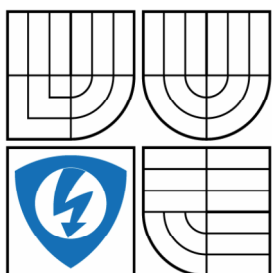


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

SIMULAČNÍ MODELY LIDSKÉHO OPERÁTORA

SIMULATION MODELS OF HUMAN OPERATOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

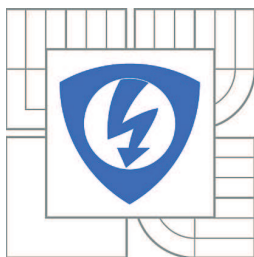
BC. PETR BOHÁČ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

ING. MARIE HAVLÍKOVÁ, PH.D.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Kybernetika, automatizace a měření

Student: Bc. Petr Boháč

ID: 115153

Ročník: 2

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Simulační modely lidského operátora

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Na základě literární rešerše vypracujte přehled modelů lidského operátora, zaměřte se na modely vhodné pro řízení vozidla při různých způsobech jízdy.
2. Prostudujte simulační modely vozidel, které poskytne externí pracoviště Ústavu automobilového a dopravního inženýrství FSI VUT Brno.
3. V prostředí Matlab/Simulink sestavte simulační modely řidiče pro vybraný nelineární model vozidla a definovanou jízdní trajektorii.
4. Realizujte simulace jízd nelineárního modelu vozidla vytvořeného externím pracovištěm UADI Brno. Výsledky simulací vizualizujte v prostředí Virtual reality toolboxu Matlab / Simulink.
5. Dosažené výsledky interpretujte a diskutujte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

1. HAVLÍKOVÁ, M. Člověk jako regulátor v systémech MMS. Automatizace, 2007, roč. 2007, č. 6, s. 388-389. ISSN: 0005-125.
 2. VLK, F.: Dynamika motorových vozidel: Jízdní odpory, hnací charakteristika, brzdění, odpružení, říditelnost, ovladatelnost, stabilita. Brno : 2000. ISBN 80-238-5273-6.
- Dle pokynů vedoucí práce

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 20.5.2013

Vedoucí práce: Ing. Marie Havlíková, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

Předseda oborové rady

Abstrakt

V této práci se zabývám simulačními modely lidského operátora při řízení příčné polohy vozidla. Porovnávám vlastnosti McRuerova modelu lidského řidiče a regulátoru PID. Simulovanou soustavou je jednostopý model vozidla. Simulovaný řidič má za úkol s tímto modelem vozidla projet dráhou losího testu. K nalezení optimálních parametrů modelu řidiče používám metodu simulovaného žíhání. Výsledné simulace následně zobrazuji pomocí 2D a 3D vizualizace. Na závěr provedu srovnání dosažených výsledků a úspěšnost modelů řidiče.

Klíčová slova

Jednostopý model vozidla, příčné řízení, McRuerův model řidiče, PID regulátor, predikce, simulované žíhání, losí test, 3D Vizualizace, Matlab.

Abstract

This paper deals with simulation models of the human operator controlling lateral position of simulated vehicle. I am comparing parameters and quality of the McRuer human driver model and the PID controller. Simulated system is single-track vehicle model. Simulated driver is tasked to pass a Moose test with this vehicle model. I am using the simulated annealing method to find optimal parameters of the driver model and then I visualize realized test in 2D and 3D visualization. In the end of this paper I compare simulations of the driver models and assess achieved results.

Keywords

Single-track vehicle model, lateral control, McRuer human driving model, PID controller, prediction, simulated annealing, moose test, 3D visualization, Matlab.

Bibliografická citace:

BOHÁČ, P. *Simulační modely lidského operátora*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 64 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Marie Havlíková, Ph.D..

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Simulační modely lidského operátora jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **20. května 2013**

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucí diplomové práce Ing. Marii Havlíkové, Ph.D. a odbornému konzultantovi Ing. Petru Porteši, Dr. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: **20. května 2013**

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod	9
1.1	Pozornost řidiče.....	9
2	Řízení vozidla.....	11
2.1	Příčné řízení	11
2.2	Modely příčného řízení	12
2.3	Analýza přistání pilotů	14
2.4	Ovladač typu Joystick	15
3	Model vozidla pro vodorovný pohyb	17
3.1	Model pneumatiky	19
3.2	Dynamické vlastnosti modelu vozidla	20
3.2.1	Jednotkový skok.....	23
3.2.2	Jednotkový impulz	26
4	Nelineární simulační modely.....	27
4.1	Model automobilu v prostředí Matlab/Simulink.....	27
4.2	Model řidiče	28
5	Simulace a optimalizace parametrů.....	30
5.1	Losí test	30
5.2	Predikce.....	34
5.2.1	Model predikce.....	34
5.2.2	Predikovaná vzdálenost.....	34
5.3	Optimalizace parametrů	39
5.3.1	Simulované žhání (<i>simulated annealing</i>).....	39
5.3.2	Funkce vyhodnocující nalezené řešení.....	40
5.3.3	Uložení výsledků.....	40
5.4	Nový přístup k vyhodnocení testu.....	41
5.4.1	Kritérium první.....	41
5.4.2	Kritérium druhé	43
5.4.3	Kritérium třetí.....	45
5.5	Výsledky simulace	47
5.6	Regulátor PID.....	48
6	Vizualizace	50
6.1	Vizualizace v 2D	50
6.2	Vizualizace ve 3D	51
6.3	Základní typy objektů	53
6.4	Model vozidla pro vizualizaci	54
7	Zhodnocení dosažených výsledků	57
8	Závěr.....	59

Seznam obrázků:

Obr. 1 Příčné řízení, sledování středové vodící čáry	11
Obr. 2 Diagram člověka při procesu řízení vozidla, podle [4 str. 296]	12
Obr. 3 Blokové schéma příčného řízení.....	13
Obr. 4 Přistávací manévry za bočního větru [6]	15
Obr. 5 Jednostopý rovinný dynamický model automobilu [1 str. 284]	17
Obr. 6 Působení boční síly na pneumatiku	19
Obr. 7 Závislost vratného momentu M_k na úhlu směrové výchylky α_k [8]	20
Obr. 8 Úhlové závislosti modelu vozidla [1].....	21
Obr. 9 Vykreslení trajektorie vozidla – jednotkový skok, rychlost $v = 50$ km/h.....	23
Obr. 10 Příčná poloha automobilu na vozovce při jednotkovém vstupním signálu	24
Obr. 11 Vykreslení trajektorie - jednotkový skok, rychlost $v = 100$ km/h	25
Obr. 12 Příčná poloha vozidla po impulzovém vstupním signálu.....	26
Obr. 13 Simulační schéma jednostopého modelu vozidla.....	27
Obr. 14 Závislost boční vodící síly S_k na výchylce kola α_k	28
Obr. 15 Predikce odchylky polohy vozidla y_e	29
Obr. 16 Uspořádání testu podle normy ISO 3888-2 [10]	30
Obr. 17 Uspořádání simulovaného testu a plánovaná trajektorie	31
Obr. 18 Žádaná hodnota w_y pro simulovaného řidiče	32
Obr. 19 Porovnání trajektorie simulovaného vozidla pro různé žádané hodnoty w_y	33
Obr. 20 Ukázka losího testu na vozovce [12].....	33
Obr. 21 Blokové schéma příčného řízení s predikcí	34
Obr. 22 Malá vzdálenost predikce při rychlosti $v = 80$ km/h	35
Obr. 23 Příliš vysokým akčním zásah, rychlost $v = 80$ km/h	36
Obr. 24 Trajektorie vozidla, rychlost $v = 80$ km/h, predikce 17 m.....	37
Obr. 25 Graf závislosti vhodné hodnoty predikce při různých rychlostech vozidla.....	38
Obr. 26 Minimalizace <i>fitness</i> funkce metodou simulovaného žití.....	40
Obr. 27 Trajektorie optimálního řidiče podle prvního kritéria	42
Obr. 28 Diagram vyhodnocení prvního kritéria.....	42
Obr. 29 Diagram vyhodnocení druhého kritéria	44
Obr. 30 Trajektorie vozidla řízeného optimálním řidičem podle druhého kritéria.....	45
Obr. 31 Diagram vyhodnocení třetího kritéria.....	46
Obr. 32 Trajektorie vozidla řízeného optimálním řidičem podle třetího kritéria	47
Obr. 33 Vizualizace trajektorie vozidla, kde došlo k překročení mezí určených kužely	50
Obr. 34 Souřadný systém MATLAB a VRML.....	51
Obr. 35 Blok VR Sink.....	52
Obr. 36 Okno V-Realm Builderu.....	53
Obr. 37 Vizualizace ve 3D v prostředí Matlab, vr_octavia.mdl	55
Obr. 38 Vizualizace 3D zepředu.....	56
Obr. 39 Vizualizace 3D zezadu z boku.....	56

1 ÚVOD

V současné době je často diskutovanou otázkou bezpečnost strojů řízených lidským operátorem. Ať už se jedná o automobilismus, letectví nebo průmysl. Všude je selhání člověka příčinou vážných nehod, které se bohužel často neobejdou bez ujmy na zdraví řidičího operátora či jiných osob. Mnoho vědeckých prací je věnováno tomu, jak z řízení lidský faktor zcela vynechat nebo alespoň jak sledovat a vyhodnotit jeho počínání.

Při řešení tohoto problému je potřeba popsat nejen dynamiku automobilu či jiného stroje, ale je zapotřebí také matematicky vyjádřit reakce a jednání řidiče. [1]

Cílem této práce je právě nalézt vhodné modely popisující reakce člověka při řízení automobilu. Při hledání budu vycházet z modelů lidského operátora, se kterými jsem pracoval již ve své bakalářské práci [2].

Testovaným modelem automobilu bude jednostopý rovinný model vytvořený panem Ing. Dr. Petrem Portešem z Ústavu automobilového a dopravního inženýrství FSI VUT Brno. Simulovaná trajektorie, kterou má hledaný řidič projet bude forma tzv. losího testu.

1.1 Pozornost řidiče

Trh s vestavěnými elektronickými systémy v automobilech se neustále rozšiřuje a poskytuje nové možnosti využití. Přes všechny výhody, které nám tyto systémy poskytují, rozvoj těchto zařízení nese i svá úskalí. Každé další zařízení totiž zvyšuje zátěž na pozornost řidiče během řízení. Vyrušení od hlavní úlohy, kterou je řízení, je nejčastější ve formě nedostatečného vnímání vizuálního vjemu. Děje se tak např. pokud řidič mění stanice na rádiu nebo sleduje nějaké zařízení. Tomuto typu vyrušení se říká „eyes-of-the-road“. [3]

Jiný typ rušení souvisí s mentálními procesy, jako je např. zpracování informace, rozhodování se a vybavování si paměti. Stává se to, pokud musí řidič svoji pozornost rozdělit například, aby mohl hovořit s cestujícími či vést hovor po telefonu. Patří sem i tzv. denní snění, kdy mozek podvědomě filtruje informace a vybírá z nich ty, které očekává. Informace, které jsou důležité pro danou situaci, tedy mohou uniknout jeho pozornosti. Tento fenomén se nazývá slepota z nepozornosti (inattention blindness). V důsledku této nepozornosti osoba nevidí objekt, přestože se na něj přímo dívá. [3]

Během výzkumu pozornosti řidiče [3] provedených jak v simulovaném prostředí, tak v reálném provozu vyplynulo, že např. vedení telefonního hovoru během řízení automobilu dvojnásobně zvýší šanci přehlédnutí dopravní značky. [3]

Stejně jako přetížení smyslových vjemů, kterému se většina prací věnuje, je třeba brát v úvahu, že naopak nedostatečné vytížení může vést k podcenění situace a

snížení pozornosti řidiče, k čemuž někdy dochází, pokud rychlost vozidla řídí tempomat.

Kvůli velkému riziku, doprovázejícímu řízení vozidel, mají velký význam výzkumy zaměřené nejen na dynamiku vozidel v krizových situacích, ale také výzkumy se zaměřením na schopnosti řidiče tyto situace s daným automobilem zvládnout.

2 ŘÍZENÍ VOZIDLA

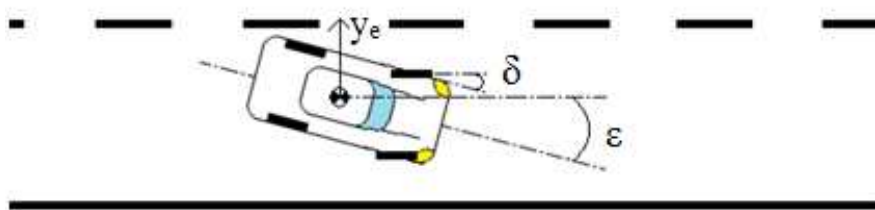
Pokud se na problematiku řízení vozidla podívám z hlediska regulace, jedná se o úlohu, při které řidič působí na soustavu vozidla změnou natočení kol, zrychlováním a brzděním. Na toto ovládání reaguje vozidlo, ne zcela v požadované hodnotě a někdy i v nežádoucím smyslu. O pohybech vozidla je řidič informován opticky (vychýlením směru jízdy) a mechanicky působením zrychlení a momentem na volantu. Řidič, vozidlo a okolí, ve kterém se pohybuje, tvoří regulační obvod. Vnější poruchy, které působí na vozidlo, pocházejí často z vozovky a z bočního větru. Určitý podíl mohou mít i vnitřní poruchy, jako jsou např. rozdílné síly působící na levou a pravou stranu vozidla při brzdění. [1]

Je možné od sebe navzájem odlišit dva různé typy řízení. Jedno je řízení vozidla v podélném směru, ve smyslu ovládání rychlosti přidáváním plynu a brzděním a druhé je řízení příčné, ovlivňující pozici na vozovce vůči krajnici nebo středu vozovky.

V této práci se zaměřím na řízení příčné, při konstantní rychlosti jízdy v .

2.1 Příčné řízení

Anglický ekvivalent příčného řízení je *lateral control*. V běžné řeči se tomuto typu řízení říká zatáčení. Úkolem řidiče je držet se při jízdě v jednom pruhu. Ten musí sledovat zatáčky a vyhnout se rizikům spojených s jejím projížděním. Tento druh řízení člověk vykonává kompenzačním způsobem. Porovnává svoji aktuální pozici a úhel natočení vozidla ε s požadovanou změnou směru jízdy vozidla. Řidiče zajímá především vzdálenost od krajnice a od středu vozovky y_e . Akčním zásahem je zde natočení volantu, které mění úhel natočení kol vozidla δ . Znázornění této situace je na obrázku Obr. 1.

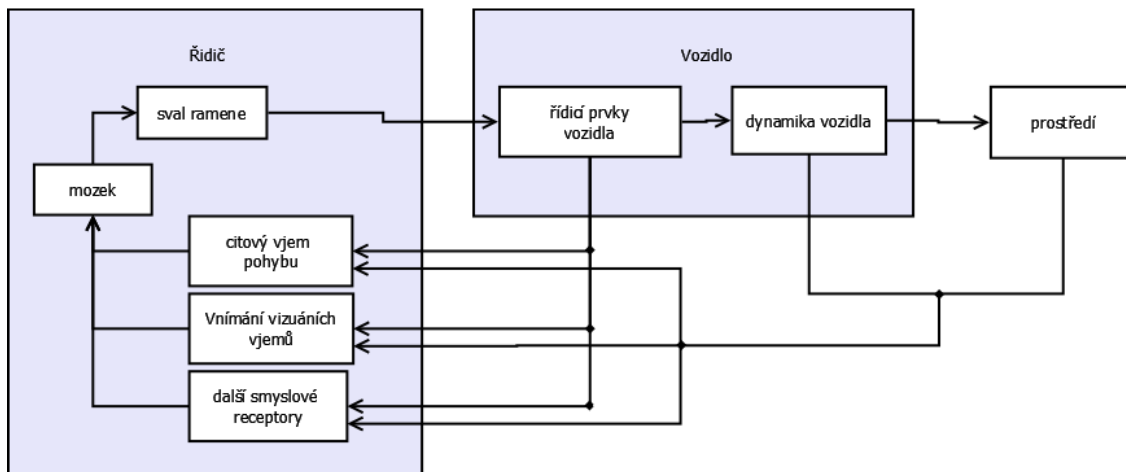


Obr. 1 Příčné řízení, sledování středové vodící čáry

ε úhel směru vozidla

δ úhel natočení kol

y_e vzdálenost od středu vozovky



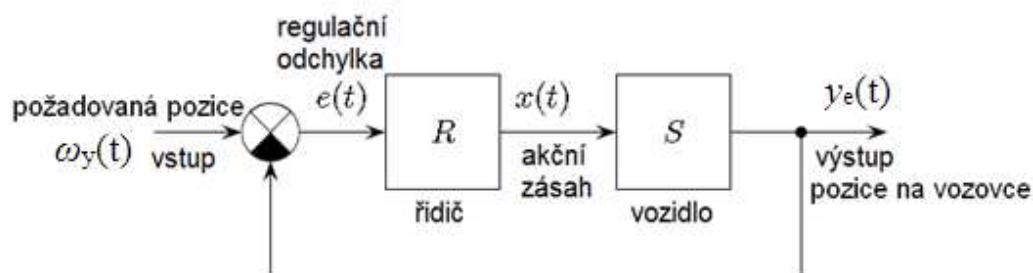
Obr. 2 Diagram člověka při procesu řízení vozidla, podle [4 str. 296]

Osoba řídící vozidlo získává informace o své pozici pomocí zrakového vjemu. Navíc získává další údaje, jako je velikost a směr zrychlení díky citlivým nervovým zakončením na povrchu těla. Svoje akční zásahy uzpůsobuje těmto získaným informacím a na základě nich reaguje natočením volantu. Tok informací při procesu řízení vozidla jsem zobrazil na diagramu Obr. 2. Lidský řidič zde působí jako regulační člen ve smyčce řidič - vozidlo. Tuto smyčku jsem znázornil blokovým schématem na obrázku Obr. 3.

Do problematiky příčného řízení spadá mnoho dalších podskupin tohoto řízení. Jako příklad mohu uvést parkování vozidla či manévr změny jízdního pruhu, kterým se budu v této práci zabývat hlouběji (kapitola 5.1).

2.2 Modely příčného řízení

Nejčastěji se příčné řízení modeluje pomocí kompenzačních modelů, protože je v řízení dominantní kompenzační složka. Regulátor srovnává požadovanou hodnotu $\omega_e(t)$ se zpětnou vazbou na současnou polohu $y_e(t)$ vozidla. Řidič R se snaží, dosáhnout takového stavu, aby odchylka obou hodnot $e(t)$ byla co nejmenší, nejlépe nulová. To mu umožňuje akční zásah $x(t)$, který je v tomto typu řízení úhlem natočení volantu. Ten má za následek vychýlení kol vozidla o úhel δ oproti středové ose vozidla. Pro změnu úhlu natočení celého vozidla ε je třeba, aby se vozidlo S pohybovalo. Pokud bude vozidlo v klidu, natočení volantu nebude mít žádný vliv na jeho pozici na vozovce.



Obr. 3 Blokové schéma příčného řízení

Řidiče R můžeme popsat pomocí diferenciálních rovnic nebo operátorového přenosu. Jeho parametry můžeme stanovit experimentem. Například nechám změřit akční zásahy řidiče při simulované jízdě. Ze získaných dat navrhnu operátorový přenos, který reakce řidiče nejlépe popisuje. Tento postup se v praxi běžně používá, jako příklad mohu uvést modelování reakcí pilotů řídících přistávající letadlo (kapitola 2.3). Je třeba ale počítat s tím, že každý člověk je individuální jedinec s jinou schopností řídit. Navíc je tato schopnost ovlivněna mnoha faktory, jako například únava či stres.

Při tvorbě modelu vycházíme z toho, že se řidič snaží kompenzovat regulační odchylku $e(t)$. Vysílá proto akční zásahy $x(t)$ směrem k regulované soustavě, tedy vozidlu.

Pro popis reakcí řidiče můžeme vyjít z přenosové funkce PID regulátoru $Y_{PID}(p)$ (2-1), který obsahuje složky proporcionální, integrační i derivační. Vlastnosti PID regulátoru charakterizuje integrační konstanta T_I a derivační konstanta T_D . Proporcionální složka je zastoupena zesílením K .

$$Y_{PID}(p) = K \left[1 + \frac{1}{T_I p} + T_D p \right] \quad (2-1)$$

kde K proporcionální složka – zesílení regulátoru,

T_I integrační časová konstanta,

T_D derivační časová konstanta.

Tato přenosová funkce však nevychází z fyziologického hlediska činnosti neuromuskulární soustavy člověka. Laicky řečeno, člověk nemá v hlavě přímo integrační či derivační člen, který by předal svalům odpovídající reakci. Skutečná odpověď na vjem je dána setrvačností a dobou zpoždění, které u člověka vzniká mezi vnímaným podnětem a reakcí na něj. Mnohem vhodnější je použití kompenzačního modelu řidiče, který má integrační charakter a zahrnuje i dopravní zpoždění $e^{-T_d p}$.

$$Y_K(p) = \frac{K}{p} \cdot e^{-T_d p} \quad (2-2)$$

Další model, který lze pro modelování člověka v příčném řízení použít byl popsán anglickým vědcem Arnoldem Tustinem, který se zabýval vlastnostmi lidského regulátoru ve zpětnovazebním manuálním řízení. Později byl tento model používán pro vytvoření autopilotů americkým vědcem McRuerem, jenž přiřadil časovým konstantám fyziologický význam.

$$Y_R(p) = \frac{K \cdot e^{-T_d p} (T_a p + 1)}{(T_n p + 1)(T_i p + 1)} \quad (2-3)$$

K konstanta reprezentující zvyklosti řidiče,

T_d dopravní zpoždění mezi očním vjemem a odezvou mozku,

T_i zpožďující setrvačná konstanta související s prováděním naučených stereotypů,

T_n setrvačná konstanta udávající zpoždění dané neuromuskulárním systémem,

T_a prediktivní konstanta závislá na zkušenosti řidiče.

Z práce paní Ing. Marie Havlíkové, Ph.D. [5] vyplývá, že zesílení K je voleno na základě regulované soustavy a zbylé parametry jsou si ve všech modelech podobné.

Neuromuskulární časová konstanta $T_n = (0 - 0,1)$ s,

Prediktivní časová konstanta $T_a = (0 - 2)$ s,

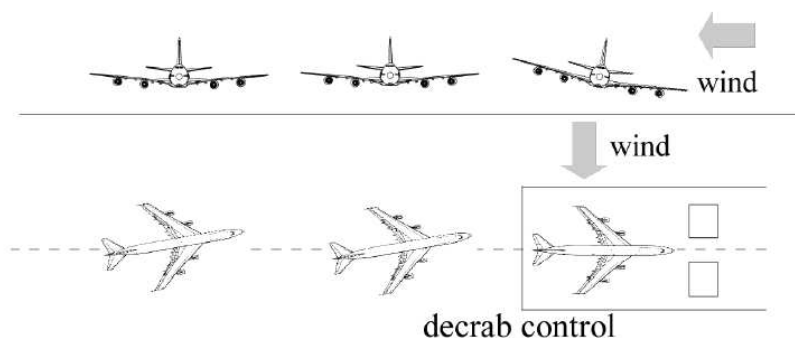
Setrvačná časová konstanta $T_i = (0,1 - 0,4)$ s,

Reakční doba řidiče $T_d = (0,12 - 0,3)$ s.

Výše uvedené modely jsou lineární, s výjimkou dopravního zpoždění $e^{-T_d p}$. V praxi se však v systémech člověk – stroj objevuje celá řada nelinearit, např. necitlivost. Složitější modely mnohem lépe popisují chování skutečných řidičů, ale problémem zůstává identifikace jejich parametrů.

2.3 Analýza přistání pilotů

K popisu dynamiky ovládání letounu piloty při náročném manévru přistání za bočního větru lze využít neuronové sítě [6]. Při tomto typu přistání se vnější podmínky mění velice rychle. Vlivem bočního větru se letoun začíná naklápět do strany, aby vykompenzoval působení bočních sil. Provádí se přistávací manévry „decrab control“, kdy se před letadla stočí proti větru, aby se vyrovnalo působení větru. Letoun se srovná s přistávací dráhou až těsně nad zemí. Tento způsob přistání je díky své komplexnosti velmi náročný. Pilot musí sledovat mnoho vjemů.



Obr. 4 Přistávací manévr za bočního větru [6]

Pro modelování reakcí pilotů vědci z Tokya vytvořili čtyři neuronové sítě: pro výškové kormidlo, pro klapky, pro plyn a pro směrové kormidlo. Při testech objevili zřetelné rozdíly mezi mladými piloty a zkušenými letci. Každý z nich měl jinou citlivost. Například mladí piloti řídili letoun mnohem agresivněji, měli větší zásahy do řízení. Naproti tomu u zkušených letců bylo vidět, že nevěnovali pozornost náklonu letadla a nebyli tedy tolik efektivní. V článku si toto autoři vysvětlují, jako cílené snížení zatížení vjemové soustavy. Ve výsledku na tom byly obě skupiny stejně. O co více mladí reagovali na množství podnětů, tím to starší piloti nahradili přesností svých reakcí při ovládání letadla.

Hlavním přínosem tohoto výzkumu pro moji práci není ani tak analýza různého způsobu ovládání letounu při přistávacím manévru, ale fakt, že lze přesně namodelovat chování každého z pilotů pomocí neuronových sítí. Pro model pilota použili čtyři neuronové třívrstvé sítě typu „feedforward“ s přenosovou funkcí hyperbolická tangenta. Na základě vstupních dat výšky horizontu, podélného úhlu a poloze přistávací dráhy a dalších vjemů, které lze získat vizuální cestou, pomocí neuronových sítí vypočítali tah motoru, polohu kormidla, křidélek a výškovky. Časové zpoždění vstupních dat nastavili na konstantní hodnotu $T_d = 0,2$ sekundy. Toto zpoždění představuje reakční dobu člověka.

2.4 Ovladač typu Joystick

Zavádění elektroniky do vozů přivedl nový způsob konstrukce ovládacích prvků vozidel. Systémy ovládání vozidla elektronicky bez přímé vazby („by-wire“) nahradily klasické mechanické spojení ovládacích prvků a akčních členů. Tato změna významně přispěla k bezpečnosti tím, že v případě čelního nárazu nevnikne do kabiny vozidla tyč od volantů napojená přímo na nápravu, protože byla nahrazena elektronickým propojením. Další výhodou je, že se snížilo množství síly nutné k ovládání vozidla. Natočení kol, motor vozidla i brzdy jsou v dnešních autech ovládány řídicí jednotkou. Nežádoucím důsledkem je, že řidič není schopen vnímat odporové síly působící na vozidlo. Většinou to sice nepůsobí žádné potíže, ale za určitých okolností může toto přerušení přímé vazby opozdit reakci řidiče.

Ruka řidiče a řídicí mechanismus tvoří jeden celistvý systém, jehož dynamiku můžeme popsat. Při vytváření ovládacích prvků se navrhuje jeho charakteristika tak, aby tlumicí koeficient řídicích prvků odpovídal impedanci lidské ruky. Vysoký koeficient tlumení sice vede k stabilitě systému, ale reakce na řídicí vstupy by byla příliš pomalá. Příliš malý koeficient zase naopak vede k příliš vysoké citlivosti a nestabilnímu chování vozidla.

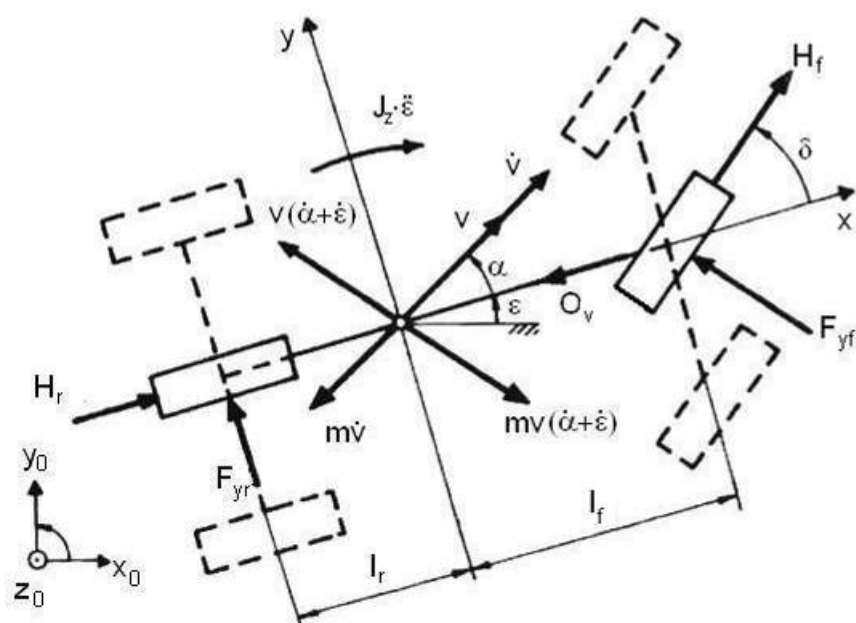
Problémem je, mění se viskozita koeficientu tlumení. Během experimentů bylo dokázáno, že se změna v okamžiku, kdy se blížíme k cíli [7]. Je tomu tak, protože se již nesnažíme o rychlé změny vůči požadované pozici, ale spíše se ji pokoušíme trefit přesně na cíl. Při experimentu se při rychlých pohybech snižoval koeficient tuhosti horní končetiny a zvyšoval se koeficient viskozity tlumení. Současně však tato viskozita závisí i na pozici, ve které se horní končetina nachází a důležitý je i směr pohybu, protože ten přímo ovlivňuje, jaké svaly se do pohybu zapojí. Závěr experimentu ukázal, že nejlepších výsledků včetně hodnocení subjektivní spokojenosti bylo dosaženo, když se koeficient viskozity nastavil podle časově proměnné impedance lidské ruky [7].

3 MODEL VOZIDLA PRO VODOROVNÝ POHYB

Zkoumaným modelem bude vozidlo jedoucí po určité trase bez výškových změn. Nedochází k naklápění vozidla a poloha těžiště se nemění.

Pro simulaci směrové dynamiky vozidla lze zvolit několik modelů. Jednodušším z nich je jednostopý rovinný model, tedy model s nulovým rozchodem kol. U tohoto modelu nedochází působením bočního zrychlení k naklápění vozidla a tedy přesunu těžiště, které by mělo za následek změnu chování kol. Boční síla F_{yr} , F_{yf} a hnací síla H_r , H_f působí přímo na nápravu. Předpokladem je, že řízení je absolutně tuhé a směrové výchylky levého a pravého kola jsou stejné. Tento model lze pro malé výchylky natočení kola δ linearizovat.

Ve své práci se zabývám pouze případem, kdy vozidlo jede konstantní rychlostí v , proto směrovou tuhost pneumatik C_α nebude ovlivňovat zrychlení či brzdění. Taktéž zanedbám vliv bočního větru. Rovnice popisující tento model lze nalézt v knize pana profesora Vlka Dynamika motorových vozidel. [1]



Obr. 5 Jednostopý rovinný dynamický model automobilu [1 str. 284]

Na nápravy působí hnací síla H_r , H_f , valivý odpor O_v a boční síla působící na nápravy F_{yr} , F_{yf} . Přední náprava je označena u veličiny písmenem f (*front*) a zadní náprava písmenem r (*rear*). V těžišti vozidla působí setrvačné síly $m\dot{v}$ a $mv(\dot{\alpha} + \dot{\epsilon})$, kde m je hmotnost vozidla. Proti natáčení vozidla z původního přímého směru jízdy působí setrvačný moment $J_z\ddot{\epsilon}$, přičemž J_z je hmotnostní moment setrvačnosti vozidla, vzhledem k svislé ose z_0 procházející těžištěm. Vzdálenost mezi nápravou a těžištěm je

označena l_r , l_f . Na vozidlo působí síla odporu vzduchu N . Rozdíl mezi tlakovým středem vzdušné síly a těžištěm je vzdálenost e .

Tento model mohu popsat třemi pohybovými rovnicemi:

$$\begin{aligned} -m\dot{v} \cos \alpha + m v (\dot{\epsilon} + \dot{\alpha}) \sin \alpha - \vec{F}_{yf} \sin \delta + \vec{H}_f \cos \vec{F}_{yf} + \vec{H}_z - \vec{O}_v &= 0 \\ -m\dot{v} \sin \alpha + m v (\dot{\epsilon} + \dot{\alpha}) \cos \alpha - \vec{F}_{yf} \cos \delta + \vec{H}_f \sin \vec{F}_{yf} + \vec{F}_{yr} + \vec{N} &= 0 \\ -J_z \ddot{\epsilon} + \vec{F}_{yf} l_f \cos \delta - \vec{F}_{yr} l_z + \vec{H}_f l_f \sin \delta + \vec{N} \cdot e &= 0 \end{aligned} \quad (3-1)$$

kde

- F_{yr} boční síla působící na zadní kola,
- F_{yf} boční síla působící na přední kola,
- H_r hnací síla působící na zadní kola,
- H_f hnací síla působící na přední kola,
- m hmotnost vozidla,
- v rychlost vozidla,
- C_α směrová tuhost pneumatik,
- O_v valivý odpor,
- J_z moment setrvačnosti vozidla,
- N odpor vzduchu,
- ϵ úhel natočení podélné osy vozidla,
- δ úhel natočení kol vozidla,
- α směr pohybu vozidla oproti jeho podélné ose,
- l_f délka vozidla od středu k přední nápravě,
- l_r délka vozidla od středu k zadní nápravě.

Pokud provedu linearizaci těchto rovnic, dostanu rovnice:

$$\begin{aligned} -m\dot{v} + \vec{H}_f \cos \vec{F}_{yf} + \vec{H}_z - \vec{O}_v &= 0 \\ -m v (\dot{\epsilon} + \dot{\alpha}) \vec{F}_{yf} + \vec{F}_{yr} + \vec{N} &= 0 \\ -J_z \ddot{\epsilon} + \vec{F}_{yf} l_f - \vec{F}_{yr} l_z + \vec{N} \cdot e &= 0 \end{aligned} \quad (3-2)$$

Boční síly působí na nápravy skrze směrovou tuhost pneumatik C_α . V případě, že budu zkoumat pouze případ, kdy vozidlo jede stálou rychlostí ($\dot{v} = 0$) a nebude mě tedy zajímat účinek bočního větru a omezím se na modely s řízením přední nápravy, mohu popsat vozidlo dvěma lineárními diferenciálními rovnicemi:

$$\begin{aligned} \left(m v + \frac{C_{\alpha f} l_f - C_{\alpha r} l_r}{v} \right) \dot{\epsilon} + m v \dot{\alpha} + (C_{\alpha f} + C_{\alpha r}) \alpha - C_{\alpha f} \vec{F}_{yf} &= 0 \\ J_z \ddot{\epsilon} + \frac{C_{\alpha f} l_f^2 - C_{\alpha r} l_r^2}{v} \dot{\epsilon} + (C_{\alpha f} l_f - C_{\alpha r} l_r) \alpha - C_{\alpha f} l_f \vec{F}_{yf} &= 0 \end{aligned} \quad (3-3)$$

Rovnice upravím na tvar:

$$\begin{aligned}\dot{\alpha} &= -\left(1 + \frac{C_{\alpha f} l_f - C_{\alpha r} l_r}{mv^2}\right) \dot{\varepsilon} - \frac{C_{\alpha f} l_f - C_{\alpha r} l_r}{mv} \alpha + \frac{C_{\alpha r} l_r}{mv^2} \vec{F}_{yr} + \frac{C_{\alpha f} l_f}{mv} \vec{F}_{yf} \\ \dot{\varepsilon} &= -\frac{C_{\alpha f} l_f^2 - C_{\alpha r} l_r^2}{J_z v} \dot{\varepsilon} + \frac{(C_{\alpha f} l_f - C_{\alpha r} l_r)}{J_z} \alpha - \frac{C_{\alpha r} l_r}{J_z} \vec{F}_{yz} + \frac{C_{\alpha f} l_f}{J_z} \vec{F}_{yf}\end{aligned}\quad (3-4)$$

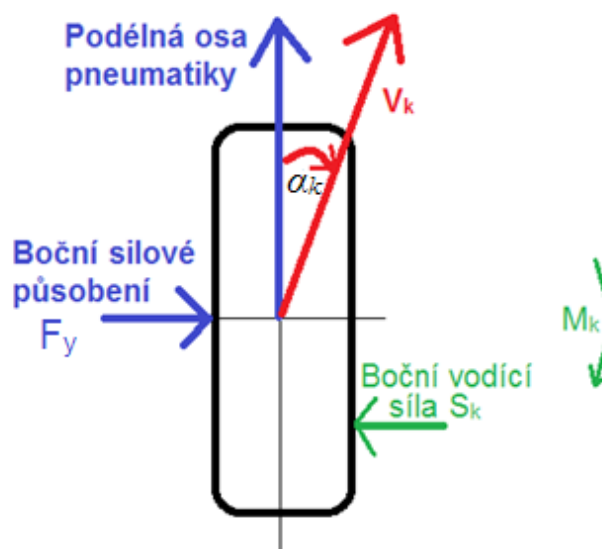
Polohu vozidla vůči počátečním souřadnicím vypočítám integrací úhlu směrové úchylny vozidla $\alpha(t)$ a úhlu natočení vozidla $\varepsilon(t)$:

$$\begin{aligned}x_0 &= \int_0^t v \cos(\alpha + \varepsilon) dt \\ y_0 &= \int_0^t v \sin(\alpha + \varepsilon) dt\end{aligned}\quad (3-5)$$

3.1 Model pneumatiky

Model pneumatiky představuje významnou část simulace chování automobilu na vozovce. Při průjezdu automobilu zatáčkou, působí na kola boční síly. Jejich působením na kolo se mění plocha, kterou se pneumatika dotýká vozovky. Reakcí na boční sílu je boční vodící síla kola S_k . Působení sil na pneumatiku má za následek pružnou deformaci, jejíž velikost je ovlivněna boční tuhostí pneumatiky a působící silou.

Pokud kolo projíždí zatáčkou, nepohybuje se vlivem bočních sil ve směru podélné osy pneumatiky, ale ve skutečném směru pohybu V_k , který vychýlen o úhel α_k .



Obr. 6 Působení boční síly na pneumatiku

Odvaluje-li se kolo se směrovou výchylnou, vznikají elementární síly tvořící boční vodící sílu kola S_k . Intenzita těchto sil je větší v zadní části styčné plochy pneumatiky. Důsledkem toho je boční vodící síla kola posunuta více vzad a na kolo

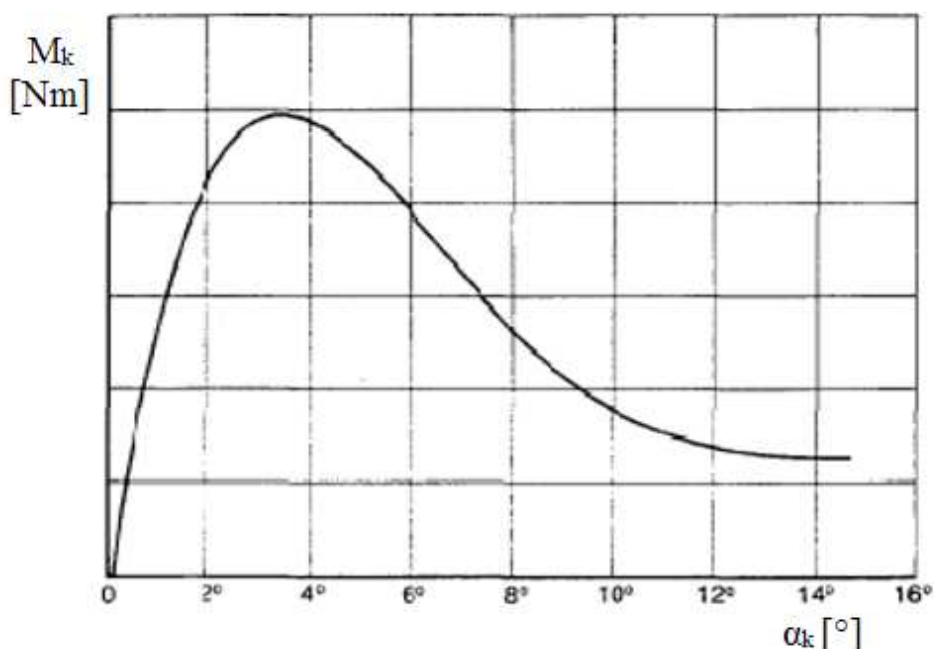
působí vratný moment M_k , který stáčí kolo do skutečného směru valení kola. Znázornění působení bočních sil F_y a S_k na pneumatiku je na obrázku Obr. 6.

Závislost boční vodící síly S_k na směrové výchylce kola α_k se zjišťuje experimentálně na dynamometrech nebo válcových stavech. Pro malé směrové výchylky α_k v rozsahu $<0^\circ; 3^\circ>$ lze závislost boční síly na úhlu směrové výchylky S_k vyjádřit vztahem:

$$\vec{S}_k = C_\alpha \alpha_k \quad (3-6)$$

kde C_α směrová tuhost pneumatiky.

Při úhlech výchylky kola α_k větších než 3° , je závislost boční vodící síly S_k na této výchylce nelineární a tím je na nelineární i závlek pneumatiky. Důsledkem toho je nelineární i závislost vratného momentu M_k působící na kolo při výchylce α_k (Obr. 7).



Obr. 7 Závislost vratného momentu M_k na úhlu směrové výchylky α_k [8]

Směrové vlastnosti pneumatiky jsou ovlivněny i dalšími faktory, jako například tlakem vzduchu v pneumatice, její konstrukcí a zatížením.

3.2 Dynamické vlastnosti modelu vozidla

Dynamika vozidla je dána neustálým působením vnitřních a vnějších sil působících na vozidlo. V případě, který zkoumám, jede vozidlo stálou rychlostí po vodorovné ploše, takže na vozidlo nepůsobí podélné ani kolmé zrychlení.

Při jízdě vozidla po kruhové dráze je úhel natočení předního kola β_p konstantní. Poloměr kruhové R dráhy je proměnlivý, v závislosti na dostředivém zrychlení. [1]

Pro případ rychlosti $v = 0$, jsou směrové úchyly náprav α_p , α_z nulové a střed zatáčení vozidla P_0 je dán poloměrem R_0 . [1]

$$R_0 = \frac{l}{\beta_p} \quad (3-7)$$

kde

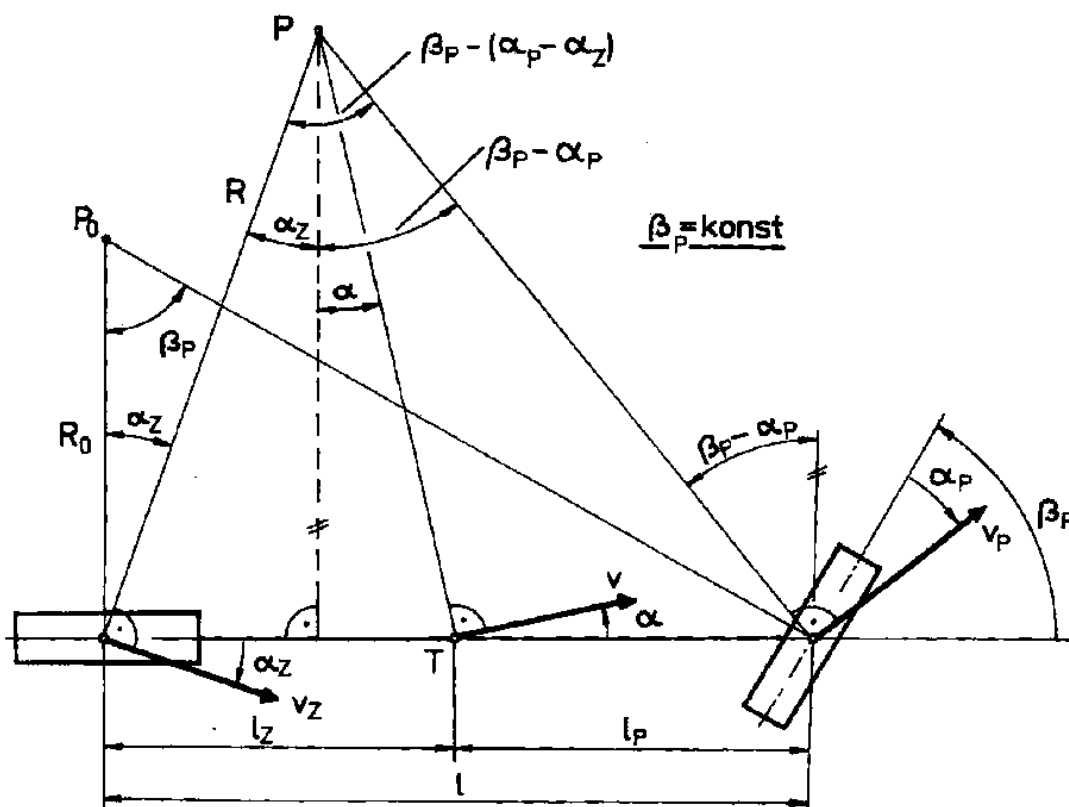
l délka vozidla

β_p úhel natočení předních kol

V případě, že rychlost jízdy $v \neq 0$, působí na vozidlo boční zrychlení a na nápravách vzniknou boční síly F_y a tedy i směrové výchylky kol α_p , α_z . Poloměr zatáčení R bude:

$$R = \frac{l}{\beta_p - (\alpha_p - \alpha_z)} \quad (3-8)$$

Při $R < R_0$ se jedná o nedotáčivost vozidla, při $R > R_0$ jde o přetáčivost vozidla. Situaci znázorňuje obrázek Obr. 8.



Obr. 8 Úhlové závislosti modelu vozidla [1]

Pro odvození přenosových funkcí využiji odvození z [1 stránky 303-306]. Pohybové rovnice pro lineární rovinný model automobilu převedu do Laplaceovy transformace. Tím dostanu obrazy pohybových rovnic, ze kterých získám tyto přenosové funkce:

$$\bar{F}_{\dot{\varepsilon}}^*(p) = \frac{\dot{\varepsilon}(p)}{\beta_p(p)} = \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\beta_p} \right)_{stat} \cdot \frac{1 + T_{\varepsilon}p}{1 + T_1p + T_2^2p^2} \quad (3-9)$$

$$\bar{F}_{\alpha}^*(p) = \frac{\alpha(p)}{\beta_p(p)} = \left(\frac{\alpha}{\beta_p} \right)_{stat} \cdot \frac{1 + T_{\alpha}p}{1 + T_1p + T_2^2p^2} \quad (3-10)$$

Kde

ε úhel natočení vozidla

β_p úhel natočení předních kol

$$T_1 = \frac{2\gamma}{\omega_0^2}; \quad T_2^2 = \frac{1}{\omega_0^2} \quad (3-11)$$

γ konstanta dozívání,

ω_0 vlastní úhlová frekvence kmitání netlumené soustavy.

Rovnice (3-9) a (3-10) lze rozdělit na statickou a dynamickou část, přičemž dynamická část má charakteristickou rovnici:

$$1 + T_1p + T_2^2p^2 = 0 \quad (3-12)$$

Po dosazení (3-11) má charakteristická rovnice tvar:

$$p^2 + 2\gamma p + \omega_0^2 = 0 \quad (3-13)$$

Charakteristická rovnice je druhého řádu. Podmínka stability je tedy splněna, mají-li všechny koeficienty charakteristické rovnice stejné znaménko [1]. Systém tvořený vozidlem je tedy stabilní pokud platí:

$$\gamma > 0; \quad \omega_0^2 > 0 \quad (3-14)$$

První podmínka $\gamma > 0$ je splněna vždy. Druhá podmínka ($\omega_0^2 > 0$) je splněna pokud:

$$1 + K \frac{v^2}{l} > 0 \quad (3-15)$$

kde

K faktor stability.

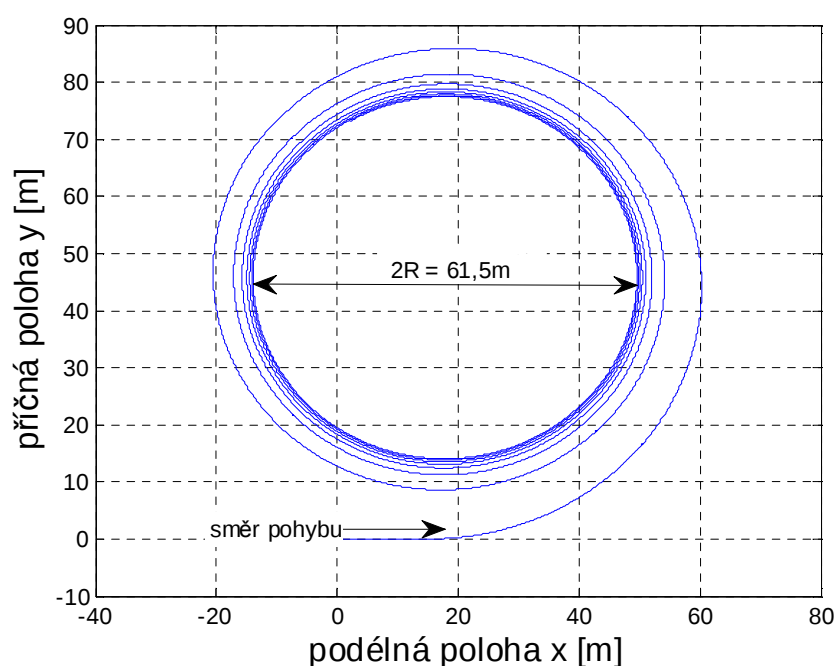
Pro $K > 0$ je vozidlo stabilní a má nedotáčivý charakter.

Pro $K < 0$ je vozidlo stabilní pouze do kritické rychlosti a má přetáčivý charakter.

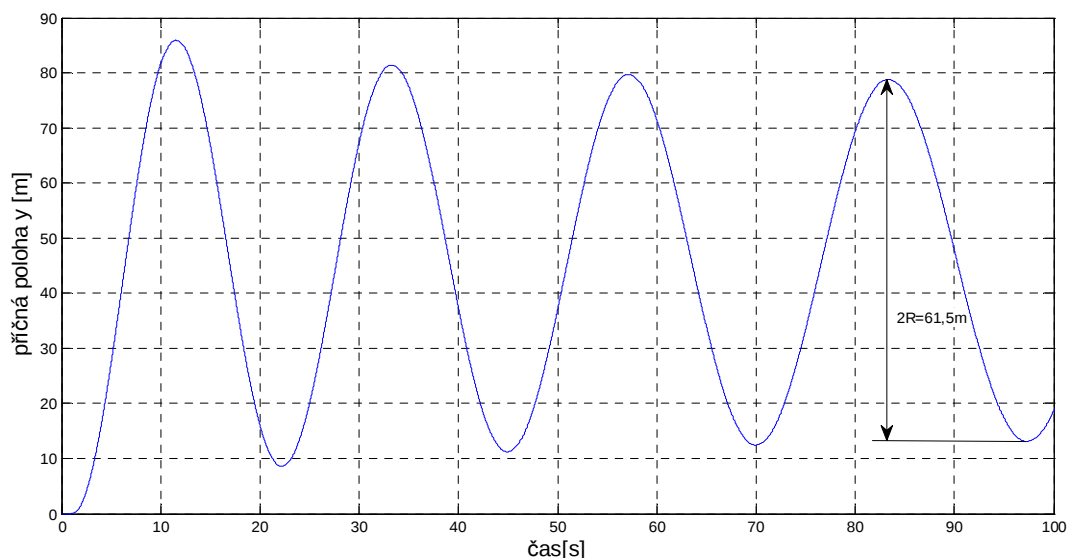
3.2.1 Jednotkový skok

K vyhodnocení dynamických vlastností modelu vozidla použiji řízení v otevřené smyčce. Jako vstupní signál modelu využiji skokovou změnu akčního zásahu $x(t)$. Tato situace by se dala popsat tak, že řidič jedoucí přímým směrem rychlostí 50 km/h v čase $t = 1$ s natočí volant automobilu tak, aby kola a podélná osa automobilu svírala úhel $\delta \neq 0^\circ$. Působení sil na pneumatiku má za následek pružnou deformaci, jejíž velikost je ovlivněna boční tuhostí pneumatiky C_α a působící silou F_y . Dále by tedy automobil měl neustále zatáčet a jezdit přibližně po kruhu o poloměru R .

Pro tento test jsem nastavil parametry tak, že v čase jedné sekundy přijde akční zásah jednotkový skok proporcionálně zesílený stokrát. Rychlost automobilu v průběhu testu jsem nastavil na $v = 50$ km/h.



Obr. 9 Vykreslení trajektorie vozidla – jednotkový skok, rychlost $v = 50$ km/h



Obr. 10 Příčná poloha automobilu na vozovce při jednotkovém vstupním signálu

Jak je vidět na Obr. 9 a Obr. 10, automobil neustále zatáčí a poloměr kruhu R , který obepisuje se postupně zmenšuje, jak se vyrovnává působení sil, než se velikost kruhu R ustálí. Automobil nezačne obepisovat kruh ihned, protože mu setrvačnost nedovolí přejít z pohybu přímočarého do pohybu po kruhu. Jízda po kruhu s neměnným poloměrem R se nazývá ustálené zatáčení.

Působením boční síly F_y na pneumatiku nejede vozidlo směrem natočení kol δ , ale odchyluje se od tohoto směru o úhel α_k , a jede tímto odchýleným směrem. Kvůli nelinearitě směrové tuhosti pneumatik C_α dochází k postupnému, ale nerovnoměrnému vyrovnání sil a teprve poté začíná vozidlo obepisovat stálý kruh. Pro simulaci ustálených parametrů vozidla jsem čas simulace prodloužil na tisíc sekund a nechal vozidlo kroužit po dráze.

Hodnoty parametrů vozidla při ustáleném zatáčení v rychlosti $v = 50$ km/h jsou:

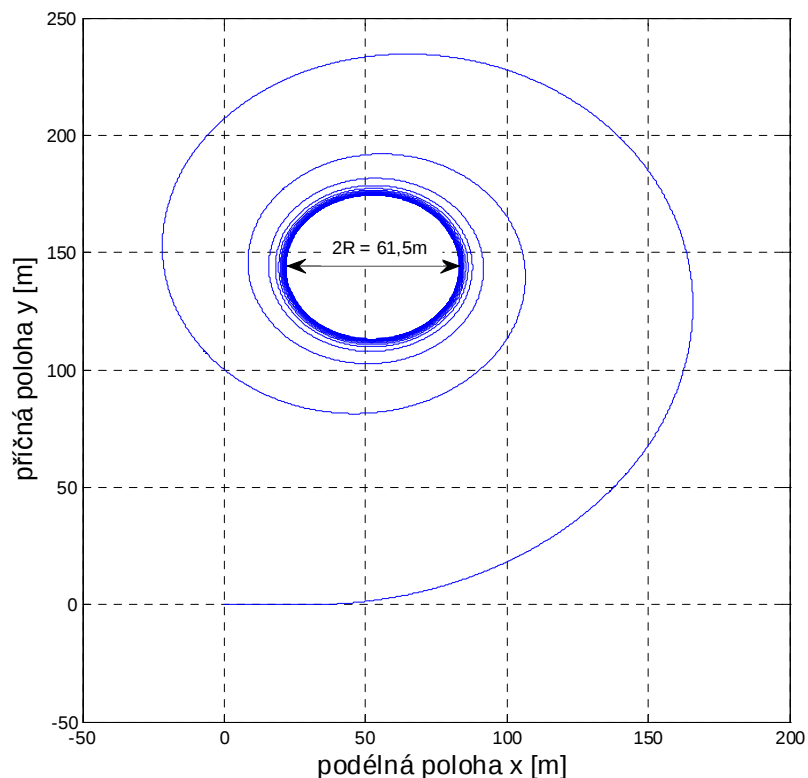
příčné zrychlení $a_y = 0,35 \text{ m/s}^2$,

úhel natočení kol $\delta = 4,76^\circ$,

směrová výchylka pneumatik $\alpha_k = 0,338^\circ$,

průměr kruhu, který obepisuje vozidlo $2R = 61,5 \text{ m}$

Při stejném testu, ale s vyšší rychlostí vozidla se prodlouží doba trvání přechodného děje, během kterého se vyrovnává působení sil, ale hodnoty parametrů ustáleného zatáčení zůstanou stejné. S vyšší rychlostí se nezmění ani poloměr obepisovaného kruhu.



Obr. 11 Vykreslení trajektorie - jednotkový skok, rychlost $v = 100 \text{ km/h}$

Ustálené zatáčení

Ustálené zatáčení je manévr, při kterém vozidlo během jízdy opisuje kruh. Často se jej využívá ke změření dynamických parametrů vozidla. Tyto parametry se pak mění v přímé závislosti na rychlosti jízdy vozidla v . [9]

Jednou ze základních charakteristik, o kterých lze z tohoto testu rozhodnout, je přetáčivost či nedotáčivost vozidla. Pokud při zvýšení rychlosti jízdy v musím pro udržení stejného úhlu zatáčení zvýšit i úhel natočení kol δ , je vozidlo nedotáčivé. Pokud při jízdě vyšší rychlostí naopak stačí nižší úhel natočení kol δ pro zatočení o stejný úhel, je vozidlo přetáčivé.[9 str. 627] Zvláštním případem je situace, kdy při zvýšení rychlosti jízdy není třeba měnit úhel natočení kol. Takové vozidlo se nazývá neutrální.

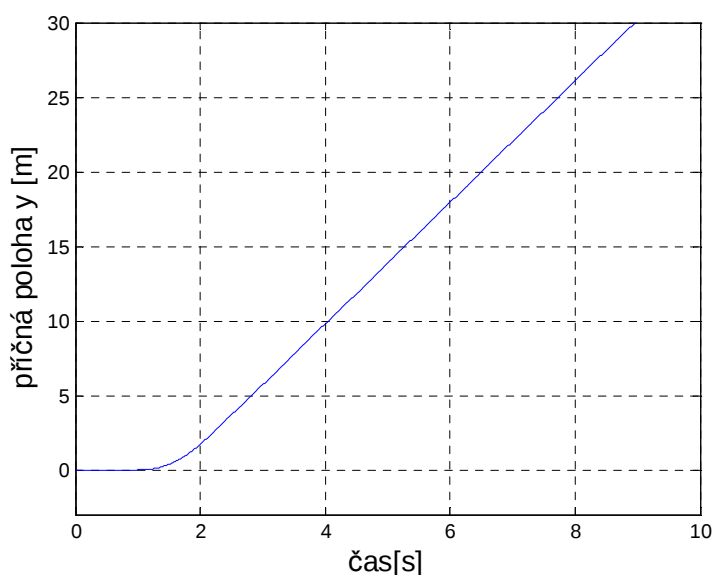
Pro shrnutí máme tedy následující typy vozidel:

- přetáčivá,
- neutrální,
- nedotáčivá.

Ze simulace odezvy na jednotkový skok už vím, jak se vozidlo při ustáleném zatáčení chová. Během tohoto testu jsem zjistil, že i při změně rychlosti jízdy v vozidlo obepisuje kruhovou dráhu se stále stejným poloměrem R , aniž bych měnil úhel natočení volantu δ . Model využívaný v simulaci má tedy charakteristiku neutrálního vozidla.

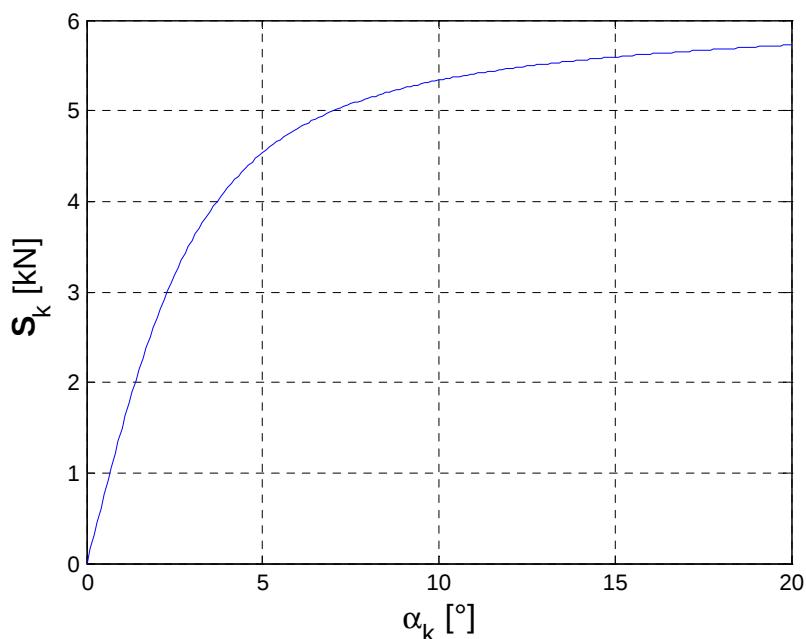
3.2.2 Jednotkový impulz

Dalším testem, kterým lze zjistit dynamiku soustavy je impulzová charakteristika. Vstupním signálem je Diracův impulz. Je to nekonečně vysoký a nekonečně úzký pulz s plochou rovné jedné. Takovýto pulz je však nerealizovatelný a proto použijí dva jednotkové skoky o stejné velikosti v časovém sledu za sebou, jeden kladný a druhý záporný. Tento vstupní signál zesílím stokrát, aby byl při simulaci znatelný. V reálném světě by analogií k tomu testu byla situace, při které by řidič prudce otočil volantem a po jedné sekundě jej opět prudce vrátil do původní polohy.



Obr. 12 Příčná poloha vozidla po impulzovém vstupním signálu

Na Obr. 12 je vidět, že vozidlo začíná zatáčet v průběhu trvání pulzu, tedy mezi $čas = 1\text{ s}$ a $čas = 2\text{ s}$. Dále vozidlo pokračuje v přímočaré jízdě směrem, kterým skončilo po odeznění pulzu a přechodného děje. Po skončení pulzu v $čas = 2\text{ s}$ na uvedených charakteristikách dochází ještě k vyrovnání sil působících na pneumatiku a postupnému snížení úhlu směrové výchyly vozidla α_k . Po vynulování směrové výchyly α_k již vozidlo pokračuje v rovnoměrném přímočarém pohybu směrem, kterým má natočenu osu vozidla.



Obr. 14 Závislost boční vodící síly S_k na výchylce kola α_k

4.2 Model řidiče

Pro simulaci průjezdu automobilu po dané trajektorii potřebuji navrhnout regulační člen, který bude upravovat výchylku natočení volantu $x(t)$ takovým způsobem, aby jedoucí automobil následoval předem danou trasu s dostatečnou přesností. Pokud zadanou trasou bude trajektorie vozidla projíždějícího místy vymezenými kužely při tzv. losím testu, budu považovat za správný výsledek ten, při kterém řidič dokázal projet, aniž by shodil jediný kužel.

Cílem této práce je ověřit, zda existují modely člověka, které zvládnou úlohu řízení tohoto nelineárního modelu automobilu. Proto při tvorbě regulačního členu, řídicího automobilu budu vycházet z McRuerových modelů pro příčné řízení systémů typu člověk-stroj.

$$Y_R(p) = \frac{K \cdot e^{T_d p} (T_a p + 1)}{(T_n p + 1)(T_i p + 1)} \quad (4-2)$$

K konstanta reprezentující zvyklosti řidiče,

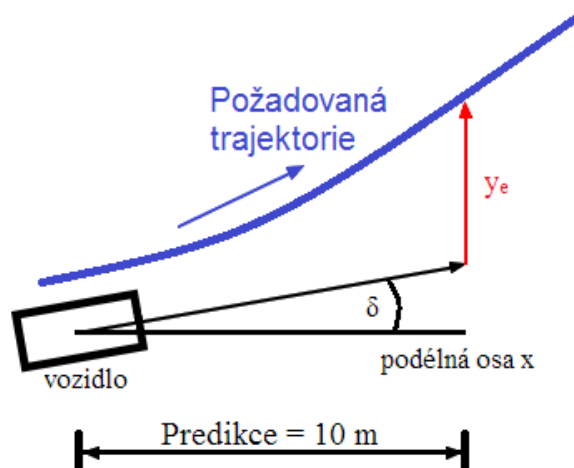
T_d dopravní zpoždění mezi očním vjemem a odezvou mozku,

T_i zpožďující setrvačná konstanta související s prováděním naučených stereotypů,

T_n setrvačná konstanta udávající zpoždění dané neuromuskulárním systémem,

T_a prediktivní konstanta závislá na zkušenosti řidiče.

Protože jsou tyto modely pouze lineární přenosové funkce s dopravním zpožděním, nepopisují chování člověka při různých způsobech řízení automobilu. Během úlohy řízení člověk nevyhodnocuje situaci jen podle současné pozice na vozovce, ale předvídá polohu, do které se dostane během krátkého okamžiku. Míra toho, jak daleko musí řidič odhadnout svoji pozici, samozřejmě závisí na rychlosti automobilu. Pro účely simulace, kde automobil pojede rychlostí $v = 50 \text{ km/h}$ předpokládám, že vzdálenost do které řidič predikuje trajektorii vozidla je kolem deseti metrů. Pro výpočet odchylky polohy vozidla y_e od plánované trajektorie vezmu rozdíl mezi pozicí v místě vzdáleném deset metrů od současné polohy, na které by se vozidlo dostalo, kdyby již dále neměnilo směr jízdy a požadované polohy v tomto místě.



Obr. 15 Predikce odchylky polohy vozidla y_e

Rozdíl mezi predikovanou polohou vozidla a požadovanou polohou považuji za regulační odchylku y_e , kterou má za úkol řidič zmenšit na co možná nejmenší hodnotu.

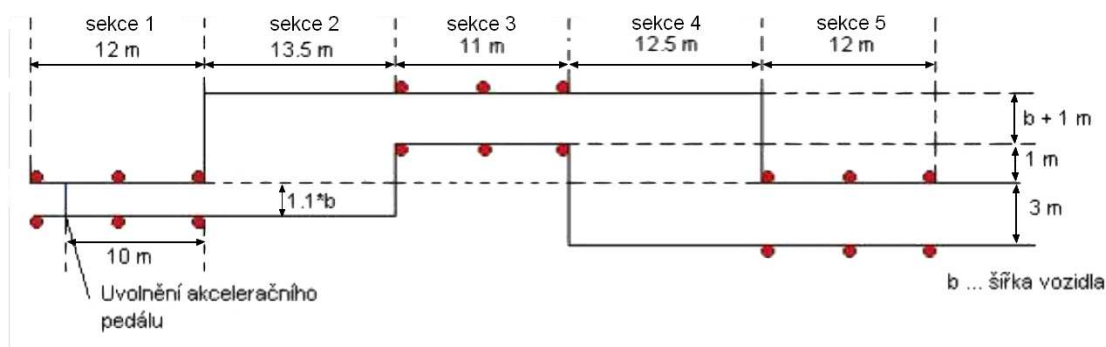
McRuerův model řidiče, ze kterého budu při simulaci vycházet, obsahuje konstantní zesílení, přechodovou funkci a dopravní zpoždění. Výstupem z modelu je přímo regulační zásah (control signal), tedy úhel natočení volantu. Celý model řidiče je v čase neměnný.

5 SIMULACE A OPTIMALIZACE PARAMETRŮ

5.1 Losí test

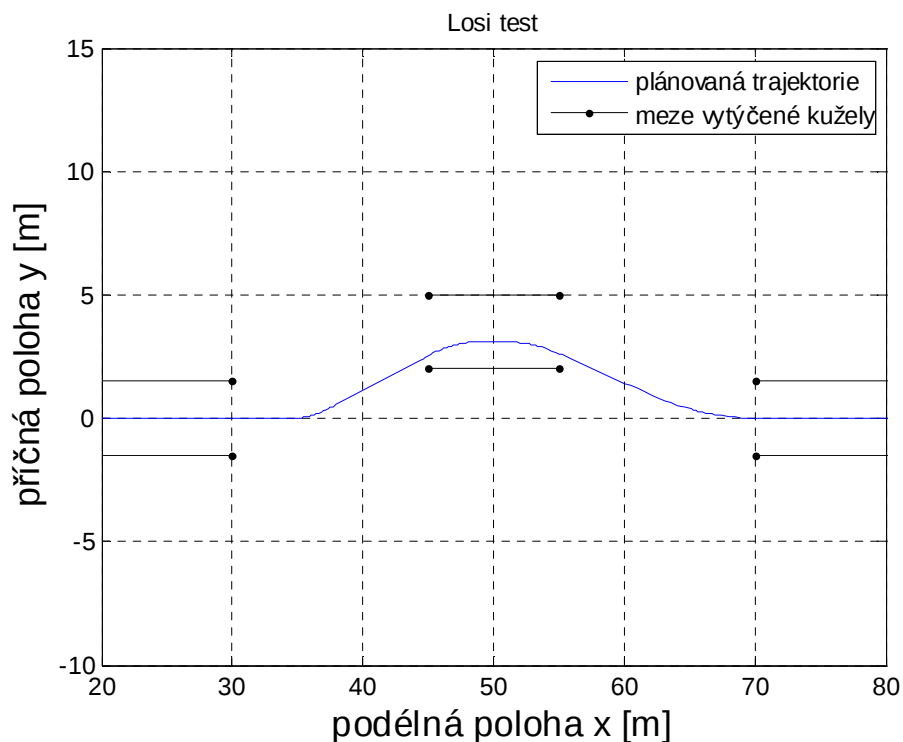
Pro vyhodnocení schopnosti regulátoru řídit simulovaný automobil jsem vybral manévr změny jízdního pruhu, někdy též nazývaného „losí test“. Tato zkouška je příkladem krizové situace, při které je řidič nucen náhle vyhnout překážce na vozovce.

Primárním cílem této zkoušky je ověřit stabilitu vozidel. Parametry testu upravuje norma ISO 3888-2. Úkolem řidiče je projíždět co možná nejvyšší možnou rychlostí.



Obr. 16 Uspořádání testu podle normy ISO 3888-2 [10]

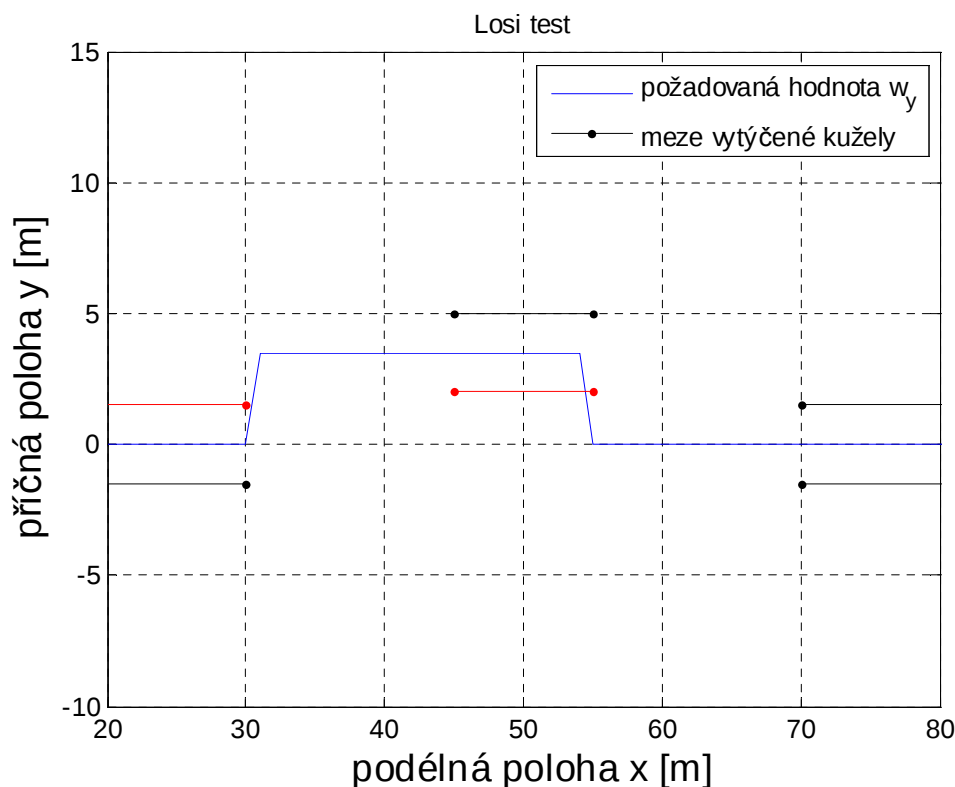
Pro účely vyhodnocení testu jsem musel vzdálenosti pozměnit, aby vyhovovaly požadované trajektorii dodané panem Ing. Dr. Petrem Portešem, proto simulovaný test neodpovídá normě. Shoduje se s testem použitým v práci [11]. V mém případě pojede vozidlo konstantní rychlostí v a při první změně jízdního pruhu v sekci 2 bude mít prostor 15 metrů místo původních 13,5 metrů. Vzdálenost mezi pruhy se z původního jednoho metru snížila jen na půl metru. Šířka jízdního pruhu ve všech sekcích je shodně 3 metry. Prostor pro druhou změnu jízdního pruhu sekce 4 tvoří opět 15 metrů. Vyhodnocovaný test tedy není tolik náročný, jako test podle normy ISO 3888-2 na obrázku Obr. 17.



Obr. 17 Uspořádání simulovaného testu a plánovaná trajektorie

Na Obr. 17 je zobrazen limit pro splnění testů černými čarami. Ve skutečnosti bývá trasa vytyčena kužely. Modře je zobrazena plánovaná trajektorie, po které se snaží řidič danou trasu projet.

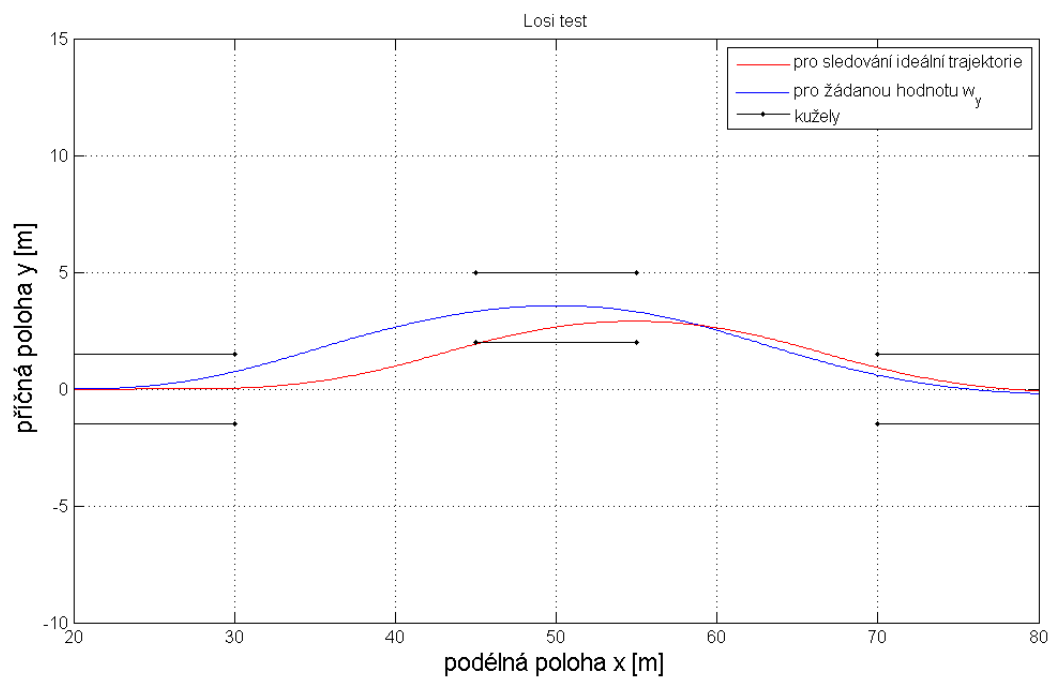
Jak jsem při simulacích zjistil, tak není příliš vhodné, aby měl regulační člen jako požadovanou hodnotu w_y plánovanou trajektorii z obrázku Obr. 17, ale aby používal jako žádanou hodnotu středy pruhů vytyčených kužely (Obr. 18). To znamená, že žádanou hodnotou, ze které určím regulační odchylku e , budou středy spojnic mezi kužely ležících na stejné pozici na příčné ose x .



Obr. 18 Žádaná hodnota w_y pro simulovaného řidiče

Při jízdě vyšší rychlostí samozřejmě není možné, aby simulovaný řidič projel dráhou losího testu přesně podle této upravené žádané hodnoty w_y a srazil tak červeně vyznačené kužely na obrázku Obr. 18. Neumožní mu to setrvačnosti řízené soustavy, zde modelu vozidla. Výsledná trajektorie bude podobná spíše původní plánované trajektorii Obr. 17.

Provedl jsem několik simulací pro různé parametry modelu řidiče. Když srovnám trajektorie průjezdu dráhou pro model, který si jako požadovanou hodnotu bere ideální trajektorii Obr. 17 a model, který vychází z žádané hodnoty w_y Obr. 18, je zcela zřejmé že je vhodnější použít žádanou hodnotu w_y , tedy středy mezi kužely. Pro porovnání obou výsledných trajektorií pro různé žádané hodnoty znázorním rozdíl na obrázku Obr. 19. Obě simulace proběhly při stejné rychlosti a parametrech modelu řidiče, lišily se pouze žádanou hodnotou w_y .



Obr. 19 Porovnání trajektorie simulovaného vozidla pro různé žádané hodnoty w_y



Obr. 20 Ukázka losího testu na vozovce [12]

5.2 Predikce

5.2.1 Model predikce

Při řízení člověk používá přibližný odhad pohybu vozidla, tedy provede takový akční zásah $x(t)$, aby se mu v budoucnu podařilo regulační odchylku $e(t)$ přiblížit co nejvíce k nule. Takové modely se nazývají prediktivní.

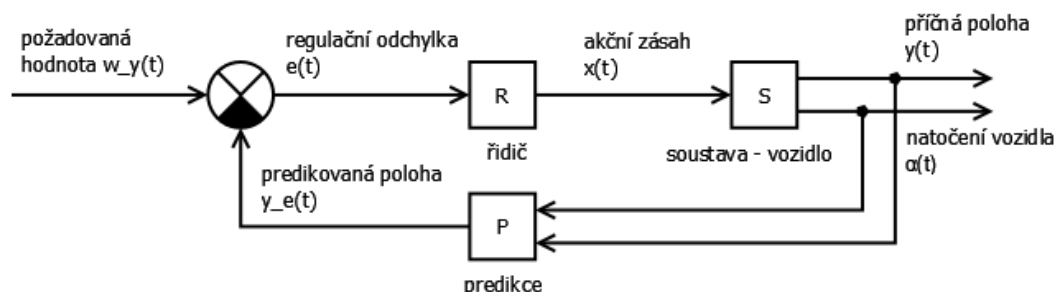
Velký vliv má zde to, jak moc je daný řidič seznámen s vozidlem. Během jízdy je schopnost odhadu omezena dohledem. K jeho snížení dochází například před nepřehlednou zatáčkou.

Prediktivní řízení zobrazené na obrázku Obr. 21 probíhá velmi podobně jako kompenzační řízení na obrázku Obr. 3. Člověk se snaží akčními zásahy $x(t)$ vynulovat regulační odchylku $e(t)$. Rozdílem je však, že řidič určuje regulační odchylku $e(t)$ pro odhad hodnoty výstupu y_e . Odhad představuje hodnotu výstupu, do které se soustava dostane, po do které se má k dispozici hodnoty požadované veličiny $w(t)$ i do budoucna. Prediktivní schopnost lze namodelovat jako přenosovou funkci $P(p)$.

$$P(p) = e^{T_p p} \quad (5-1)$$

kde

T_p .. konstanta určující míru predikce



Obr. 21 Blokové schéma příčného řízení s predikcí

Modely, ve kterých řidič předvídá budoucí trajektorii svého vozidla, se hodí k popisu situací, kde dochází k velkým změnám příčných zrychlení vozidla $\ddot{y}$. Ty nastávají například při průjezdu vozidla zatáčkou či při provádění manévru předjíždění.

5.2.2 Predikovaná vzdálenost

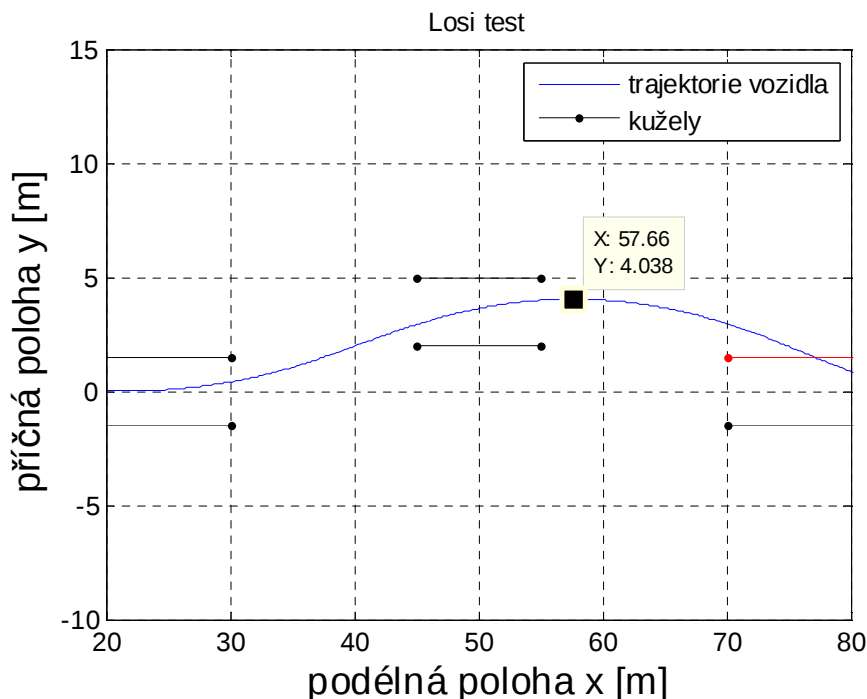
Při hledání parametrů modelu řidiče, který dráhou losího testu projede pokud možno co nejvyšší rychlostí v , a nesrazí přitom žádný kužel, jsem zjistil, že hlavní omezujícím prvkem nejsou ani tak samotné parametry modelu řidiče, jako spíš vzdálenost na jakou predikují odchylku příčné polohy vozidla y_e od plánované trajektorie w_y .

Pokud chci otestovat, jakou rychlostí dokáže řidič dráhu projet, musím si předem stanovit, z jaké vzdálenosti se bude vypočítávat odchylka. Tato vzdálenost je v modelu nastavena jako parametr „preview.“

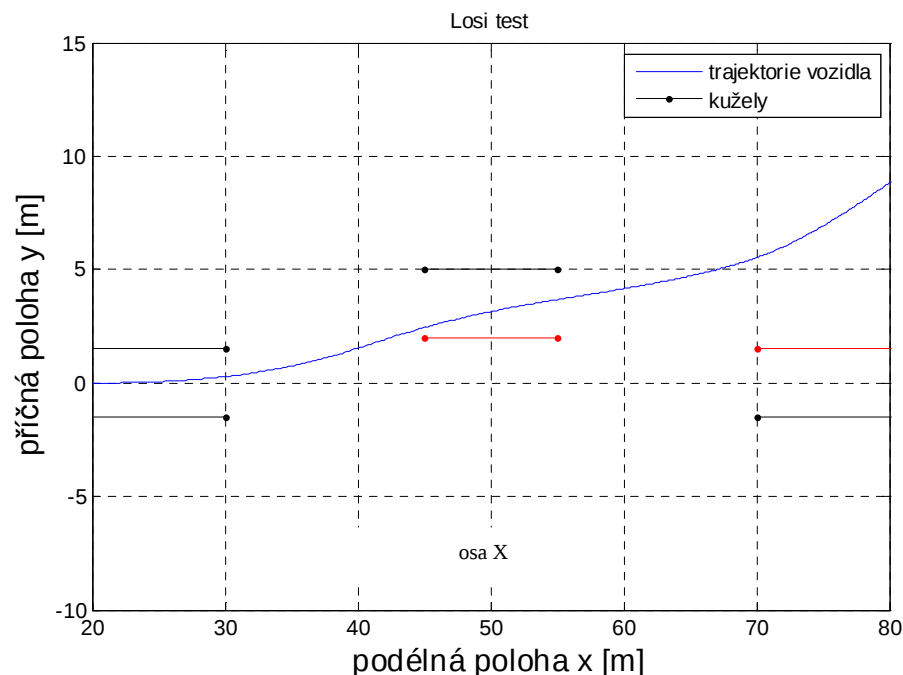
Pokud mám např. nastavenou hodnotu predikované vzdálenosti na $preview = 10$, tak se během simulace vypočítá poloha vozidla, kde by se vozidlo vyskytlo, kdyby pokračovalo v jízdě směrem α , kterým má natočenou karoserii vozidla a ujelo vzdálenost 10 metrů po podélné ose x . V této vzdálenosti se porovná predikovaná poloha vozidla na příčné ose y (laterální poloha) s požadovanou laterální polohou w_y v tomto predikovaném bodě. Model řidiče tedy ve skutečnosti neřídí vůz podle aktuální polohy na příčné ose y , ale podle výpočtu polohy po ujetí předem dané vzdálenosti predikce.

Z hlediska řízení má vzdálenost predikce, ve které bude model řidiče určovat regulační odchylku e velký vliv, pokud se bude vozidlo pohybovat různými rychlostmi v . Například, pokud vozidlo pojede rychlostí vyšší, měl by řidič plánovat trajektorii na větší vzdálenost dopředu, pokud pojede rychlostí nižší, měla by mu stačit menší vzdálenost, na kterou bude predikovat polohu vozidla.

Když se pokusím najít nastavení parametrů simulovaného řidiče takové, aby dokázal řídit vozidlo při rychlosti $v = 80$ km/h, a který by používal predikci pouze na 10 metrů předem, neprovedl by akční zásah $x(t)$, tedy natočení volantu včas a srazil by kužely vytyčující dráhu (Obr. 22). Zkoušel jsem měnit parametry řidiče tak, aby provedl opravdu silný akční zásah. Tento přístup však výsledek nepřinesl, pouze jsem dostal vozidlo do smyku a simulovaný řidič neprojel dráhu vůbec (Obr. 23).



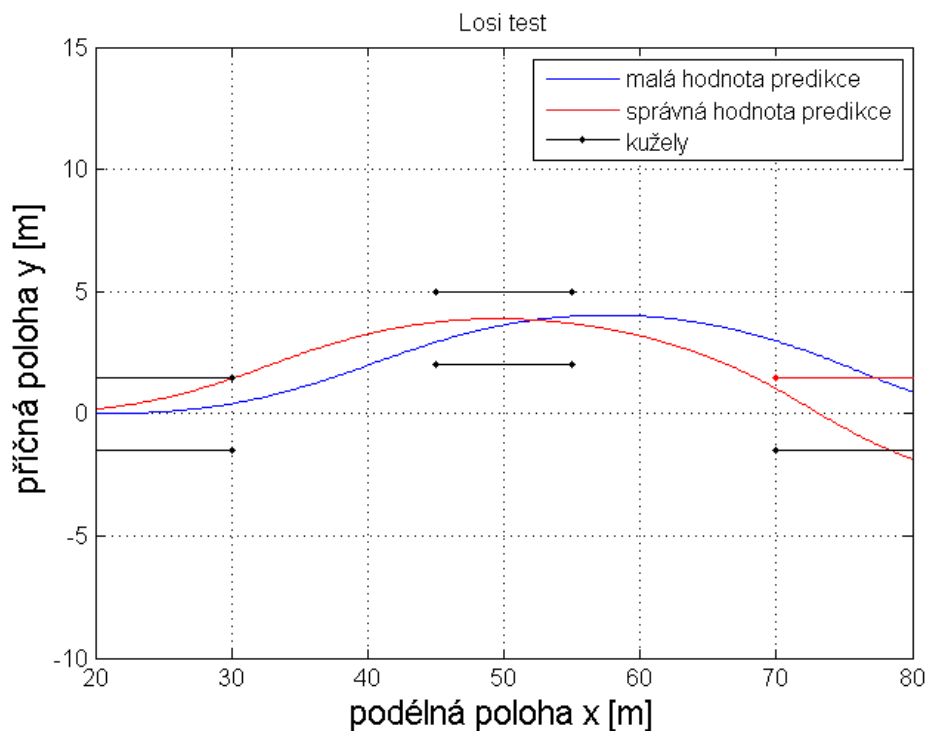
Obr. 22 Malá vzdálenost predikce při rychlosti $v = 80$ km/h



Obr. 23 Příliš vysokým akčním zásah, rychlost $v = 80$ km/h

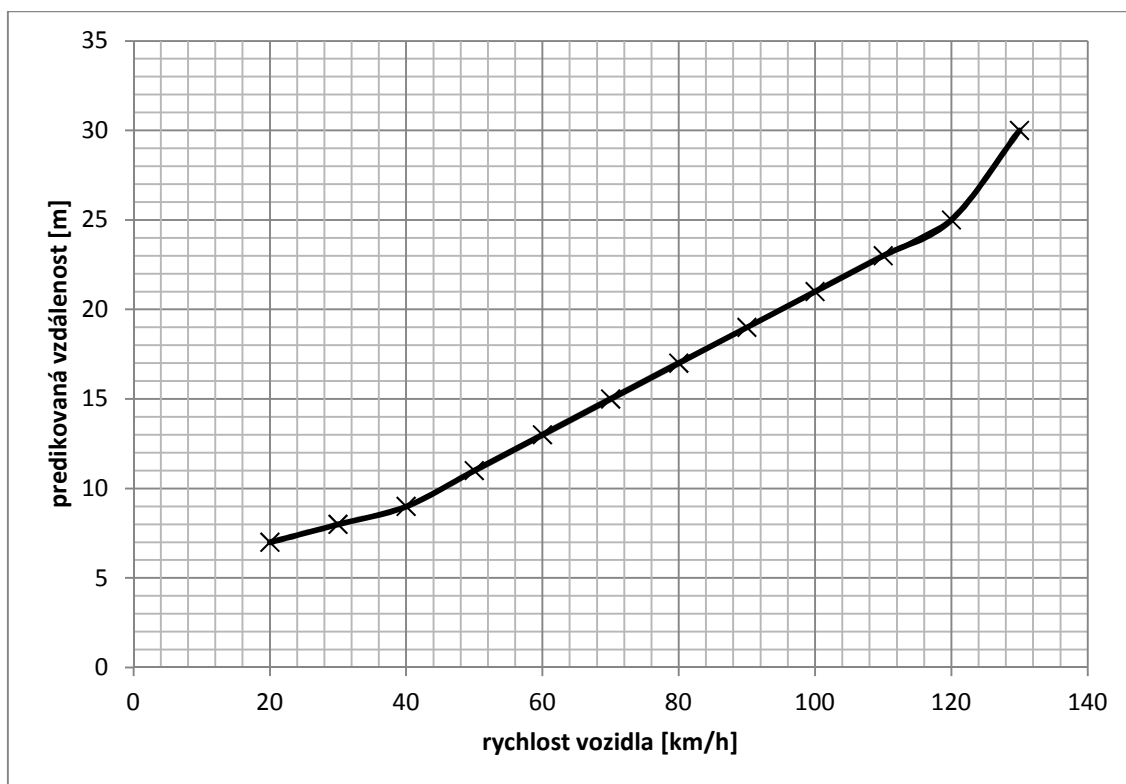
Na trajektorii vozidla při rychlosti $v = 80$ km/h (Obr. 22) je vidět, že i když se řidič snaží dráhu projet, jeho akční zásah $x(t)$ přichází pozdě a vrcholek jeho trajektorie, který by měl být ideálně v bodu na podélné ose $x = 50$, je až na bodu $x = 57,66$. V tomto případě by tedy jistě pomohlo, kdyby simulovaný řidič dokázal predikovat trajektorii na větší vzdálenost. Experimentálně jsem zjistil, že pokud nastavím hodnotu predikce na 17 metrů, tak při rychlosti $v = 80$ km/h již vrcholek trajektorie leží nad bodem $x = 50$.

Porovnání obou trajektorií je na obrázku Obr. 24. Vozidlo jelo v obou případech stejnou rychlostí $v = 80$ km/h. Pro tuto rychlost v predikce na vzdálenost 10 metrů nedostačovala, vhodná velikost predikce je 17 metrů. Při této hodnotě již vrchol trajektorie (nejvyšší hodnota na příčné ose y) leží uprostřed dráhy, na podélné ose $x = 50$ m.



Obr. 24 Trajektorie vozidla, rychlost $v = 80$ km/h, predikce 17 m.

Rozhodl jsem se postupně měnit rychlost vozidla v a pro každou z rychlostí jsem nastavil velikost predikované vzdálenosti tak, aby vrchní bod trajektorie ležel nad hodnotou $x = 50$ m. Ve všech případech jsem použil stejný regulátor, aby nedocházelo k ovlivňování trajektorie jinými parametry. Použil jsem proporcionální regulátor se zesílením $P = 100$, pouze v krajních rychlostech jsem musel tuto hodnotu poopravit, aby byl zřetelně poznat vrchní bod trajektorie. Změna zesílení ovšem ovlivnila hodnotu predikce, jak je vidět i v grafu Obr. 25. Posunuté hodnoty jsem nakonec nepoužil a pro proložení přímkou jsem zvolil hodnoty predikce pro rychlosti v z rozmezí (40–120 km/h).



Obr. 25 Graf závislosti vhodné hodnoty predikce při různých rychlostech vozidla.

Regresní rovnici využijí k nastavení počáteční hodnoty predikce při optimalizaci parametrů řidiče.

$$predikce = 0,2 \cdot v + 1 \quad (5-2)$$

kde

v rychlost vozidla [km/h]

$predikce$ predikovaná vzdálenost [m]

5.3 Optimalizace parametrů

Úkolem je zjistit, jestli existuje nastavení parametrů McRuerova modelu řidiče, který by prošel testem na manévr losí test, a zároveň by tyto parametry odpovídaly schopnostem reálného člověka. Rozsah možných hodnot parametrů беру z rozmezí udaného v [5].

$$Y_R(p) = \frac{K \cdot e^{-T_d p} (T_a p + 1)}{(T_n p + 1)(T_i p + 1)} \quad (5-3)$$

Zesílení $K = (100 - 100\,000)$,
neuromuskulární časová konstanta $T_n = (0 - 0,1)$ s,
prediktivní časová konstanta $T_a = (0 - 2)$ s,
setrvačná časová konstanta $T_i = (0,1 - 0,4)$ s,
reakční doba řidiče $T_d = (0,12 - 0,3)$ s.

Snažil jsem se nalézt co nejvhodnější kombinací parametrů a zjistit, jaké jsou jeho možnosti z hlediska rychlosti projíždění vytyčené trasy.

Nalézt optimální kombinaci pěti různých parametrů modelu řidiče je příliš náročné pro ruční vyhledávání, proto zvolím automatické iterační vyhledávání v MATLABu.

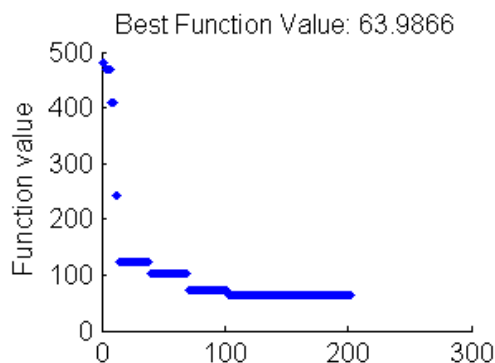
Nalezení optimálních parametrů řidiče s pomocí funkce *fminsearch* se mi bohužel nepodařilo. Tato metoda při simulaci často uvízla v lokálním minimu. Pro nalezení nejvhodnějších parametrů využiji metodu simulovaného žíhání (*simulated annealing*) [13], která byla právě pro tento problém vytvořena.

5.3.1 Simulované žíhání (*simulated annealing*)

Metoda simulované žíhání je pravděpodobnostní heuristická metoda k prohledávání stavového prostoru v případech, kde mají jiné metody problém dostat se z lokálního minima. Při hledání minima metoda prohledává okolí posledního řešení, a pokud se jí nedaří nalézt lepší řešení, hodnota, kolem které stavový prostor prohledává, postupně chladne. Chladnutí vyjadřuje snižování pravděpodobnosti nálezu lepšího řešení v okolí toho stavového prostoru. To znamená, že se s velkou pravděpodobností jedná o minimum v dané části stavového prostoru a metoda simulovaného žíhání se pokusí najít řešení na jiných místech stavového prostoru. Tato metoda postupně zkouší hledat na různých místech, aby bylo kritérium co nejlépe splněno. Nalezení globálního minima však ani touto metodou není zaručeno.

Pro nalezení nejlepšího řešení využiji funkci *simulannealbnd* implementovanou v prostředí MATLAB. Funkce začne prohledávat stavový prostor od počátečního stavového vektoru x_0 a další hodnoty volí z vymezeného rozsahu. Větší počet simulací průjezdu automobilu po dané trase je značně časově náročný, proto jsem musel

parametry prohledávání upravit, aby algoritmus výpočtu nepátral dlouho kolem jednoho bodu. Toto omezení sice snižuje šanci nalézt lepší řešení, ale bez něj by bylo časově nereálné nalézt optimálního řešení. Interval obnovení žíhání jsem nastavil na 10 simulací a podmínku pro ukončení výpočtu na 150 iterací bez nalezení lepšího řešení.



Obr. 26 Minimalizace *fitness* funkce metodou simulovaného žíhání

5.3.2 Funkce vyhodnocující nalezené řešení

Fitness funkce, ve které algoritmus simulovaného žíhání hledá minimum, se vypočítá tak, že se nastaví parametry řidiče podle zrovna testovaného stavového vektoru x_0 a provede se simulace, při které řidič projíždí vozidlem dráhou losího testu. Pokud řidič neuspěje a srazí některý kužel, je výstupní hodnota *fitness* funkce vrácena jako nekonečno, tedy řešení, které nepřipadá v úvahu.

Pokud řidič losí test splní, je *fitness* funkce vypočítána na základě rozdílu plánované trajektorie a trajektorie, po které skutečně jel.

stavový vektor $x_0 = [K, T_d, T_i, T_n, T_a, \text{predikce}]$

$$fitness = \sqrt{\sum_{i=0}^{\infty} \left((y_i \text{ plánovaná} - y_i \text{ skutečná})^2 \right)} \quad (5-4)$$

5.3.3 Uložení výsledků

Pro využití potenciálu automatického hledání výsledků jsem potřeboval získané optimální modely řidiče nějakým způsobem uchovat, aby program mohl pokračovat v hledání výsledků pro další rychlosti vozidla v . Protože simulace jediného projetí dráhy zabere několik sekund, stává se hledání optimálních parametrů, kdy je nutné dráhu projet několikrát v řadě za sebou, úkolem na několik hodin. Abych omezil ztrátu dat při případném selhání počítače, získané výsledky průběžně ukládám do tabulky v souboru čitelném v programu MS Excel.

Příkaz pro Matlab:

```
xlswrite(cesta k souboru, proměnná, jméno listu, číslo buňky);
```

Zároveň s uložením optimálních parametrů ukládám do souboru (*.png) obrázek trajektorie průjezdu automobilu skrze dráhu vytyčenou kužely, aby bylo jasné, jestli opravdu nalezené parametry vyhovují pro projetí dráhy. V případě, že automobil během jízdy srazí některý kužel, zvýrazní se daná část dráhy červenou barvou.

Uložení obrázku probíhá přes příkaz:

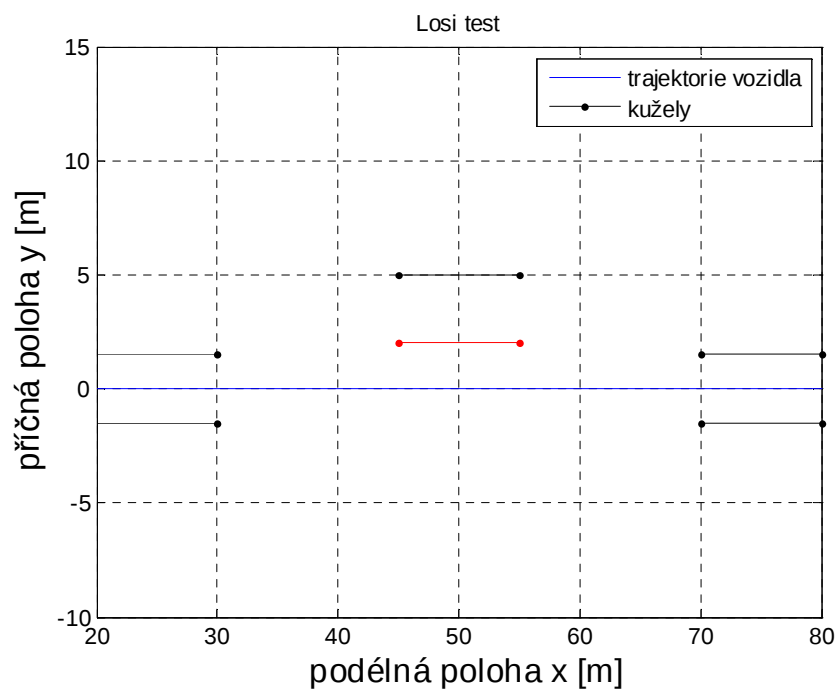
```
print('-dpng', jmeno.png)
```

Celý skript pro ukládání výsledků je součástí skriptu *najdi_minimum.m*, část *uložení výsledků*.

5.4 Nový přístup k vyhodnocení testu

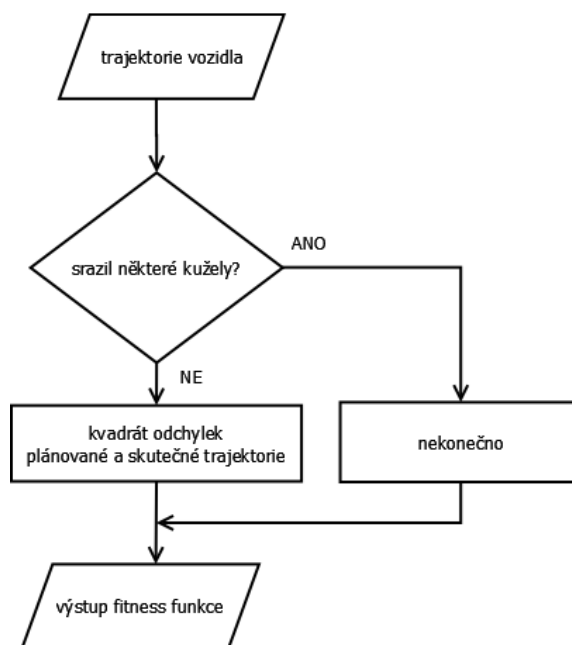
5.4.1 Kritérium první

Při použití metody vyhodnocení nejlepší trajektorie na základě kvadrátu odchylek (5-3) od plánované dráhy dostanu kvantifikační údaj *fitness* funkce, jak moc přesně danou trajektorií projíždím. Tento údaj vypovídá o tom, jak moc dobře byl pilot schopný s modelem auta dráhu projet. Takové vyhodnocení má ale svá úskalí. Např. algoritmus hledání vhodných parametrů řidiče nalezne takové řešení, kdy automobil projede dráhu zcela rovně (Obr. 27). Takové řešení je samozřejmě nepřípustné, ale z hlediska hodnocení *fitness* funkce podle toho kritéria může opravdu jít o nejlepší řešení. Tento fakt jsem musel pro tvorbu hodnotící funkce vzít v úvahu a penalizovat řidiče, který srazí nebo mine kuželky.



Obr. 27 Trajektorie optimálního řidiče podle prvního kritéria

Rozhodl jsem se, že nepřichází v úvahu použít řešení, při kterém řidič srazí jakýkoli kužel nebo se jim dokonce vyhne. Do vyhodnocovací funkce, kterou tvoří výpočet kvadrátu odchylek skutečné a plánované trajektorie (5-3), jsem přidal rozhodovací pravidlo, které v případě, že byla sražena některá z kuželek, nastaví návratovou hodnotu funkce na nekonečno (Obr. 28).



Obr. 28 Diagram vyhodnocení prvního kritéria

Tato hodnoticí funkce se postupem času ukázala jako ne příliš vhodná, protože pro otestování různých druhů řidičů a hledání nejvhodnějších parametrů častokrát vyšla

hodnota $fitness = \infty$, protože byla sražena některá z kuželek. Problém se navíc při testu, kdy automobil jede vyšší rychlostí, výrazně zhoršuje, protože správně dokáže dráhu projet čím dál užší rozsah parametrů modelu řidiče.

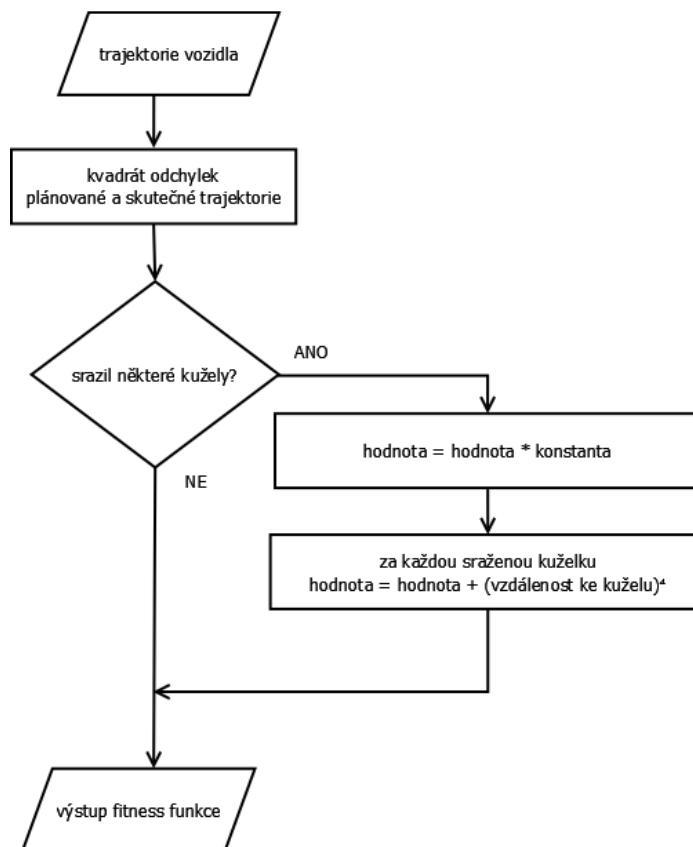
V důsledku toho, že většina návratových hodnot je nekonečno, nemá metoda simulovaného žíhání vůbec žádnou informaci, zdali je použitý model řidiče lepší než model předchozí či naopak. Nová trajektorie může například už celkem přesně kopírovat požadovanou, ale protože byl sražen některý kužel, bude model označen jako nepřipustný a metoda hledání minima si nevšimne, že se přiblížila správným parametrům a že tento nový model řidiče je lepší než model předchozí.

V důsledku tohoto nevhodného kritéria hodnocení trajektorie vozidla při „losím testu“ metoda simulovaného žíhání, bloudí po stavovém prostoru a nedaří se jí nalézt optimální nastavení parametrů modelu řidiče. Jakmile se jí však podaří trefit parametry tak, aby bylo možné projet dráhou bez srážky kuželu, již celkem brzy najde neoptimálnější nastavení z hlediska hodnotící funkce kvadrátu odchylek plánované a skutečné trajektorie.

5.4.2 Kritérium druhé

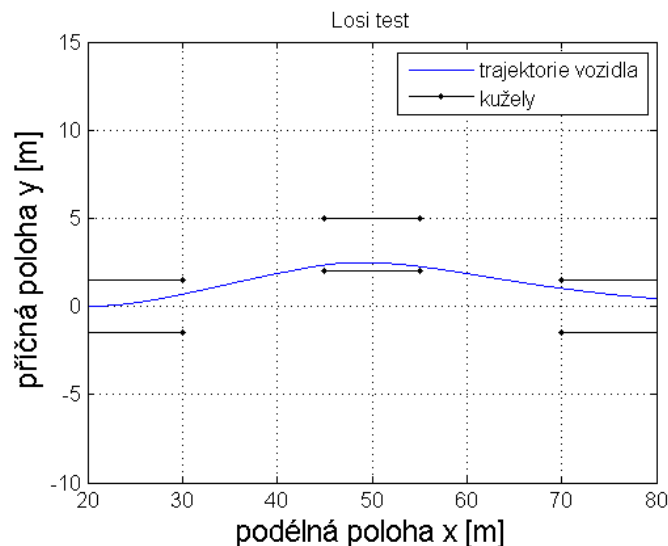
Abych předešel ztrátě informace o schopnosti řidiče projet danou dráhu, musel jsem změnit kritérium hodnotící funkce. Rozhodovací pravidlo již nesmí všechny modely řidiče, které neúspěšně projedou danou dráhou označit jako nepřipustné, ale musí k nim přidat návratovou hodnotu takovou, aby i neúspěšné modely řidiče bylo možno vzájemně porovnat.

Pokud nastane situace, že vozidlo při jízdě srazilo některý kužel, vynásobím kvadrát odchylek požadované a skutečné trajektorie konstantou > 1 , abych zaručil, že hodnota $fitness$ funkce bude vyšší, než kdyby vozidlo žádný kužel nesrazilo. Dále zohledním, jak moc chybělo vozidlu, aby kolem kuželu projelo. To provedu tak, že k hodnotě kritéria přičtu vzdálenost, která zbývala k bezpečnému projetí dráhou. Tuto vzdálenost navíc umocním čtyřmi, aby se vliv této části kritéria výrazněji projevil oproti odchylce celkové trajektorie.



Obr. 29 Diagram vyhodnocení druhého kritéria

Hledání optimálních parametrů tohoto kritéria přináší výsledky mnohem rychleji. Algoritmus hledání minima kritériální funkce mnohem dříve zjistí, kde leží stavový prostor parametrů modelů řidiče, který dokáže dráhou losího testu projet. Při analýze výsledků jsem si však povšiml, že vozidlo mívá kužely velice těsně. Průběh trajektorie vozidla řízeného modelem řidiče s optimálními parametry podle tohoto kritéria vypadá obvykle jako ta na zobrazená na Obr. 30. Změna parametrů modelu řidiče i o necelé procento má za následek, že vozidlo během jízdy kužel srazí. Takto navržený model řidiče by se ve skutečnosti nedal vůbec použít.



Obr. 30 Trajektorie vozidla řízeného optimálním řidičem podle druhého kritéria

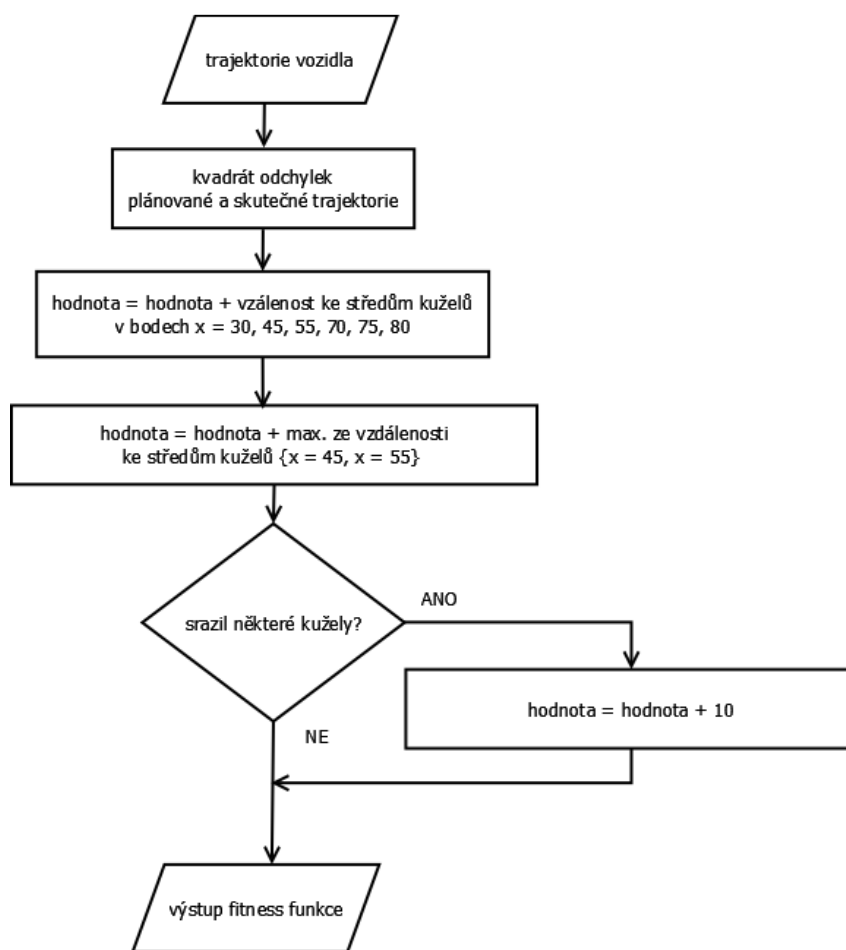
5.4.3 Kritérium třetí

Protože minulé kritérium na projetí vyžadovalo v praxi těžko nereálně přesné nastavení parametrů, musel jsem změnit přístup k vyhodnocení trajektorie vozidla. Navíc jsem musel vzít v úvahu, že vozidlo má šířku $b = 1,4$ m. Místo abych počítal odchylku celkové trajektorie od původně zamýšlené dráhy, zaměřím svoji pozornost na kritická místa. Těmi jsou body 30, 45, 55, 70 na podélné ose x , protože v těchto místech se nachází kužely, které vozidlo nejčastěji srazí. Při hledání nejlepších parametrů pro modely řidiče podle dřívějších kritérií jsem si všiml, že pokud řidič úspěšně projede kolem těchto kritických míst, už v drtivé většině simulovaných jízd zvládne projet dráhu celou, aniž by srazil jiný kužel.

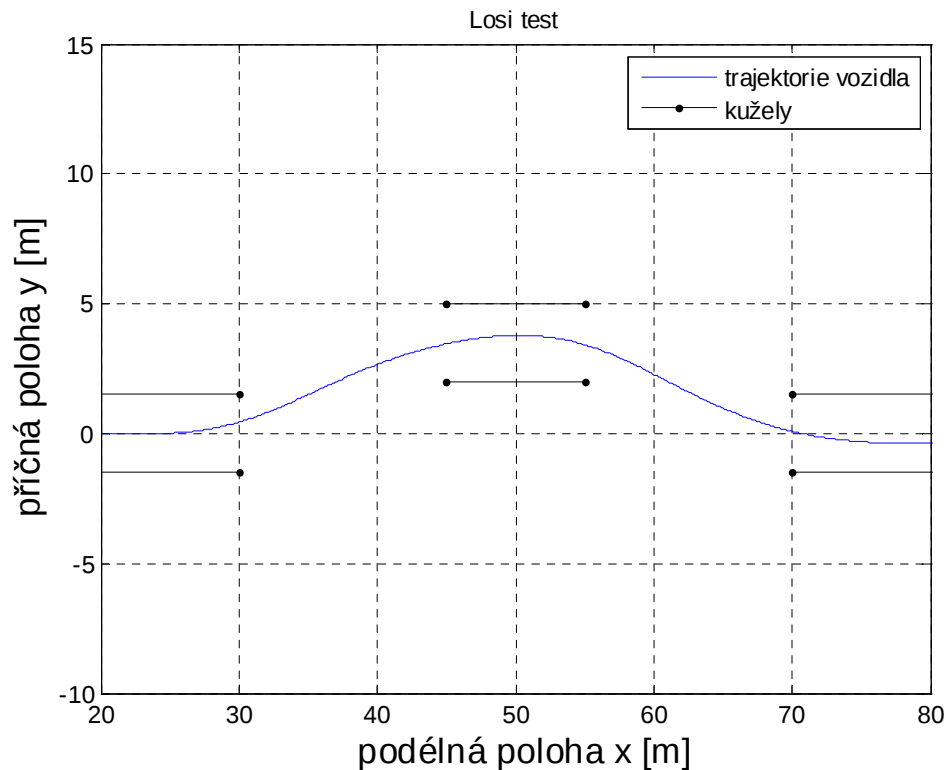
Potřeboval jsem tedy vytvořit kritérium, které nalezne takový model řidiče, jehož vozidlo pojede po dráze s dostatečnou rezervou na projetí kolem těchto kritických míst. Pro každé z těchto míst určím, jak daleko se vozidlo nacházelo od středu vozovky. Pro hodnoty $x = 30$ a $x = 70$ je střed vozovky na $y = 0$, pro hodnoty $x = 45$ a $x = 55$ je střed vozovky $y = 3,5$. Tímto výpočtem docílím toho, že se řidič bude snažit projet co nejbližší k těmto místům na dráze a nikoliv k celkové nejmenší odchylce od plánované trajektorie. Nyní ještě penalizuji řidiče přičtením konstanty (konstanta = 10) za každou sraženou kuželku.

Algoritmus nyní nachází nastavení parametrů s mnohem robustnější trajektorií. Ještě však musím ošetřit případ, kdy si algoritmus přesným projetím kolem počátku kuželů u bodu $x = 45$ kompenzuje větší odchylku u kuželů v bodě $x = 55$. V ideálním případě by měl řidič projet téměř stejně kolem obou bodů. Pro vyřešení tohoto problému k hodnotě kriteriální funkce přičítám maximum z hodnot odchylek v těchto dvou bodech. Funkce hledající optimální trajektorii tedy bude hledat takové řešení, kde vozidlo projede v dostatečné vzdálenosti od nejčastěji sražených kuželek a navíc mine obě kuželky ohraničující střední část dráhy v přibližně stejné vzdálenosti. Navržené

parametry řidiče by tedy měly být, vzhledem k větší vzdálenosti od kuželů, i dostatečně robustní.



Obr. 31 Diagram vyhodnocení třetího kritéria



Obr. 32 Trajektorie vozidla řízeného optimálním řidičem podle třetího kritéria

5.5 Výsledky simulace

První simulace jsem provedl při rychlosti 50 km/h, při které je projetí dané trajektorie relativně snadné. Největším problémem při testu pro model lidského řidiče je vyrovnat se svým dopravním zpožděním. Kdyby jeho součástí dopravní zpoždění nebylo, stačil by pro řízení při této rychlosti proporcionální regulátor.

Modelem lidského řidiče je již zmiňovaný McRuerův model:

$$Y_R(p) = \frac{K \cdot e^{T_d p} (T_a p + 1)}{(T_n p + 1)(T_i p + 1)} \quad (5-5)$$

Kkonstanta reprezentující zvyklosti řidiče,

T_ddopravní zpoždění mezi očním vjemem a odezvou mozku,

T_i zpožd'ující setrvačná konstanta související s prováděním naučených stereotypů,

T_nsetrvačná konstanta udávající zpoždění dané neuromuskulárním systémem,

T_a prediktivní konstanta závislá na zkušenosti řidiče.

Tab. 1 Optimální parametry modelu lidského řidiče, metoda simulované žíhání

Rychlost [km/h]	K [-]	T_n [s]	T_a [s]	T_i [s]	T_d [s]	Predikce [m]	Fitness
40	93,28	0,00	0,49	0,14	0,20	5,19	433,81
45	90,77	0,03	0,64	0,23	0,20	5,21	390,59
50	100,67	0,00	0,29	0,16	0,20	8,29	176,97
55	98,81	0,00	6,52	2,52	0,20	8,88	493,74
60	102,25	0,01	0,18	0,11	0,20	12,22	434,20
65	110,16	0,01	0,43	0,35	0,20	13,34	501,62

Z hodnot parametrů nejlepších modelů lidského řidiče (Tab. 1) není zcela jasná závislost na rychlosti vozidla. Parametr zesílení K se s rostoucí rychlostí v nepatrně zvyšuje. Parametr T_n , který má fyziologické opodstatnění jako neuromuskulární časová konstanta se neprojevil. Nejspíše se spojil se setrvačnou časovou konstantou T_i . Zpoždění reakce řidiče jsem nastavil na pevnou hodnotu $T_d = 0,2$ s. Stejnou hodnotu T_d použili vědci z Japonska pro simulaci pilota při přistání letadla [6]. Kdyby tato hodnota zpoždění T_d byla proměnlivá, nejlepší výsledky by model dosáhl pro její nejmenší možné hodnoty. Zcela jasnou závislost na rychlosti má podle očekávání parametr *Predikce*, protože s rostoucí rychlostí je nutné určovat regulační odchylku na větší vzdálenost.

Za povšimnutí stojí, že hodnotící Fitness funkce nejlépe ohodnotila průjezd rychlostí $v = 50$ km/h. Je možné, že právě pro tuto rychlost byla ideální trajektorie stanovena. Nízká hodnota fitness funkce tedy zřejmě vypovídá o předpojatosti této ideální trajektorie.

5.6 Regulátor PID

Místo modelu lidského řidiče použijí regulátor typu PID. Jeho parametry lze ladit i ručně. Význam parametrů PID regulátor je dobře popsán v každé teorii řízení, protože se v různých variantách používají v průmyslu již řadu let.

$$Y_{PID}(p) = K \left[1 + \frac{1}{T_I p} + T_D p \right] \quad (5-6)$$

kde K proporcionální složka – zesílení regulátoru,

T_I integrační časová konstanta,

T_D derivační časová konstanta.

Proporcionální složka K odpovídá snaze regulátoru minimalizovat regulační odchylku e . Integrační složka TI byla zavedena pro potlačení trvalé ustálené odchylky a derivační složka T_D byla použita pro zrychlení přechodového děje a zlepšení stability. Použití integrační časové konstanty sebou nese i negativní vlastnosti, tato složka

zhoršuje stabilitu regulačního děje a prodlužuje periodu kmitů. Derivační složka zrychluje přechodový děj, ale jen do omezené míry. [14]

Parametry nastavení PID regulátoru (Tab. 2) jsem našel pomocí metody simulovaného žitání s kritériální funkcí č. 3. Toto kritérium hledá takové parametry regulátoru, které při simulaci řízení vozidla projedou v dostatečné vzdálenosti od kuželů vytyčujících trasu.

Tab. 2 Model řidiče – PID regulátor a jeho parametry pro různé rychlosti

v [km/h]	K [-]	T_I [s]	T_D [s]	Predikce [m]	Fitness
40	98,78	1,68	32,58	4,56	538,97
45	92,58	0,35	23,81	5,74	518,94
50	99,86	0,00	17,42	6,49	481,45
55	97,96	0,18	9,67	8,12	484,37
60	96,67	0,13	1,83	9,26	474,34
65	92,65	0,16	1,83	10,49	496,38

Z hodnot v tabulce Tab. 2. je patrné, že se s rostoucí rychlostí se hodnota parametru zesílení P téměř nemění. Integrační složka I se s výjimkou první rychlosti také nemění. Naproti tomu derivační složka D s rostoucí rychlostí vozidla výrazně klesá.

Při pohledu na trajektorii vozidla je zcela jasně vidět, že s rostoucí rychlostí dochází k jejímu zploštění. Při rychlostech $v > 65$ km/h už byla dráha natolik plochá, že nešlo alespoň některý kužel vozidlem nesrazit. Příklad trajektorie, kde k tomu dochází je v další kapitole na obrázku Obr. 33. Vozidlo jelo rychlostí $v = 70$ km/h.

Pokud porovnám výsledky simulace vozidla řízeného McRuerovým modelem lidského řidiče Y_R s výsledky simulace vozidla řízeného PID regulátorem, vychází lépe McRuerův model řidiče, který má ve většině případů menší hodnotu fitness funkce. Výhodou modelu lidského řidiče je větší množství parametrů, větší stupeň volnosti.

6 VIZUALIZACE

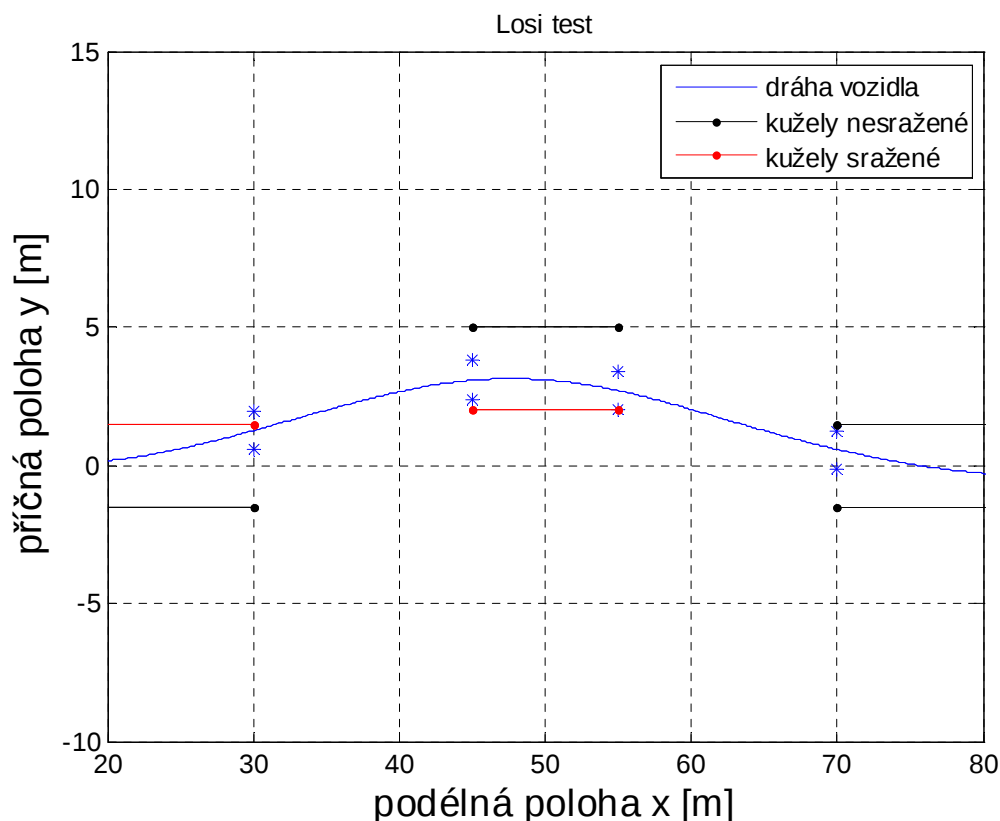
6.1 Vizualizace v 2D

Tato vizualizace představuje základní vykreslení trajektorie. Probíhá velmi rychle a není problém ji tedy dělat opakovaně. Jediné, co pro tuto vizualizaci potřebuji je pole dat obsahující záznam pozice automobilu.

Data v Matlabu zobrazím pomocí funkce `plot(data)`. Vykreslený graf představuje pozici těžiště vozidla v podélné ose x a příčné ose y . Jde tedy o pohled shora. Jednotky na obou osách jsou v metrech.

Dále vykreslím rozmístění kuželů vyznačujících krajní meze, za které se automobil při testu nesmí dostat. Ze získaného záznamu průběhu trajektorie vyhodnotím, jestli automobil zůstává v mezích mezi kužely. Pokud automobil zůstává v mezích, je barva vyznačující kužely černá. V případě, že na některém místě automobil tuto linii překročí, bude vyznačena červenou barvou. Trajektorie simulovaného vozidla je znázorněna modře. Pomocí modrých hvězdiček znázorňuji okraje vozidla.

Jak je na obrázku Obr. 33 vidět, automobil již ve vzdálenosti 30 m od startovní pozice srazil kužel, proto se kužely obarvily červeně. Kužely, které vůz nesrazil, jsou označeny černě.



Obr. 33 Vizualizace trajektorie vozidla, kde došlo k překročení mezí určených kužely

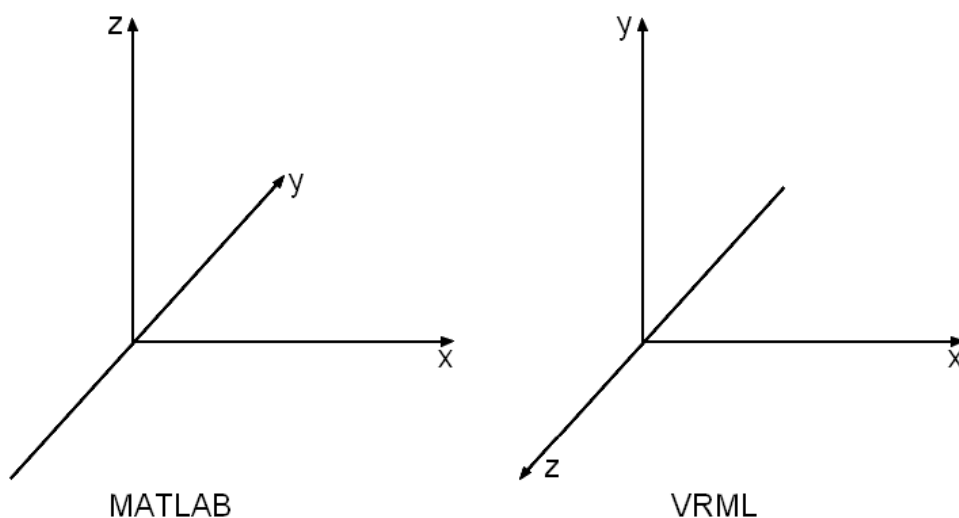
6.2 Vizualizace ve 3D

Programové prostředí MATLAB nabízí možnost vytvoření trojrozměrné virtuální scény pro vizualizaci losího testu. V prostředí *Virtual reality toolboxu* jsem již dříve pracoval na vytvoření modelu šestiosého robotického ramene C3 od firmy Epson. [15]

Programovacím jazykem v tomto vizualizačním toolboxu je jazyk *VRML97* – „*Virtual Reality Modeling Language*.“ Původně byl jazyk VRML navržen pro potřeby grafického zobrazení obsahu na webových stránkách. Jazyk byl upraven pro tvorbu interaktivních 3D scén a standardizován normou ISO/IEC 14772-1:1997, odtud tento jazyk převzal jméno *VRML97*.

Tento jazyk je otevřený a pro uživatele relativně jednoduchý, proto byl vybrán do nástrojů MATLAB/SIMULINK. Zároveň je možné vytvořené virtuální světy nahrát na internet, protože tento jazyk byl navržen tak, aby jej po nainstalování pluginu bylo možné spustit v libovolném prohlížeči.

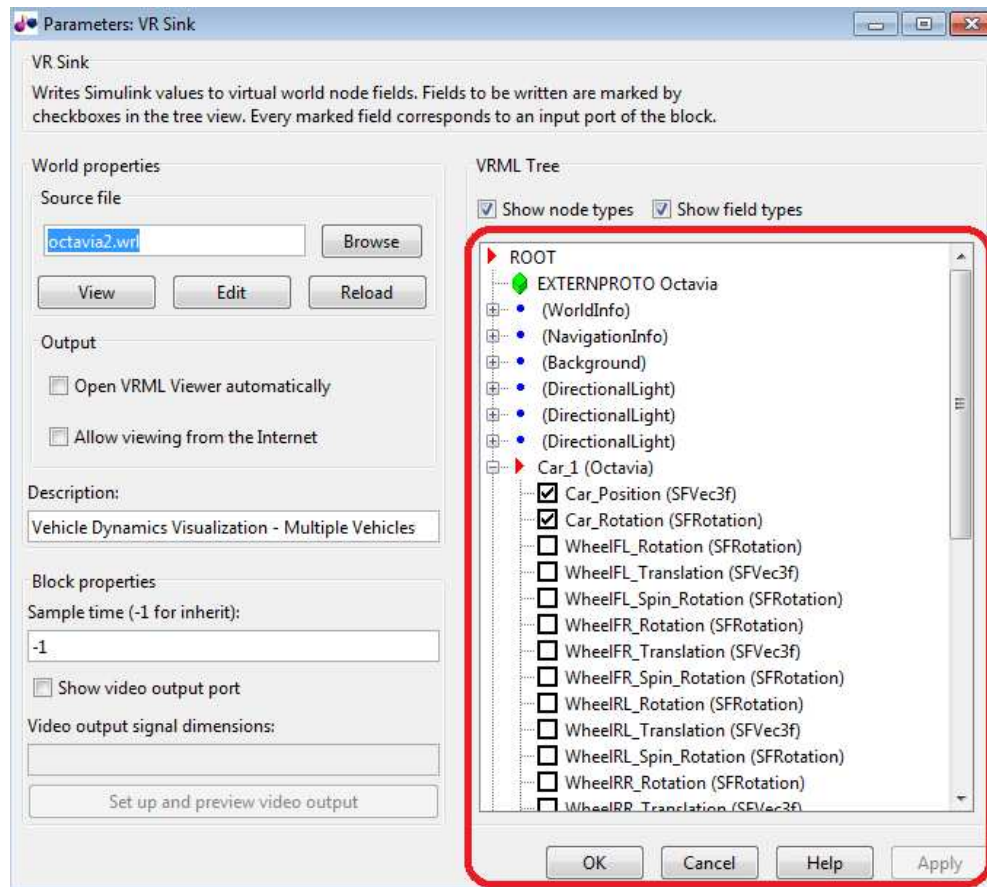
Souřadný systém tohoto jazyka se ovšem od prostředí MATLAB liší. V jazyku VRML osa Y směřuje nahoru a osa Z směřuje k nám, zatímco v prostředí MATLAB osa Z směřuje nahoru a osa Y směřuje od nás. Transformace je snadná, provádí se prohozením souřadnic. Stejně jako VRML má orientovaný souřadný systém toolbox *SimMechanics*. Velikosti jsou ve VRML udávány v metrech, úhly v radiánech a čas v sekundách.



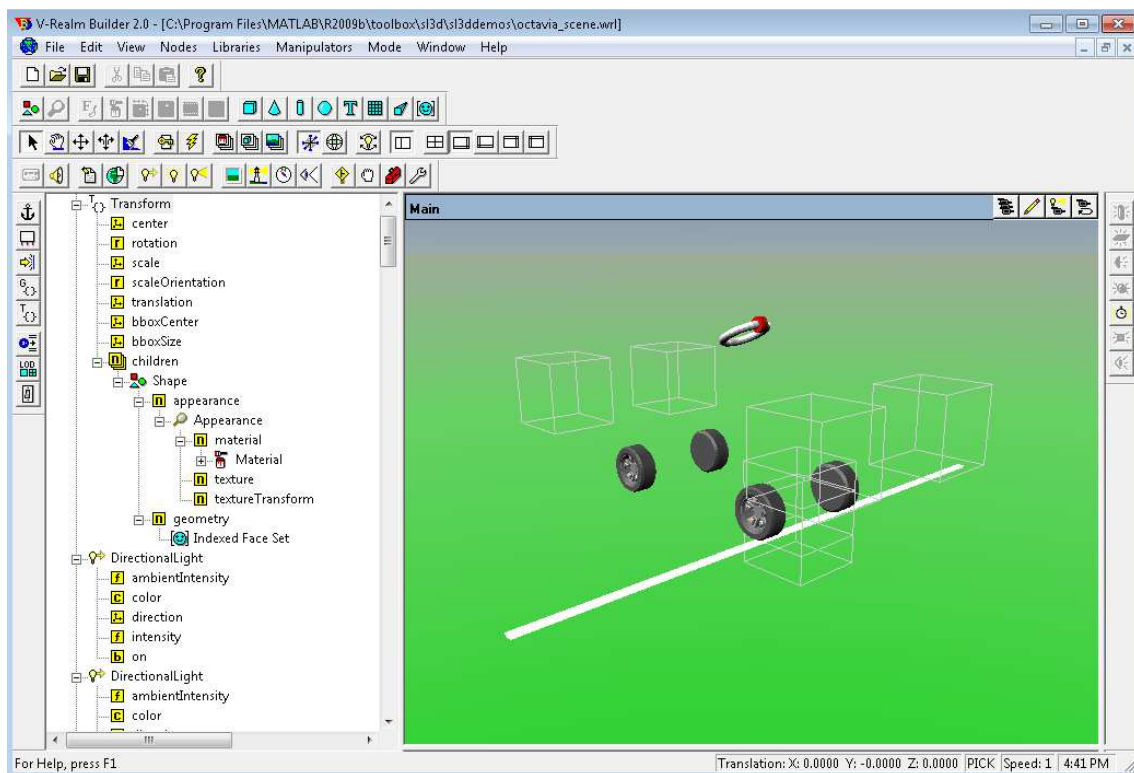
Obr. 34 Souřadný systém MATLAB a VRML

Pro zabudování 3D modelu do Simulinku využijí blok *VR Sink* (Obr. 35), který je součástí knihovny *Simulink 3D Animation*. Pro vložení již dříve vytvořeného modelu vyberu *VRML* soubor (*.wrl). V pravé části dialogového okna se objeví strom představující strukturu vytvořeného virtuálního světa. Uzel, u kterého mohu měnit parametry externím vstupem je označen symbolem „červený trojúhelník.“ Takto je označen i virtuální model vozidla (Car_1 (Octavia)). Pro vizualizaci automobilu na

vozovce potřebuji měnit parametry pozice vozidla (Car_Position) a natočení karoserie (Car_Rotation).



Obr. 35 Blok VR Sink



Obr. 36 Okno V-Realm Builderu

6.3 Základní typy objektů

V jazyku VRML je definováno několik uzlů (nodes), ty lze rozdělit na různé skupiny. Například skupina pro popis geometrie objektů, pak pro určení jejich povrchu, zdroje světla atd.

Základními geometrickými prvky jsou: *Text*, *Jehlan*, *Kostka*, *Válec*, *Koule*, *sada bodů*, a *indexované sady*. Model lze upravovat, buď v běžném textovém editoru, nebo s využitím V-realm Builderu (Obr. 36) z MATLABu.

Ukázka kódu vytvářejícího červenou kouli – převzato z Wikipedie: [16]

```
#VRML V2.0 utf8
WorldInfo {
  title "Red Sphere"
}
DEF Sphere1 Shape {
  appearance Appearance {
    material DEF Red Material {
      ambientIntensity 0.200
      shininess 0.200
      diffuseColor 1 0 0
    }
  }
  geometry DEF GeoSphere1 Sphere {
    radius 1.000
  }
}
```

6.4 Model vozidla pro vizualizaci

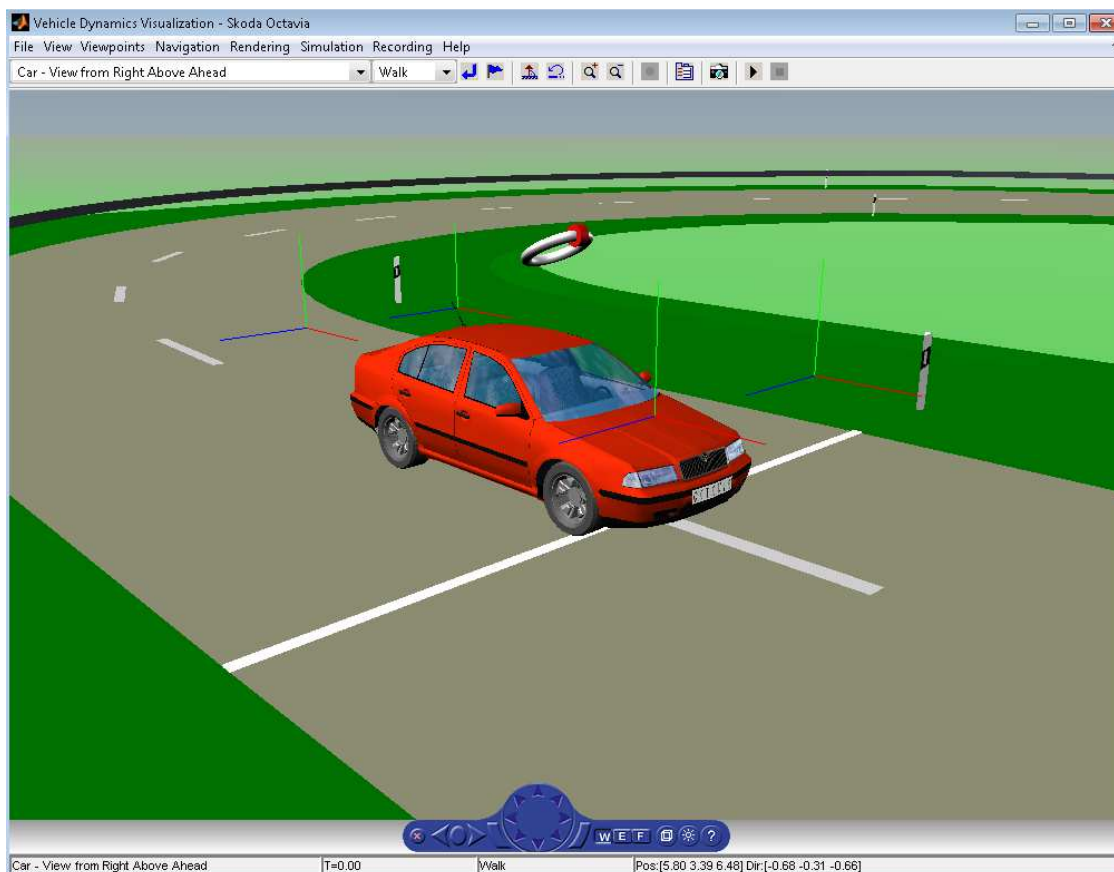
K nápadu použít trojrozměrnou vizualizaci při simulaci pohybu vozidla při losím testu mě dovedl ukázkový příklad z prostředí MATLAB, který představoval model vozidla Škoda Octavia pohybující se po předem vytyčené trase. Vozidlo se však pohybovalo jen přehráváním uložených dat o poloze a natočení vozidla.

Ukázkový příklad byl vytvořen kvůli ukázání výhod, které přináší vizualizace v prostředí virtuální reality. Obsahuje předem vypočítaná data o průjezdu vozidla po testovacím okruhu. Vytvořený model dokáže zobrazit nejen vizuální vlastnosti jako je poloha a natočení vozidla, ale i síly, které na vozidlo působí. Pohled na model je umožněn několika kamerami. Můžeme sledovat pohybující se automobil ze stacionární kamery, z kamery jedoucí společně s vozidlem i z pohledu řidiče.

Při zkoumání tohoto ukázkového příkladu jsem dospěl k tomu, že je možné použít již vytvořený trojrozměrný model Škody Octavie a místo uložených dat použít vlastní výstupy ze simulace pohybu vozidla. Vytvoření podobného a graficky propracovaného modelu, jako je ten v ukázkovém příkladu by zabralo delší čas, proto využiji již hotový model. Tento ukázkový příklad lze nalézt v MATLAB/SIMULINKu pod názvem „Vehicle Dynamics Visualisation.“ (vr_octavia.mdl)

Parametry vozidla:

- délka l : 2,57 m,
- šířka b : 1,404 m,
- model je 0,25 m nad zemí.



Obr. 37 Vizualizace ve 3D v prostředí Matlab, vr_octavia.mdl

Na obrázku z ukázkového příkladu (Obr. 37) je vidět, že osa automobilu není umístěná v jeho středu, ale uprostřed přední nápravy. Tento fakt není překážkou, poloha přední nápravy lze snadno dopočítat. Model, se kterým pracuji, je velmi komplexní, takže mám k dispozici velké množství dat, dokonce i polohu středu přední nápravy.

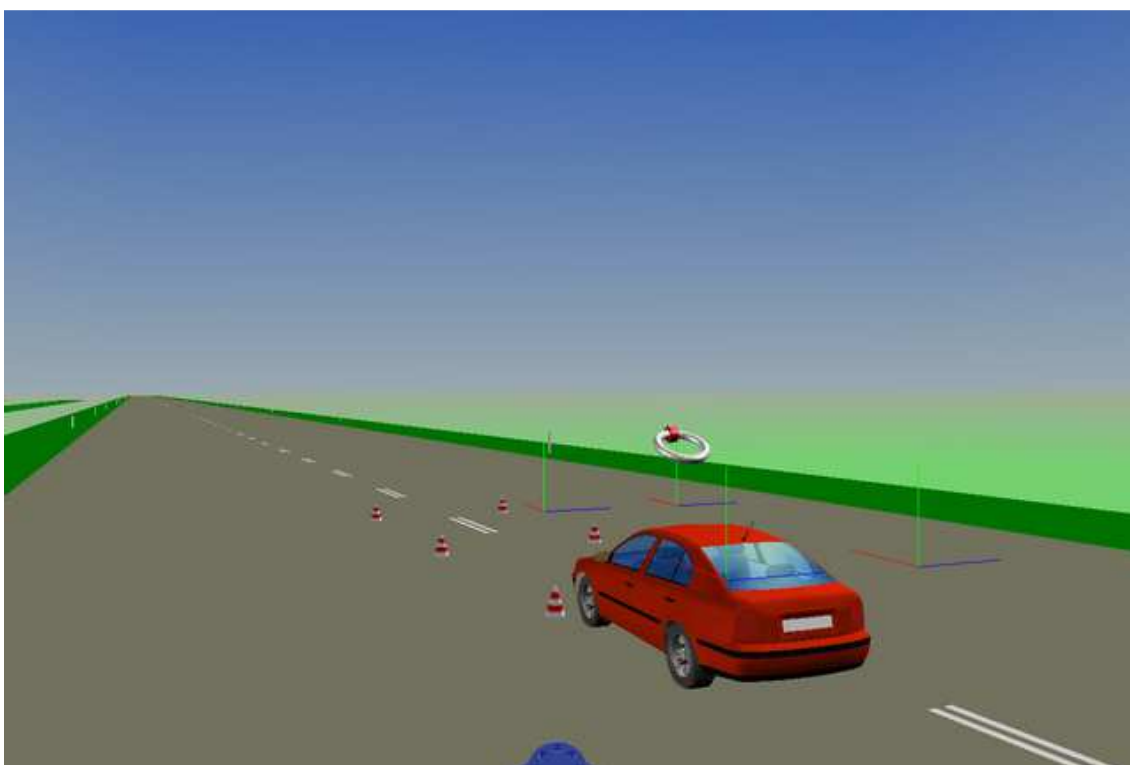
Na druhou stranu jedná se pořád pouze o rovinný model jednostopého vozidla, takže nevyužiji vizualizaci svislé polohy. Tu nastavím pevně na 0,25 m což je poloměr kol zvedajících vozidlo nad vozovku.

Pro vytvoření dráhy a okolí jsem využil ukázkový příklad „Octavia2.wrl.“ Na rozdíl od prvního příkladu je zde rovná silnice, což se ideálně hodí pro vizualizaci losího testu. Do nově vznikajícího virtuálního světa jsem přidal dopravní kužely rozmístěné podle mé simulace.

Vstupními signály do této vizualizace jsou poloha středu přední nápravy a natočení karosérie vozidla. Pro převod rotační masky do souřadnic VRML jsem použil předem připravený blok v nabídce Simulinku. Nakonec jsem prohodil pořadí vstupních signálů, protože jazyk VRML pracuje s jiným pořadím os.



Obr. 38 Vizualizace 3D zepředu



Obr. 39 Vizualizace 3D zezadu z boku

7 ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

V práci je popsána dynamika jednostopého modelu vozidla dodaného Ing. Petrem Portešem, Dr. z Ústavu automobilového a dopravního inženýrství FSI VUT Brno. Významným prvkem modelu vozidla jsou vlastnosti pneumatiky. Velikost boční vodící síly S_k pneumatiky je závislá na úhlu výchylky kola δ a představuje významnou nelinearitu modelu vozidla.

Provedl jsem několik simulací jízdy vozidla za působení jednotkového vstupního signálu. Tento manévr se nazývá ustálené zatáčení a používá se ke zjištění dynamických vlastností vozidla. Zjistil jsem, že i při různých rychlostech jízdy v je průměr obepisovaného kruhu stejný. Z toho usuzuji, že simulované vozidlo není ani přetáčivé, ani neotáčivé, ale chová se neutrálně.

K jednostopému modelu automobilu jsem po literární rešerši navrhl použít McRuerův model řidiče s parametry, při kterých je schopen projet po trase „losího testu“. Model řidiče představuje přenosovou funkci Y_R (2-3), u které jsou popsány jednotlivé významy a rozsahy možných hodnot koeficientů pro lidského operátora.

Dále jsem použil k řízení vozidla regulátor typu PID. Jeho výhoda tkví v tom, že má pouze tři parametry a lze jej tak nastavit i ručně. Menší počet parametrů však zapříčinil, že v hodnocení podle *fitness* funkce dopadl o něco hůře než model lidského řidiče.

V práci jsem určil optimální nastavení hodnot parametrů modelu řidiče pro různé rychlosti v v rozmezí 40 – 65 km/h. U všech testovaných rychlostí se mi podařilo najít řešení, při kterém řidič i PID regulátor úspěšně projede po trase vymezené kužely. Při vyšších rychlostech je při vizualizaci trajektorie vozidla zřetelná snaha simulovaného řidiče si trajektorii co možná nejvíce narovnat. Nad hranicí rychlosti $v = 65$ km/h již simulovaný řidič nedokáže vyhnout kuželům a některé z nich svým vozidlem srazí.

Během řízení člověk porovnává svoji polohu s požadovanou trajektorií a zároveň předvídá budoucí polohu vozidla y_e vzhledem k rychlosti v a směru α , kterým jede. Při řešení úlohy optimalizace parametrů řidiče jsem přišel na to, že velikost predikované vzdálenosti je zásadním problémem pro projetí trasy vyšší rychlostí.

Nalezl jsem závislost mezi rychlostí vozidla v a vzdáleností, na kterou musí řidič predikovat svoji budoucí příčnou polohu y . V rozmezí rychlostí $v = 40 – 120$ km/h je tato závislost lineární. Hodnoty mimo tento rozsah jsem nemohl stanovit přesně, a proto pro ně nemůžu o linearitě rozhodnout. Získanou závislost predikované vzdálenosti na rychlosti v využívám pro počáteční odhad optimálních parametrů řidiče.

V práci jsem navrhl novou hodnotící funkci pro porovnání jednotlivých průjezdů regulátoru PID a modelů řidiče. Tato funkce vyhodnocuje kritická místa „losího testu“ a oproti hodnotící funkci tvořené pouze výpočtem kvadrátu odchylek požadované a skutečné trajektorie nalézá modely řidiče s parametry majícími vyšší robustnost.

Pro lepší znázornění trajektorie vozidla používám vizualizaci ve 2D. Ta spočívá ve vykreslení jeho trajektorie do roviny xy , kterou doplním o kužely vytyčující dráhu losího testu. Sražení některého kuželu signalizují zčervenáním příslušného úseku.

Protože pomocí 2D grafu znázorním pouze trajektorii a nikoliv směr jízdy vozidla, rozhodl jsem se použít „Virtual reality toolbox“ z prostředí MATLAB. Upravil jsem v něm ukázkový příklad, aby vznikla dráha losího testu. Simulace jízdy vozidla ve 3D prostředí umožňuje prohlédnout si vozidlo při průjezdu dráhou losího testu z kteréhokoliv úhlu, dokonce i z pohledu řidiče.

8 ZÁVĚR

V diplomové práci jsem se zabýval problematikou příčného řízení automobilu. Prozkoumal jsem různé modely lidského řidiče. Pro simulace jízdy vozidel jsem vybral McRuerův model řidiče a srovnal jsem jej s případem, kdy by polohu vozidla řídil PID regulátor.

Řízenou soustavou zde byl nelineární jednostopý model vozidla, který mi poskytlo externí pracoviště Ústavu automobilového a dopravního inženýrství FSI VUT Brno. V práci jsem zkoumal i dynamické vlastnosti tohoto modelu vozidla.

Realizoval jsem simulace jízd, kdy vozidlo řídil model lidského řidiče a PID regulátor. Pro oba jsem metodou simulovaného žíhání našel optimální parametry, při kterých simulovaný řidič zvládne projet dráhou losího testu, aniž by srazil některý kužel vytyčující tuto dráhu.

Abych umožnil interpretovat uskutečněné simulace, vytvořil jsem vizualizace trajektorie vozidla ve 2D a v 3D. Trojrozměrná vizualizace přináší výhodu, že je možné sledovat jedoucí automobil z jakéhokoliv úhlu pohledu a vytvořit si tak jasnou představu o průběhu simulace.

V budoucnu je možné 3D vizualizaci ještě zdokonalit. Lze například vykreslit úhel natočení volantu a je možné využít znázornění sil působících na vozidlo při průjezdu zatáčkou. Simulované jízdy je možné přiblížit ještě více k reálným jízdám automobilu použitím dvoustopého modelu vozidla místo v práci používaného jednostopého modelu.

Další práce v oblasti modelu lidského řidiče by se měly posunout k získání dat z jízd skutečného člověka. Nejvhodnější by bylo zaznamenávat hodnoty přímo při jízdě pomocí HIL (Hardware-in-the-loop) simulací.

Literatura

1. Vlk, F. *Dynamika motorových vozidel: Jízdní odpory, hnací charakteristika, brzdění, odpružení, říditelnost, ovladatelnost, stabilita*. 2. vydání. Brno : Prof. Ing. František Vlk, DrSc., nakladatelství a vydavatelství, 2003. ISBN 80-239-0024-2.
2. Boháč, P. *Modely člověka v řídicích systémech*. FEKT, VUT. Brno : autor neznámý, 2011. str. 55 s , Bakalářská práce. Vedoucí BP: Ing. Marie Havlíková, Ph.D..
3. *Interacting with In-Vehicle Systems: Understanding, Measuring, and Evaluating Attention*. Bach, K.M., a další. Aalborg University : British Computer Society, 2009. People and Computers XXIII. stránky 453-462.
4. *Operability of Joystick-Type Steering Device Considering Human Arm Impedance Characteristics*. Youngwoo, Kim a kol., a. 2012. IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics - Part A: Systems and Humans, Vol. 42, No.2, p. 295-306.
5. Havlíková, M. Simulační modely člověk - vozidlo. *Automatizace*. 2009, vol. 52, no.4, stránky 236-241.
6. *Analysis of pilot landing control in crosswind using neural networks*. Mori, R a Suzuki, S. Tokyo : IEEE, 2009. Aerospace conference, IEEE. stránky 1-10. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4839640&isnumber=4839294>. 981-1-4244-2622-5.
7. *Operability of Joystick-Type Steering Device Considering Human Arm Impedance Characteristics*. Youngwoo, Kim a kol., a. 2012. IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics - Part A: Systems and Humans, Vol. 42, No.2, p. 295-306.
8. Smith, C. *Tune to win*. Fallbrook : Aero Publishers, INC., 1978. ISBN 0-87938-071-3.
9. Jazar, Reza N. *Vehicle Dynamics: Theory and Application*. Riverdale : Springer, 2008. 978-0-387-74243-4.
10. Blaťák, O. *Analýza měření jízdní dynamiky vozidel*. FSI, VUT. Brno : autor neznámý, 2010. Teze dizertační práce.
11. Ungoren, A a Peng, H. *Evaluation of vehicle dynamic control for rollover prevention*. University of Michigan. Michigan : autor neznámý, 2003. str. 8 s.
12. Automix. Losí test Dacie Duster nedopadol najlepšie. *Automix.sk*. [Online] 11. 08 2010. [Citace: 02. 05 2012.] <http://automix.atlas.sk/na-cestach/689275/losi-test-dacie-duster-nedopadol-najlepsie>.
13. Wikipedia. Simulated annealing. [Online] 05. 04 2012. [Citace: 02. 05 2012.] http://en.wikipedia.org/wiki/Simulated_annealing.
14. Pivoňka, P. *Číslicová řídicí technika*. Brno : VUT FEKT, 2003.
15. Boháč, P., Fábry, T. a Faltus, I. *Projekt MRBT: Model šestiosého robotu v prostředí Matlab*. Brno : VUT FEKT, 2012.
16. VRML - Wikipedie. [Online] Wikipedia, 30. 8 2012. <http://cs.wikipedia.org/wiki/VRML>.

17. *Human Simulating Control Algorithm on Vehicle Lateral Tracking*. Youchun, Xu a kol., a. Boston, USA : autor neznámý, 2004. American Control Conference, p. 4728-4733.
18. Vala, M. *Bojová a speciální vozidla I: mechanika pohybu kolových vozidel*. 1. vydání. Brno : Univerzita Obrany, 2008. str. 99 s. ISBN 978-80-7231-574-1.
19. *Electronic stability control: review research and regulations*. Paine, M. 2005. Vehicle Design and Research. str. 30s.
20. *Application of Computers to Automobile Control and Stability Problems*. Kohr, Robert. NY : autor neznámý, 1957. Proceedings of the Eastern Computer Conference. stránky 84-89.
21. *Research on Adaptive Control Method of Autonomous Vehicle Lateral Motion*. Jun, Gu a Huapeng, Zhou. Nanjing, Čína : autor neznámý, 2010. International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM).
22. Criens, C, a další. *Building a MATLAB based Formula Student simulator*. Technická univerzita Eindhoven. Eindhoven : autor neznámý, 2006. str. 77 s. DCT 2006.069.
23. Breuer, J. *Analysis of driver - vehicle interactions in masive manouvre - result of "Moose test" studies*. Germany : Daimler-Benz AG. 98-S2-W-35.
24. Brabec, P, Ho, H a Voženílek, R. *Simulace průjezdu vozidla zatáčkou*. Technická univerzita v Liberci. Liberec : autor neznámý, 2003. str. 20s. SM462/2003.
25. Brabec, P a Voženílek, R. *Jednostopý a dvoustopý model vozidla*. Liberec : Technická univerzita v Liberci.
<http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2002/Jednostopy%20a%20dvoustopy%20model%20vozidla.pdf>.
26. Žára, Jiří. *VRML97 Laskavý průvodce virtuálními světy*. Praha : Computer Press, 1999. 80-7226-143-6.

Seznam zkratek:

ε	[°]	úhel natočení podélné osy vozidla,
δ	[°]	úhel natočení kol vozidla,
α	[°]	úhel výchylky směru pohybu vozidla oproti jeho podélné ose,
x	[m]	podélná poloha vozidla,
y	[m]	příčná poloha vozidla,
y_e	[m]	vzdálenost vozidla od středu vozovky,
$e(t)$	[m]	regulační odchylka,
$x(t)$	[°]	akční zásah, zde odpovídá natočení volantu,
$w_y(t)$	[m]	požadovaná trajektorie,
Y_{PID}	[-]	model PID regulátoru,
K	[-]	konstanta zesílení, u McRuerova modelu reprezentuje zvyklosti řidiče
T_I	[s]	integrační časová konstanta,
T_D	[s]	derivační časová konstanta,
Y_K	[-]	kompenzační model řidiče,
Y_R	[-]	McRuerův model řidiče,
T_d	[s]	dopravní zpoždění mezi očním vjemem a odezvou mozku,
T_i	[s]	zpožd'ující setrvačná konstanta související s naučenými stereotypy,
T_n	[s]	setrvačná konstanta udávající zpoždění dané neuromuskulárním systémem,
T_a	[s]	prediktivní konstanta závislá na zkušenosti řidiče,
F_{yr}	[N]	boční síla působící na zadní kola,
F_{yf}	[N]	boční síla působící na přední kola,
H_r	[N]	hnací síla působící na zadní kola,
H_f	[N]	hnací síla působící na přední kola,
m	[kg]	hmotnost vozidla,
v	[km/h]	rychlost vozidla,
C_α	[N/°]	směrová tuhost pneumatik,
O_v	[N]	valivý odpor,
J_z	[kg m ²]	moment setrvačnosti vozidla,
N	[N]	odpor vzduchu,
e	[m]	rozdíl mezi tlakovým středem vzdušné síly a těžištěm,
S_k	[N]	boční vodící síla,
α_k	[°]	směrová výchylka pohybu kola,
V_k	[°]	skutečný směr jízdy kola,
R	[m]	poloměr kruhové dráhy při ustáleném zatačení,
l	[m]	délka vozidla,
b	[m]	šířka vozidla,
γ	[-]	konstanta dozrívání,
ω_0	[rad/s]	kmitání netlumené soustavy,

T_p	[s]	časová konstanta predikce,
x_0	[-]	stavový vektor modelu řidiče.

Seznam příloh:

Příloha 1. CD