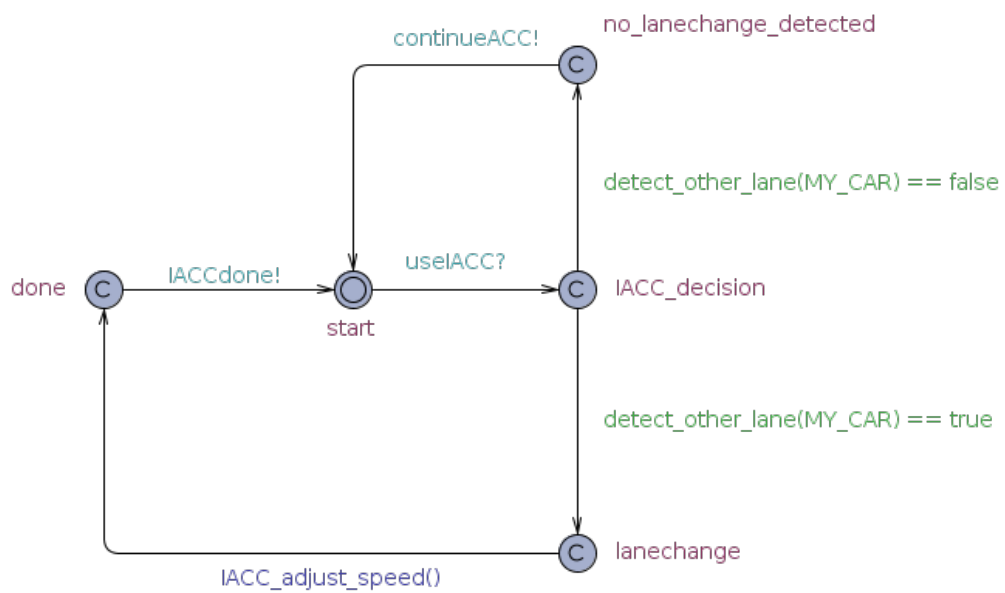


Obr. 4.3: Automat riadiaci správanie štandardného ACC

4.2.4 Logika i-ACC

Riadenie logiky i-ACC popisuje automat na obrázku 4.4. Po prijatí signálu zo šablóny `myVehicle` sa nachádza v stave `IAAC_decision`. Výsledok funkcie `detect_other_lane` popísanej v sekcii 4.2.1 potom rozhoduje, či je nutné použiť funkciu `IACC_adjust_speed` alebo ovládanie vozidla zvládne aj ACC, ktorému sa predá kontrola vyslaním signálu `continueACC`.

Funkcia `IACC_adjust_speed` znižuje rýchlosť vozidla ak je to nutné na základe časovej vzdialenosti a rozdielu rýchlosti medzi našim vozidlom a detekovaným preradujúcim sa vozidlom.



Obr. 4.4: Automat riadiaci správanie i-ACC

Kapitola 5

Overenie vlastností modelu

V tejto kapitole budú popísané a vyhodnotené experimenty, ktoré boli vykonané za účelom overenia funkčnosti modelu a jeho očakávaných vlastností. Ich primárnym zameraním je porovnanie správania sa vozidla v premávke s použitím ACC alebo i-ACC, pričom pre rôzne experimenty budú použité rôzne parametre modelu. Na záver budú vyhodnotené výhody a nevýhody jednotlivých systémov a ich celková bezpečnosť.

5.1 Funkcia ACC

V tejto sekcii bude demonštrované správne fungovanie adaptívneho tempomatu, ako je hlavne jeho schopnosť dodržiavať užívateľom stanovenú minimálnu vzdialenosť od vpredu idúceho vozidla a zároveň sa snažiť za dodržania týchto podmienok viesť vozidlo prednastavenou cieľovou rýchlosťou. Parametre pre túto simuláciu uvažujú s cieľovou rýchlosťou 360 dm/s (približne 130km/h), minimálnou nastavenou časovou vzdialenosťou 1000ms a s deaktivovanou funkciou i-ACC. Ostatné parametre sú v ich základnom nastavení popísanom v tabuľke 4.4. Ako môžeme vidieť na obrázku 5.1, model ACC dokáže viesť vozidlo v konštantnej vzdialenosti za vpredu idúcim vozidlom. Taktiež si dokázal poradiť s preradením vozidla do jazdného pruhu pred naše vozidlo bez toho, aby do neho narazil alebo sa priblížil na veľmi krátku vzdialenosť.

Simulácia bola spustená pomocou dotazu:

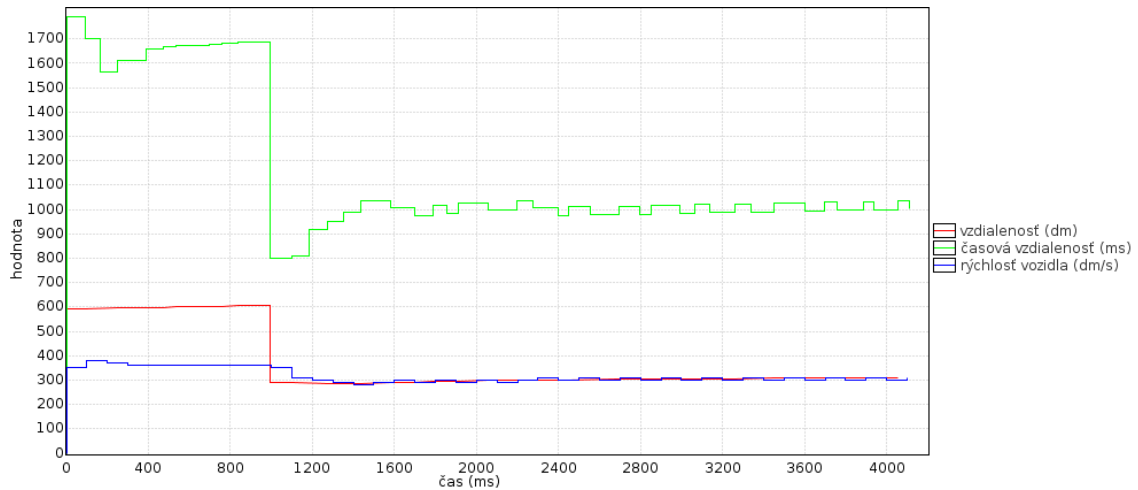
```
simulate 1 [<=10000]
{my_front_distance_dm, my_front_distance_ms, objects[MY_CAR].velocity}
```

5.2 Porovnanie systémov ACC a i-ACC

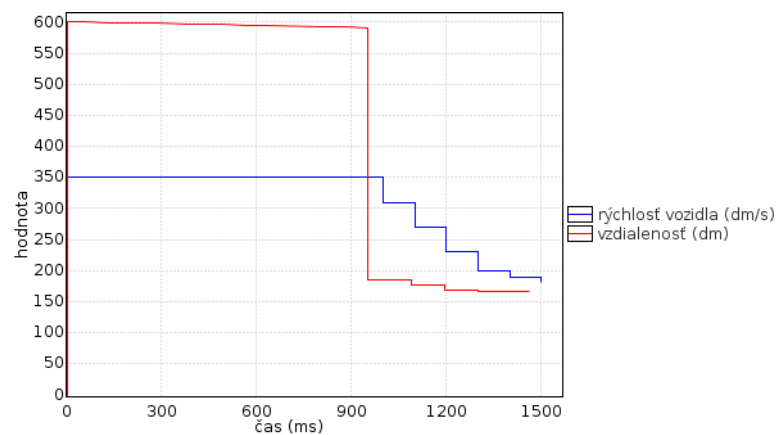
V nasledujúcej sekcii budú ukázané výsledky experimentov zameraných na porovnanie fungovania tempomatu s prediktívnou funkciou a bežného adaptívneho tempomatu. Model bol navrhovaný s predpokladom, že systém i-ACC by mal zabezpečiť v porovnaní s ACC vyššiu bezpečnosť jazdy a taktiež jej vyššiu plynulosť. Pre simulovanie porovnaní bude konštanta `simulate_lanechange` nastavená na hodnotu 1, aby sme vedeli porovnať správanie sa obidvoch tempomatov pri náhlom preradení sa vozidla z vedľajšieho pruhu pred naše vozidlo. Ostatné parametre modelu ako odozva alebo dosah senzoru zostávajú v pôvodnej konfigurácii popísanej v tabuľke 4.4.

Simulácia bola spustená pomocou dotazu:

```
simulate 1 [<=1500]{my_front_distance_dm, objects[MY_CAR].velocity}
```



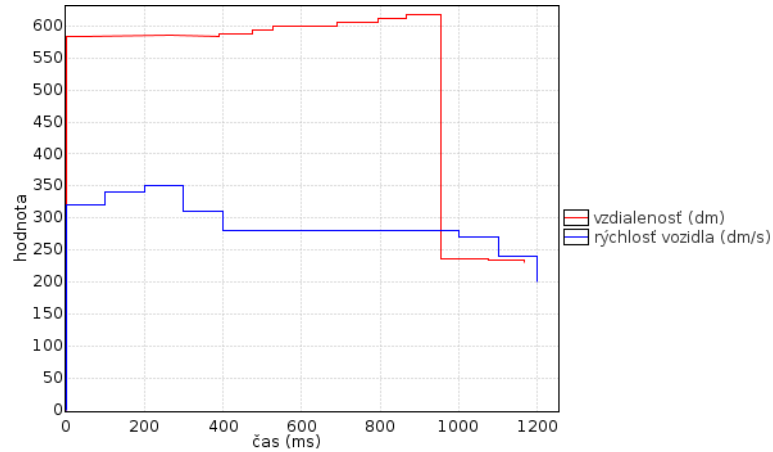
Obr. 5.1: Demonštrácia fungovania ACC



Obr. 5.2: Správanie ACC pri preradení sa iného vozidla pred naše vozidlo

Ako môžeme vidieť z obrázkov 5.2 a 5.3, rozdiel v správaní ACC v porovnaní s i-ACC je hlavne v spôsobe zmeny rýchlosti vozidla. U simulácie s ACC nedochádza k znižovaniu rýchlosti skôr ako sa preradujúce sa vozidlo dostane do jazdného pruhu pred naše vozidlo, čo môžeme vidieť ako náhly pokles vzdialenosti a časovej vzdialenosti. Vtedy systém vyhodnotí, že vzdialenosť je kritická a začína brzdiť s vysokou intenzitou aby sa dostal naspäť do bezpečnej vzdialenosti.

Pokiaľ sa pozrieme na graf s aktívnym i-ACC, môžeme vidieť, že hodnota rýchlosti sa v grafe znižuje s menšou intenzitou a taktiež znižovanie začína omnoho skôr, ako sa preradujúce vozidlo dostane do jazdného pruhu pred naše vozidlo. Ďalším dôležitým faktorom je vzdialenosť, na ktorú sa naše vozidlo priblíži k preradujúcemu sa. Kým u ACC je to len 170 dm, u iACC je táto vzdialenosť 230 dm. Keď porovnáme časové rozostupy tak u ACC klesla jeho hodnota k 500 ms, pokým u i-ACC bol na úrovni približne 850 ms. Tento fakt potvrdzuje, že detekovanie potenciálneho preradovacieho manévru funguje a je omnoho bezpečnejšie.

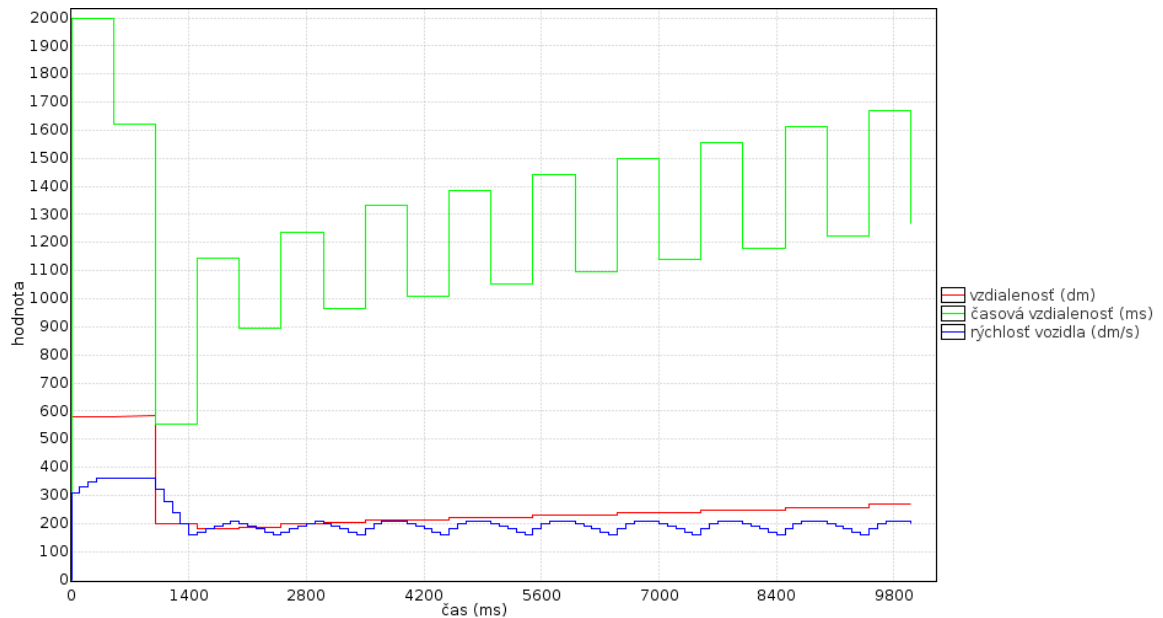


Obr. 5.3: Správanie i-ACC pri preradení sa iného vozidla pred naše

5.3 Vplyv zmeny odozvy senzorov na fungovanie i-ACC

V nasledujúcej sekcii budú ukázané experimenty, ktoré porovnávajú správanie sa systému za zhoršených poveternostných podmienok. Dážď, sneh alebo prípadná závada samotných senzorov môžu mať vplyv na schopnosť správneho fungovania tempomatu.

Uvažujme situáciu, kedy by odozva senzoru stúpla na 10 násobok svojej štandardnej odozvy, na 500 ms. Je taktiež zapnuté simulovanie preradenia vozidla, aby sme mohli pozorovať, či si aj pri takejto odozve dokáže tempomat zachovať bezpečnosť. Ostatné parametre modelu sú v pôvodnom stave a i-ACC je deaktivované. Simulácia bola spustená pomocou dotazu zo sekcie 5.1



Obr. 5.4: Simulácia ACC so senzorom s odozvou 500 ms

Ako môžeme vidieť z obrázka 5.4, tempomat si poradil s preradením vozidla do jazdného pruhu pred naše vozidlo. Avšak vysoká odozva senzoru zapríčiňuje, že sa naše vozidlo s ACC

nevie udržať v konštantnej vzdialenosti za vpredu idúcim vozidlom a jeho vzdialenosť aj rýchlosť osciluje. Takéto správanie je neželané, nakoľko jednou z hlavných výhod ACC by mala byť schopnosť udržiavať konštantnú rýchlosť a vzdialenosť.

5.4 Porovnanie dodržania minimálnych vzdialeností

V nasledujúcej sekcii budú ukázané výsledky experimentov, ktoré porovnávajú schopnosti ACC a i-ACC udržať sa v určitej bezpečnej vzdialenosti od vpredu idúceho vozidla pri krízovej situácii, ako je napríklad náhle preradenie sa iného vozidla do jazdného pruhu nášho vozidla. Pre tieto účely boli použité možnosti nástroja UPPAAL SMC(3.2.4). Dotazy do verifikátora vyzerali nasledovne:

```
Pr[<=10000] (<> objects[1].pos.between_lanes and my_front_distance_ms < x)
```

Premenná x určuje sledovanú vzdialenosť v milisekundách a boli za ňu postupne došádzané rôzne hodnoty. Dotaz zisťuje, s akou pravdepodobnosťou klesne hodnota časovej vzdialenosti v momente preradenia vozidla do pruhu pred naše vozidlo. Výsledkom je pravdepodobnostný interval, ktorý určuje, s akým rozmedzím pravdepodobnosti daný dotaz nastane. Výsledky týchto experimentov zobrazuje tabuľka 5.1. Parameter ε bol nastavený na základnej hodnote 0,05.

x	ACC	i-ACC
min_distance	[0.796, 0.895]	[0.513, 0.613]
900	[0.701, 0.801]	[0.205, 0.305]
800	[0.479, 0.578]	[0.004, 0.102]
700	[0.351, 0.451]	[0, 0.098]
500	[0.013, 0.112]	[0, 0.098]

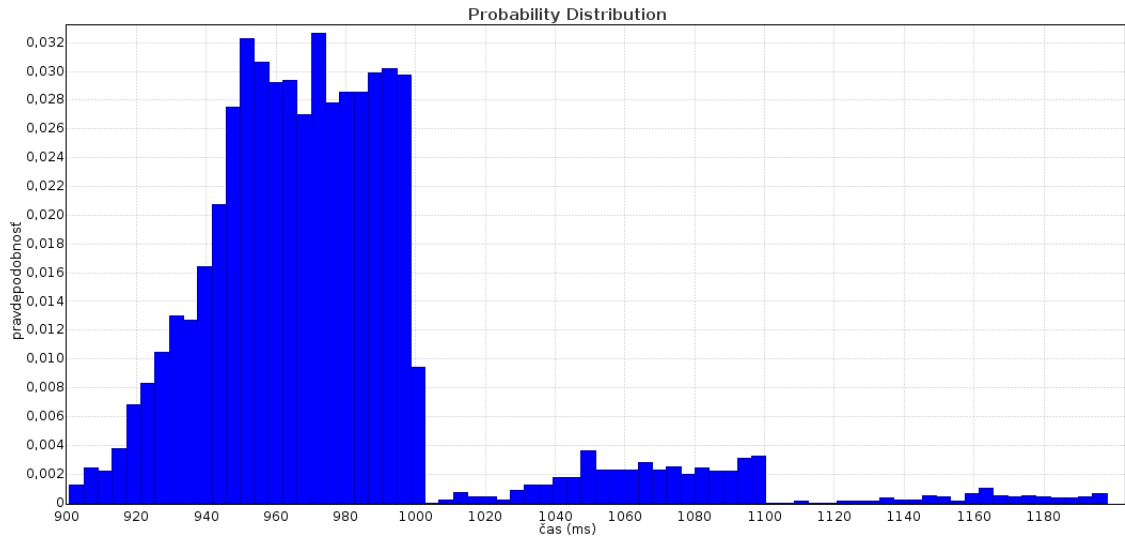
Tabuľka 5.1: Výsledky pravdepodobnostných dotazov

Ako môžeme vidieť z tabuľky, rozdiely v pravdepodobnostiach medzi ACC a i-ACC najlepšie demonštrujú schopnosti inteligentného adaptívneho tempomatu. Pri bežnom ACC je pravdepodobnosť klesnutia pri preradení pod minimálnu časovú vzdialenosť približne 85%, pričom u i-ACC je to približne 56%. Toto rozloženie pravdepodobnosti pre i-ACC popisuje aj graf 5.5. Pravdepodobnosť že sa s i-ACC dostaneme pod časovú vzdialenosť 800 ms a menej je potom približne 5%, zatiaľčo u ACC pri 800ms je to až 53%.

5.5 Zhrnutie výsledkov

Vlastnosti vytvoreného modelu boli štatisticky vyhodnotené v predchádzajúcich sekciiach. Vozidlo s použitím bežného ACC dokáže nasledovať pred ním idúce vozidlo, udržovať si od neho stanovený odstup ako bolo overené v sekcii 5.1. Porovnanie ACC s i-ACC zo sekcii 5.2 ukázalo, že vytvorený model inteligentného adaptívneho tempomatu dokáže včasne predikovať preradovací manéver prispôbiť mu rýchlosť plynulejšie a s väčšou bezpečnosťou ako bežný adaptívny tempomat.

Zvýšená odozva senzoru zo sekcii 5.3 demonštrovala vplyv poveternostných podmienok alebo chybného senzora na správanie sa tempomatu. Vplyv na bezpečnosť systému nebol zistený pre stanovené hodnoty odozvy, avšak spôsob jazdy vozidla bol radikálne zhoršený tým, že rýchlosť vozidla oscillovala.



Obr. 5.5: Graf rozloženia pravdepodobnosti pre i-ACC a hodnotu $x = \text{min_distance}$

Posledný experiment zo sekcie 5.4 bol zameraný na pravdepodobnostné dotazy týkajúce sa dodržania stanovených časových vzdialeností medzi naším vozidlom a preradujúcim sa vozidlom. Pomocou tohto experimentu vieme asi najlepšie ukázať výhody inteligentného adaptívneho tempomatu, ktorý sa dokázal udržať v stanovených vzdialenostiach s omnoho väčšou pravdepodobnosťou ako obyčajný adaptívny tempomat.

Kapitola 6

Záver

Cieľom tejto práce bolo spraviť rešerš v problematike tempomatov a modelovania systémov, na základe získaných informácií potom navrhnúť a implementovať model vozidla s inteligentným adaptívnym tempomatom v zvolenom realizačnom nástroji. Následne, v praktickej časti práce, bolo potrebné overiť požadované vlastnosti modelu pomocou vhodne zvolených testovacích dotazov.

Výsledkom praktickej časti práce bol model vozidla s ACC a i-ACC ako aj prostredia, v ktorom sa toto vozidlo pohybuje spoločne s ďalšími automobilmi. Implementácia je tvorená sieťou časovaných automatov v modelovacom, verifikačnom a simulačnom nástroji UPPAAL Stratego. Okolie vozidla pozostáva z 2D modelu jednosmernej viacpruhovej vozovky a okolitých vozidiel, slúžiacich primárne na demonštrovanie schopností vytvoreného modelu. Vozidlo dokáže udržiavať stanovenú rýchlosť, nasledovať pred ním idúce vozidlo a spomaľovať v prípade potreby. Nie je vybavené žiadnym systémom riadenia preto sa stále nachádza v jednom jazdnom pruhu. Ak je aktivovaný aj i-ACC, dokáže svoju rýchlosť upravovať aj na základe predpovedania preradenia okolitých vozidiel. Ostatné vozidlá v okolí vedia taktiež meniť svoju rýchlosť podľa potreby a ak si to situácia vyžaduje, dokážu sa preradovať medzi jazdnými pruhmi.

Zvolené vlastnosti modelu boli overené verifikátorom, ktorý je súčasťou modelovacieho nástroja UPPAAL. Pomocou týchto testov boli porovnané oba tempomaty (ACC, i-ACC) medzi sebou a zároveň či každý jeden spĺňa požiadavky na funkčnosť. Pri týchto experimentoch boli zistené veľké rozdiely v schopnostiach oboch tempomatov udržať aj v nepredvídateľných situáciách bezpečný rozstup, keď i-ACC potvrdil svoje rozšírené možnosti.

Nakoľko model sa zameriaval čisto na fungovanie tempomatov, bol obmedzený na 4 vozidlá a 2 jazdné pruhy, pretože viacej vozidiel ako tie z blízkeho okolia pre ich fungovanie nie je podstatných. Potenciálne smer pokračovania by mohol tieto limitácie odstrániť a tým by mohol umožniť overovanie vlastností prípadných plne autonómnych vozidiel, ktoré by boli schopné pohybovať sa medzi viacerými pruhmi a vozidlami. Ďalšou možnosťou by bolo zapracovanie zákrut na vozovke, nakoľko v realite nie je žiadna diaľnica dokonale rovná ako tomu bolo v našom modeli. Prípadným rozšírením by tiež mohlo byť pridanie iných prekážok na vozovku, napríklad rôznych dopravných obmedzení alebo chodcov a cyklistov.

Literatúra

- [1] *Adaptive cruise control* - set time interval* [online]. [cit. 1.5.2021]. Dostupné z: <https://www.volvocars.com/sk/support/manuals/v40/2017w17/driver-support/adaptive-cruise-control/adaptive-cruise-control---set-time-interval>.
- [2] *Bezpečná vzdálenost* [online]. [cit. 20.6.2021]. Dostupné z: <https://www.ibesip.cz/tematicke-stranky/zasady-bezpecne-jizdy-v-aute/bezpecna-vzdalenost>.
- [3] *Bosch Adaptive cruise control* [online]. [cit. 14.1.2020]. Dostupné z: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/driver-assistance-systems/adaptive-cruise-control/>.
- [4] *LIDAR vs RADAR for Applied Autonomy* [online]. [cit. 18.6.2020]. Dostupné z: <https://semcon.com/offerings/applied-autonomy/lidar-vs-radar-for-applied-autonomy/>.
- [5] *Long-range radar sensor* [online]. [cit. 1.7.2020]. Dostupné z: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/driver-assistance-systems/left-turn-assist/long-range-radar-sensor/>.
- [6] *Nissan Intelligent Cruise Control* [online]. [cit. 14.1.2020]. Dostupné z: <https://www.nissan-global.com/EN/TECHNOLOGY/OVERVIEW/icc.html>.
- [7] *Prehľad motorov* [online]. [cit. 10.5.2022]. Dostupné z: <https://www.skoda-auto.sk/modely/nova-octavia/octavia/porovnanie-motorov>.
- [8] *Safe following distances* [online]. [cit. 20.6.2021]. Dostupné z: <https://www.qld.gov.au/transport/safety/rules/road/distances>.
- [9] *Setting time interval for Adaptive Cruise Control* [online]. Volvo [cit. 20.6.2021]. Dostupné z: <https://www.volvocars.com/uk/support/manuals/xc90/2017w46/driver-support/adaptive-cruise-control/setting-time-interval-for-adaptive-cruise-control>.
- [10] *Simulink - Simulation and Model-Based Design - MATLAB & Simulink* [online]. [cit. 1.5.2021]. Dostupné z: <https://uk.mathworks.com/products/simulink.html>.
- [11] *UPPAAL Features* [online]. [cit. 5.6.2021]. Dostupné z: <https://uppaal.org/features/#uppaal-stratego>.
- [12] *Volkswagen Cruise control* [online]. [cit. 14.1.2020]. Dostupné z: <https://www.volkswagen.co.uk/technology/driver-assist/cruise-control>.

- [13] *A Guide to Lidar Wavelengths* [online]. Velodyne Lidar, November 2018 [cit. 18.6.2020]. Dostupné z: <https://velodynelidar.com/blog/guide-to-lidar-wavelengths/>.
- [14] Motorways. European Commission, Directorate General for Transport. [online]. February 2018, [cit. 15.6.2021]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/transport/road_safety/sites/default/files/pdf/ersosynthesis2018-motorways.pdf.
- [15] BOKARE, P. a MAURYA, A. Acceleration-Deceleration Behaviour of Various Vehicle Types. *Transportation Research Procedia*. 2017, roč. 25, s. 4733–4749. World Conference on Transport Research - WCTR 2016 Shanghai. 10-15 July 2016. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146517307937>. ISSN 2352-1465.
- [16] BROWNE, J. *Driving Safely with Automotive Radar Systems* [online]. Október 2019 [cit. 1.7.2020]. Dostupné z: <https://www.mwrf.com/technologies/systems/article/21849983/driving-safely-with-automotive-radar-systems>.
- [17] BULYCHEV, P., DAVID, A., LARSEN, K. G., MIKUČIONIS, M., BØGSTED POULSEN, D. et al. UPPAAL-SMC: Statistical Model Checking for Priced Timed Automata. *Electronic Proceedings in Theoretical Computer Science*. Open Publishing Association. Jul 2012, roč. 85, s. 1–16. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.4204/EPTCS.85.1>. ISSN 2075-2180.
- [18] CROWE, S. *Researchers back Tesla's non-LiDAR approach to self-driving cars* [online]. Apríl 2019 [cit. 5.7.2020]. Dostupné z: <https://www.therobotreport.com/researchers-back-teslas-non-lidar-approach-to-self-driving-cars/>.
- [19] DAVID, A., JENSEN, P. G., LARSEN, K. G., MIKUČIONIS, M. a TAANKVIST, J. H. Uppaal Stratego. In: BAIER, C. a TINELLI, C., ed. *Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, s. 206–211. ISBN 978-3-662-46681-0.
- [20] DAVID, A., LARSEN, K. G., LEGAY, A., MIKUČIONIS, M. a POULSEN, D. B. Uppaal SMC tutorial. *International Journal on Software Tools for Technology Transfer*. 2015, roč. 17, s. 397–415. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10009-014-0361-y>. ISSN 1433-2787.
- [21] GERD BEHRMANN, A. D. a LARSEN, K. G. *A Tutorial on UPPAAL 4.0*. November 2006.
- [22] KILIC, I., YAZICI, A., YILDIZ, O., ÖZÇELIKORS, M. a ONDOAN, A. Intelligent adaptive cruise control system design and implementation. *2015 10th System of Systems Engineering Conference, SoSE 2015*. Júl 2015, s. 232–237.
- [23] PERINGER, P. *Popis simulační knihovny SIMLIB* [online]. December 1997 [cit. 1.5.2021]. Dostupné z: <https://www.fit.vutbr.cz/~peringer/SIMLIB/doc/html-cz/SimLib-doc.html>.
- [24] PERINGER, P. *Modelování a simulace. Studijní opora*. VUT, 2012.

- [25] SCHMÜDDERICH, J., REBHAN, S., WEISSWANGE, T., KLEINEHAGENBROCK, M., KASTNER, R. et al. A novel approach to driver behavior prediction using scene context and physical evidence for intelligent Adaptive Cruise Control (i-ACC). In: *Future Active Safety Technology Towards zero traffic accidents (FAST-zero)* [online]. FISITA, September 2015 [cit. 14.1.2020]. Dostupné z: http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/222422/local_222422.pdf.