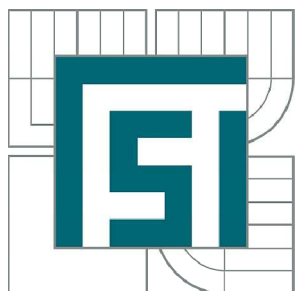


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

VIZUALIZACE POHYBU VOZIDLA SE ČTYŘMI ŘÍZENÝMI A HNANÝMI KOLY

VISUALIZATION OF 4WS AND 4WD VEHICLE MOVEMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MARTIN BLECHTA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

BRNO 2012

Ing. VOJTĚCH LAMBERSKÝ

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství
Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Martin Blechta
který/která studuje v **bakalářském studijním programu**
obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Vizualizace pohybu vozidla se čtyřmi řízenými a hnanými koly

v anglickém jazyce:

Visualization of 4WS and 4WD vehicle movement

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce navazuje na projekt car4 (vozidlo s čtyřmi řízenými a hnanými koly) realizovaný v MechLabu v r. 2010. Výsledkem práce bude otevřené prostředí umožňující testování vlastností různých dynamických modelů pohybu vozidla a různých algoritmu řízení. Předpokládá se implementace v prostředí Matlab/Simulink s využitím VR toolboxu.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Vytvoření prostředí pro vizualizaci pohybu vozidla s čtyřmi řízenými koly ve VRML. Vizualizace bude připojena na dodaný kinematický/dynamický model vozidla. Řízení pohybu bude provedeno pomocí joysticku nebo programově.
- 2) Návrh algoritmu na řízení natáčení zadních kol v závislosti na rychlosti vozidla.
- 3) Propojení simulačního modelu běžícího na dSPACE s vizualizací ve VRML (knihovna MLIB).
- 4) Vytvoření několika demonstračních scénářů pohybu vozidla (parkování, jízda po okruhu, smyk).

Seznam odborné literatury:

- Valášek, M.: Mechatronika, Vydavatelství ČVUT 1995
- Dušek, F.: Matlab a Simulink, skriptum ČVUT
- Kratochvíl: Mechanika těles - dynamika, skriptum FSI VUT v Brně
- Grepl, R.: Modelování mechatronických systémů v Matlab/SimMechanics, BEN, 2007
- Noskiewicz: Modelování a identifikace systému
- Gergelitsová Š.: VRML v příkladech, BEN, 2004
- Horáček, P.: Systémy a modely, ČVUT 1999

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Vojtech Lamberský

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 18.11.2011

L.S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Abstrakt

Tato práce se zabývá vývojem prostředí pro vizualizaci pohybu dvoustopého experimentálního vozidla se všemi říditelnými a hnanými koly popsaného jeho matematickým modelem. Vizualizace umožňuje testování různých dynamických modelů a lze ji ovládat joystickem a programově. Je zde navrhnut algoritmus pro řízení zadních kol vozidla v závislosti na rychlosti vozidla. Tento algoritmus je validován výpočetní simulací i provedeným experimentem. Matematický model experimentálního vozidla je propojen se systémem dSPACE, jenž umožňuje řízení v reálném čase. Je zde řešena vhodnost knihovny MLIB k zápisu a čtení dat při běhu simulace na systému dSPACE.

Abstract

The aim of the thesis is to develop a graphical interface for visualization of 4WS and 4WD vehicle movement defined by its mathematical model. The visualization allows testing of various dynamic and kinematic models. The visualization is controlled either with joystick or a program input. An algorithm for rear wheels steering in dependence on speed is created and validated with a computational simulation and an experiment. The mathematical model defining the vehicle movement is connected with the dSPACE system enabling real time control. The thesis evaluates advantages and disadvantages of using the MLIB library for communication between dSPACE system and MATLAB.

Klíčová slova

VRML, virtuální realita, vizualizace, 4WS, 4WD, řízení zadních kol, řízení v reálném čase, dSPACE, MLIB

Keywords

VRML, virtual reality, visualization, 4WS, 4WD, rear wheels steering, real time simulation, dSPACE, MLIB

Bibliografická citace práce

BLECHTA, M. *Vizualizace pohybu vozidla se čtyřmi řízenými a hnanými koly*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 46 s. Vedoucí bakalářské práce Ing.Vojtěch Lamberský.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že předložená bakalářská práce je původní a zpracoval jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem ve své práci neporušil autorská práva (ve smyslu Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

Martin Blechta, Brno, 2012

Poděkování

Chtěl bych poděkovat všem, kteří mi při tvorbě této práce pomáhali. Především vedoucímu bakalářské práce Ing. Vojtěchu Lamberskému a Ing. Robertu Greplovi Ph.D za cenné rady. Dále bych chtěl poděkovat rodičům za podporu během celého studia.

Obsah

Úvod.....	13
1. Rešerše	14
1.1 Virtuální realita.....	14
1.2 Řízení zadních kol vozidla	16
1.3 Systém dSPACE	17
2 Tvorba prostředí pro vizualizaci vozidla se čtyřmi řízenými koly ve VRML.....	19
2.1 Postup vytváření prostředí pro vizualizaci vozidla se čtyřmi řízenými koly ve VRML....	19
2.1.1 Tvorba modelu experimentálního vozidla	19
2.1.2 Tvorba modelu testovacího závodního okruhu	20
2.1.3 Tvorba viewpointů	21
2.1.4 Tvorba tachometru.....	22
2.1.5 Tvorba modelu pro vykreslování působících sil	22
2.2 Propojení VRML vizualizace s prostředím MATLAB/Simulink	23
2.3 Způsoby řízení	24
2.3.1 Programové řízení	24
2.3.2 Řízení pomocí periférií	25
2.4 Univerzálnost vizualizace	25
3 Návrh algoritmu pro řízení a natáčení zadních kol.....	26
3.1 Stanovení poměrného natočení zadních kol k_p	26
3.1.1 Odvození vztahu pro směrovou úchylku těžiště	26
3.1.2 Sestrojení závislosti poměrného natočení zadních kol na rychlosti	28
3.2 Implementace algoritmu pro řízení zadních kol do Simulinku.....	29
3.3 Testování algoritmu pro řízení zadních kol při nesouhlasném řízení za pomalých rychlostí	30
3.3.1 Simulace nesouhlasného řízení zadních kol	30
3.3.2 Experimentální měření při nesouhlasném řízení zadních kol	31
3.4 Testování algoritmu pro řízení zadních kol při souhlasném řízení za vysokých rychlostí	32
3.4.1. Simulace souhlasného řízení zadních kol	33
3.4.2 Experimentální měření při souhlasném řízení zadních kol	34
4 Demonstrační scénáře.....	36
4.1 Tvorba demonstračních scénářů	36
4.2 Možnosti záznamu demonstračních scénářů.....	37

5 Propojení simulačního modelu běžícího na dSPACE s vizualizací ve VRML	38
5.1 Testování čtení a zápisu dat z a do systému dSPACE pomocí knihovny MLIB na příkladu kyvadla.....	39
5.2 Tvorba modelů pro propojení simulačního modelu běžícího na dSPACE se Simulink VRML vizualizací	41
Závěr	43
Literatura a odkazy	44
Přílohy na CD	46

Úvod

Simulace, vizualizace a jiné progresivní metody počítačového testování se stávají stále důležitějším prvkem vývojového cyklu většiny automobilů. Matematický model, jenž co nepřesněji popisuje pohyb vozidla, může sloužit jako velmi vhodná platforma pro jeho testování. Vizualizace pohybu pak jako názorný výstup simulace. Pomocí simulačních experimentů a jejich vizualizace může být efektivně testováno velké množství jízdních vlastností vozidla bez nutnosti provádět měření na skutečném vozidle. Lze tak výrazně zrychlit vývojový cyklus vozidla i snížit náklady. Při vizualizování pohybu vozidla je vhodné vizualizaci doplnit dalšími prvky zobrazujícími průběh simulace. Například vykreslováním sil působících na vozidlo během jízdy, zobrazením hodnot okamžité rychlosti, otáček motoru, hodnot prokluzů pneumatik a dalšími. Vznikne tak komplexní simulátor pro testování jízdních vlastností vozidla. Počítačová vizualizace nemusí sloužit pouze pro vizualizování pohybu vozidla či jeho jednotlivých dílů, ale také celých výrobních procesů. Setkáváme se zde s pojmy digitální podnik nebo digitální továrna, které představují kompletní názornou vizuální reprezentaci reálné výroby ve virtuálním prostředí. Vizualizace a simulace nacházejí uplatnění především v případech, kdy je příliš nákladná, či dokonce nemožná výroba prototypu. Názorná vizualizace komplexního problému dokáže výrazně usnadnit chápání vazeb mezi jednotlivými komponentami a ulehčit tak porozumění funkci celého mechanismu.

Metody počítačového testování se vyvíjejí společně s vývojem současných vozidel, na které jsou kladeny stále se zvyšující nároky na bezpečnost, spotřebu, výkon a ovladatelnost. Zvyšující se požadavky kladené na úroveň silničních dopravních prostředků dávají prostor pro vznik inovací a vylepšení. V poslední době se u osobních automobilů do popředí zájmu dostává systém řízení zadních kol. Mezi hlavní požadavky kladené na experimentální vozidlo *CAR4* je obratnost a snadná manévrovatelnost. Vylepšení těchto vlastností může být dosaženo právě řízením kol zadní nápravy. U osobních automobilů je aktivní řízení zadních kol zatím spíše ojedinělé, v oblasti experimentálních vozidel a robotů je však velmi často využíváno pro zlepšení obratnosti a manévrovatelnosti vozidel v omezených prostorách.

Předešlé řádky napovídají, že komplexní matematický model popisující pohyb vozidla s oběma řiditelnými nápravami, obsahující také prvky aktivní bezpečnosti a jiné pokročilé technologie, může být poněkud výpočetně náročným problémem. Zvyšující se nároky kladené na přesnost a rychlost simulací vytváří potřebu výkonného hardwaru pro jejich zpracování. Setkáváme se zde se systémy pro řízení a simulace v reálném čase. Tyto systémy kombinují výkonný hardware s automaticky generovaným kódem z prostředí pro modelování dynamických systémů. Společně tak tvoří efektivní nástroj pro vývoj řídicích systémů a jejich testování.

1. Rešerše

V této kapitole je sepsána literární rešerše v oblastech virtuální realita, systém řízení zadních kol vozidla a využití systému dSPACE, poskytující seznámení s pojmy a postupy které jsou použity v řešení práce. Z důvodu mezioborového charakteru práce byl podle doporučení [17] zvolen systém popisů prostudované odborné literatury a dalších zdrojů.

1.1 Virtuální realita

Laskavý průvodce virtuálními světy [1]

Přehledná publikace pokrývající rozsáhlé spektrum virtuální reality, založené na jazyku VRML 97. Klíčová publikace pro všechny odborníky či nadšence v oboru virtuální reality. Kniha je psána velmi srozumitelnou formou a poskytuje přehledný postup tvorby jak jednoduchých těles tak komplexních virtuálních světů.

- Je zde názorně vysvětlena stromová struktura a vztah rodič – potomek, typický pro jazyk VRML.
- Kniha podrobně vysvětluje pokročilé používání textur.
- Uvádí také přehled použitelných interaktivních prvků a dynamických scén.
- Popisuje možnosti exportu VRML objektů ve formátu .avi či jako trajektorie trojrozměrných těles.

VRML v příkladech [2]

Publikace vysvětlující používání jazyka VRML na souboru více než 70 příkladů. Vhodná pro naučení práce s VRML prostřednictvím editovatelného kódu příložených příkladů.

- Uvedené příklady dobře demonstují doporučené postupy obvyklé při tvorbě virtuální scény.
- Je zde velmi dobře vysvětleno kombinování virtuálních světů pomocí prvku *Inline*.
- Součástí knihy je také CD, které obsahuje zdrojové texty všech příkladů uvedených v knize, instalační soubor prohlížeče *Cortona VRML Client 4.1* a dokumentaci normy VRML 97.

Vizualizace dynamických systémů v prostředí virtuální reality [10]

Tento učební text k semináři se přímo zaměřuje na propojení dynamických modelů s virtuálními světy v prostředí *MATLAB* a *Simulink*. Obsahuje také stručný úvod k jazyku VRML.

- Je zde popsána rozlišenost souřadného systému, jenž používá MATLAB a souřadného systému ve VRML. Také uvádí jednoduchou transformaci souřadnic pro převod mezi těmito souřadnými systémy.
- Text představuje parametry těles virtuálních objektů, jenž je možno ovládat z prostředí *Simulink*.
- Je zde vysvětlena problematika velikosti datových typů a nutnost používat blok *VR Signal Expander* pro doplnění vektoru na potřebný rozměr.
- Věnuje se také exportu modelů vytvořených v CAD programech do formátu VRML. Uvádí možnost využití externího konvertoru, neobsahuje – li používaný CAD program možnost exportu do VRML přímo.

Modelování mechatronických systémů v Matlab SimMechanics [3]

Hlavním zaměřením publikace je modelování kinematiky a dynamiky soustavy tuhých těles v prostředí *MATLAB* a *SimMechanics*. Obsahuje také kapitolu věnující se vizualizaci mechanismů ve VRML.

- Kniha se také věnuje prostorové transformaci ve VRML.
- Uvádí kladné zkušenosti s exportem z programu *SolidWorks* do formátu VRML a také nutnost úpravy exportovaného modelu do patřičné stromové struktury ve VRML editoru.
- Náznorně je vysvětleno schéma propojení vizualizace a matematického modelu.
- Je zde řešena ukázková úloha vizualizace rovinného manipulátoru.

Dokumentace k produktu Simulink 3D Animation [11]

Obsahuje kompletní přehled příkazů a bloků k vytváření vizualizací za pomoci *Simulink VR Toolboxu*. Obzvláště užitečná jsou demo dostupná z MATLABU a k nim vytvořené online video semináře.

- Je zde dostupný ucelený popis funkcí bloku i s užitečnými tipy.
- Obsahuje výuková demo, která demonstrují možnosti propojení Simulink modelu a virtuální reality. Jsou zde vizualizace aplikací napříč technickou sférou.

The Virtual Reality Modeling Language [12]

Norma jazyka VRML 97. Část 1: International Standard ISO/IEC 14772-1:1997, definuje základní funkce a textové kódování jazyka VRML.

Rekapitulace

Virtuální realita je nadstavba počítačové grafiky, která umožňuje nejen vytvářet komplikované 3D modely a scény, ale také uživatelskou interakci s nimi. Virtuální realita navozuje iluzi trojrozměrného prostoru zobrazovanou na obrazovce počítače. Pocit trojrozměrného zobrazení je umocněn schopností uživatele vstupovat do scény, pohybovat se v ní a pomocí interaktivních prvků ovlivňovat a zasahovat do jejího chodu. Děje ve virtuálním světě probíhají s okamžitou odezvou na vstupní aktivitu uživatele.

Pro zápis virtuálních scén se používá jazyk VRML (Virtual Reality Modeling Language). Zápis každé virtuální scény má stromovou strukturu která obsahuje jednotlivá tělesa a jejich

vlastnosti. Každá scéna má dědičnou strukturu s jasně daným vztahem rodič – potomek, přičemž potomek přebírá vlastnosti nadřazeného prvku – rodiče. Základními prvky pro tvorbu virtuálních světů jsou jednoduchá tělesa a plochy, které je možné dále upravovat přidáváním bitmapových či video textur.

Pohyb a další vlastnosti virtuálních těles lze ovládat z prostředí Simulink a vytvořit tak vizualizaci kinematických a dynamických modelů soustav tuhých těles a dalších soustav popsaných jejich matematickým modelem.

1.2 Řízení zadních kol vozidla

Dynamika motorových vozidel [4]

Velmi rozsáhlá publikace věnující se problematice motorových vozidel. Obsahuje široký přehled znalostí pro pracovníky v oblasti motorových vozidel.

- V knize je podrobně rozebrána dynamika jízdy vozidla se všemi řízenými koly pro jednostopý lineární model.
- Uvádí závislost úhlů rejdu předních a zadních kol na úhlu natočení volantu.
- Uvádí závislost relativního úhlu rejdu zadní nápravy na rychlosti jízdy.
- Literatura také popisuje řízení zadních kol v závislosti na stáčivé rychlosti.
- Porovnává různé způsoby řízení zadních kol.

Systémy řízení zadních kol automobilu [13]

Rozsáhlý článek zabývající se možnostmi řízení zadních kol automobilu.

- Článek vysvětluje rozdíly mezi souhlasným a nesouhlasným řízením zadních kol.
- Prezentuje tři nejčastěji používané systémy řízení zadních kol a to mechanický, elektrohydraulický a elektromechanický.
- Uvádí také princip činnosti řídicího systému vozidla vybaveného říditelnými zadními koly.
- Článek uvádí výhodu jednoduchého modelování jednostopého modelu v porovnání s dvoustopým, při dosažení velmi dobrých výsledků. Při použití dvoustopého modelu lze simulací získat také údaj o klopení karoserie.

Systémy řízení směrové ovladatelnosti automobilu [14]

Tato studie pojednává o dvounápravových vozidlech s možností natáčení předních i zadních kol, za účelem zvýšení směrové stability. Navrhuje model natáčení zadních kol ve snaze minimalizovat směrovou odchylku vozidla.

- Článek popisuje komplexní matematický model podle Tůmy[6], jenž umožňuje pozorovat také průběh rozložení bočních sil při průjezdu zatáčkou či vliv sbíhavosti kol.
- Jsou zde prováděny simulace v prostředí MATLAB a Simulink, simulující jízdu v kruhu a přejíždění mezi jízdními pruhy.

- Článek také porovnává možná provedení řízení zadních kol způsobem mechanickým, programovým a programovým s použitím zpětné vazby realizované pomocí proporcionálního regulátoru.

Simulace řízení zadních kol automobilu [15]

Článek uvádí konkrétní výsledky simulací řízení zadních kol automobilu. Popisuje také podmínky zjednodušení pro testování jednostopého modelu. Jsou zde porovnány výsledky simulací pro různá proporcionální natočení zadních kol v závislosti na natočení volantu.

- Článek prezentuje možnosti snížení směrové odchylky, příčného zrychlení a stáčivé rychlosti při použití různých poměrných koeficientů natočení zadních kol
- Na základě výsledků provedených simulací shrnuje možnosti příznivého ovlivnění stability pohybu vozidla při využití systému řízení zadních kol.

Rekapitulace

Z provedené rešerše v oblasti řízení zadních kol lze vyvodit tyto závěry důležité pro další práci. Systém řízení zadních kol vozidla funguje ve dvou hlavních módech v závislosti na rychlosti pohybu vozidla. Při nízkých rychlostech se zadní kola natáčí v opačném směru než kola přední. Jedná se o takzvané nesouhlasné řízení. Tento způsob zlepšuje manévrovatelnost vozidla a výrazně zmenšuje poloměr zatáčení. Je vhodné jej využít při parkování či pomalém pohybu v omezeném prostoru. Naopak při pohybech vysokou rychlostí je účelné natáčet zadní kola ve stejném směru jako kola přední. Jedná se o souhlasné řízení, které může mít příznivý vliv na stabilitu pohybu vozidla při změnách směru jízdy ve vysokých rychlostech. Je potřebné stanovit součinitel k_p , který určuje poměrné natočení zadních kol ke kolům předním v závislosti na rychlosti. Součinitel k_p je ovlivňován konstrukcí automobilu, pneumatikami a jízdními vlastnostmi vozidla a je jedinečný pro každý typ automobilu.

1.3 Systém dSPACE

dSPACE Systems - First Work Steps [7]

Velmi přínosná příručka pro začínající uživatele systému dSPACE. Pokrývá celé spektrum základních znalostí týkajících se funkcí a ovládání systému dSPACE.

- Uvádí postupy pro správné propojení platformy dSPACE a hostitelského počítače.
- Poskytuje návod pro registraci dSPACE karty v prostředí MATLABu.
- Příručka obsahuje názorné příklady jak vygenerovat real – time aplikace a spustit ji na systému dSPACE.
- Představuje používání aplikace Control Desk a možnosti zobrazování a práce s modely spuštěnými na systému dSPACE.

dSPACE Systems – Implementation Guide [8]

Tato rozsáhlá publikace pokrývá téma ovládání a upravování simulace během jejího chodu na systému dSPACE.

- Uvádí doporučení pro tvorbu S – funkcí pro Simulink a real – time aplikace.
- Představuje možnosti vstupů a výstupů pomocí kterých lze číst a zapisovat data z a do systému dSPACE.
- Zabývá se editací C kódu, který není generovaný přímo MATLABem a jeho implementací do real – time modelu.

MATLAB dSPACE Interface Libraries [9]

Příručka obsahuje podrobný návod na propojení real time aplikace běžící na systému dSPACE s uživatelským prostředím MATLABu pomocí funkcí MLIB a MTRACE.

- Poskytuje přehled příkazů pro zápis, čtení či editaci zkompilovaného kódu běžícího na dSPACE.
- Poskytuje doporučení pro MLIB a MTRACE programování.
- Obsahuje zdrojový kód vzorových editovatelných demo příkladů.

Rekapitulace

dSPACE je systém, který umožňuje řízení, testování a simulace v reálném čase. Jedná se o velmi výkonný hardware, který je dostupný v provedení od jednodeskových řešení až po multiprocessorové systémy. Na tomto výkonném hardwaru je spuštěn program, který je automaticky generován z prostředí Simulink. Průběh experimentu je možno sledovat načítáním dat funkcí MLIB zpět do prostředí Simulink nebo pomocí virtuálních nástrojů aplikace ControlDesk.

2 Tvorba prostředí pro vizualizaci vozidla se čtyřmi řízenými koly ve VRML

Tato kapitola se zabývá problematikou tvorby a zobrazování vizualizací v prostředí virtuální reality a možnostmi virtuálního světa. Jsou zde prezentovány nástroje používané pro tvorbu virtuálních scén a podrobný postup tvorby virtuálního testovacího prostředí pro model experimentálního vozidla. Kapitola se také zabývá různými způsoby ovládání vizualizace a jejím propojení s matematickým modelem popisujícím pohyb vozidla.

2.1 Postup vytváření prostředí pro vizualizaci vozidla se čtyřmi řízenými koly ve VRML

Prostředí pro vizualizaci experimentálního vozidla bylo vytvořeno v programu VrealmBuilder, jednotlivé objekty pak v programech SolidWorks a Rhinoceros. Program VrealmBuilder umožňuje pomocí editačních oken současně zobrazovat model i stromovou strukturu scény a obsahuje velké množství základních i pokročilých funkcí pro editaci VR světů. Nedisponuje však tak komfortním uživatelským prostředím pro dynamické modelování jaké umožňují CAD programy. Proto byla většina komplikovaných tvarů vytvořena v programu SolidWorks a exportována do *.wrl souboru. Tyto exporty byly začleněny do stromové struktury v programu VrealmBuilder, změněny v měřítku světa a doplněny o příslušné textury pro vytvoření realistického dojmu.

2.1.1 Tvorba modelu experimentálního vozidla

Jako model vozidla byl nejprve použit jeho skutečný model vytvořený v programu SolidWorks, který však pro své komplikované geometrické provedení a ohromné množství dílů výrazně zpomaloval chod vizualizace. Nejprve byly odstraněny díly, které nejsou pro vizualizaci pohybu důležité. Především šrouby, závitové díry, drobná zaoblení a zkosení. Tyto úpravy nepřinesly žádné výrazné zrychlení chodu vizualizace. Dále byla odstraněna řídící elektronika, motory, serva a díry pro odlehčení. I po provedených zjednodušeních se tento komplikovaný model ukázal jako nevhodný pro svižný chod animace.

Byl vytvořen zjednodušený model vozidla v programu VrealmBuilder tvořený tělem, nápravami, vazbami kol a koly. Model je uveden na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: VRML model vozidla

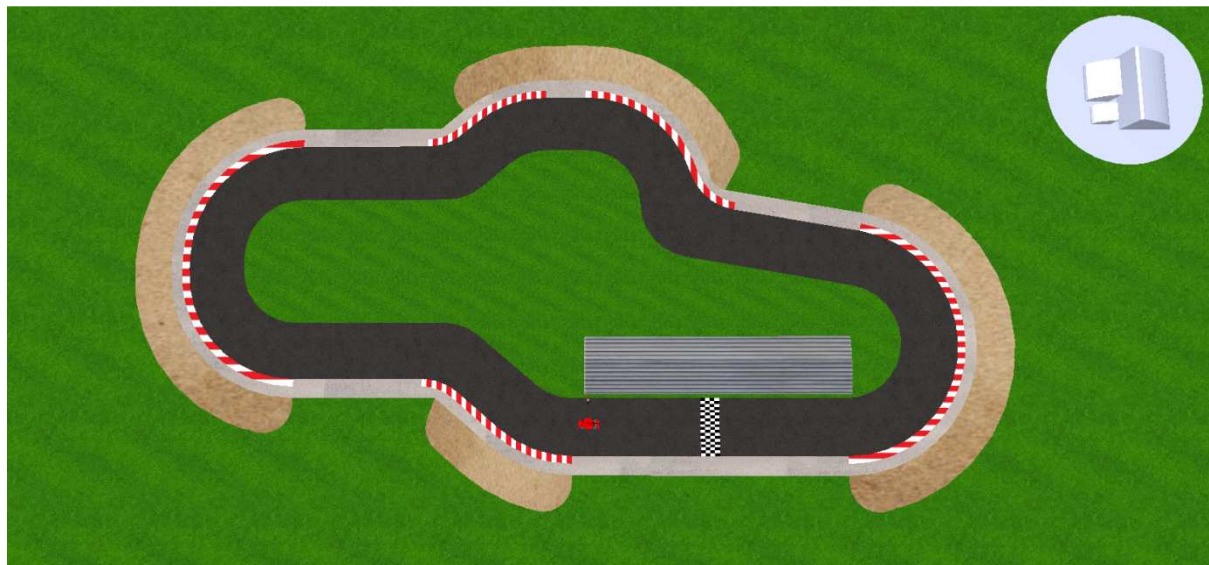
Na tomto modelu je možno názorně vysvětlit stromovou strukturu a vztah rodič – potomek typický pro jazyk VRML. Každý objekt je ve virtuálním světě určen několika parametry, například parametrem polohy, natočení, zvětšení a dalšími. K těmto parametrům lze přistupovat ze Simulinku a měnit tak například polohu objektu ve virtuálním světě. U experimentálního vozidla je 11 parametrů, jenž jsou ovládány z prostředí Simulinku. Jedná se o polohu vozidla, jednoznačně určenou souřadnicemi x a y , natočení vozidla, natočení všech čtyř kol ve směru zatáčení a také čtyři různé rychlosti rotace kol. Model je ve stromové struktuře definován tak, že tělo vozidla je na nejvyšší úrovni a vazby kol a kola jsou určeny jako jeho potomci. Při pohybu nadřazeného prvku, v tomto případě těla vozidla, tento pohyb přebírají také všichni závislí potomci, v tomto případě vazby kol a kola. Na další úrovni stromové struktury jsou umístěny vazby kol, které jsou potomek těla a rodič kol. Ze Simulinku přistupují k parametru rotace vazeb, jenž reprezentuje natočení kol. Kola která jsou potomkem vazeb tedy tento pohyb vykonávají také a natáčí se ve směru zatáčení. Na nejnižší úrovni je přistupováno k parametru rotace kol, který reprezentuje vlastní rotaci kola v závislosti na rychlosti.

Je nutno zmínit, že v jazyce VRML se nevytvářejí vazby mezi prvky tak jako v programech typu CAD, ale relace mezi prvky jsou určeny jejich vzájemnou polohou a natočením.

2.1.2 Tvorba modelu testovacího závodního okruhu

Závodní okruh byl vytvořen v programu SolidWorks, ve kterém se dá efektivně pracovat s křivkami. Po narysování základního tvaru okruhu byly další křivky vytvářeny jako ekvidistanty základního tvaru. Jednotlivé části okruhu byly spojeny v sestavu a exportovány do formátu *.wrl. Tento export nedovoluje zachovat barvy či textury těles. Exportované části byly tedy upraveny a doplněny o textury v programu VrealmBuilder. Jednoduché bitmapové

textury byly vytvořeny v grafickém programu Photoshop. Využity jsou i textury z texturové knihovny distribuované s programem VrealmBuilder.



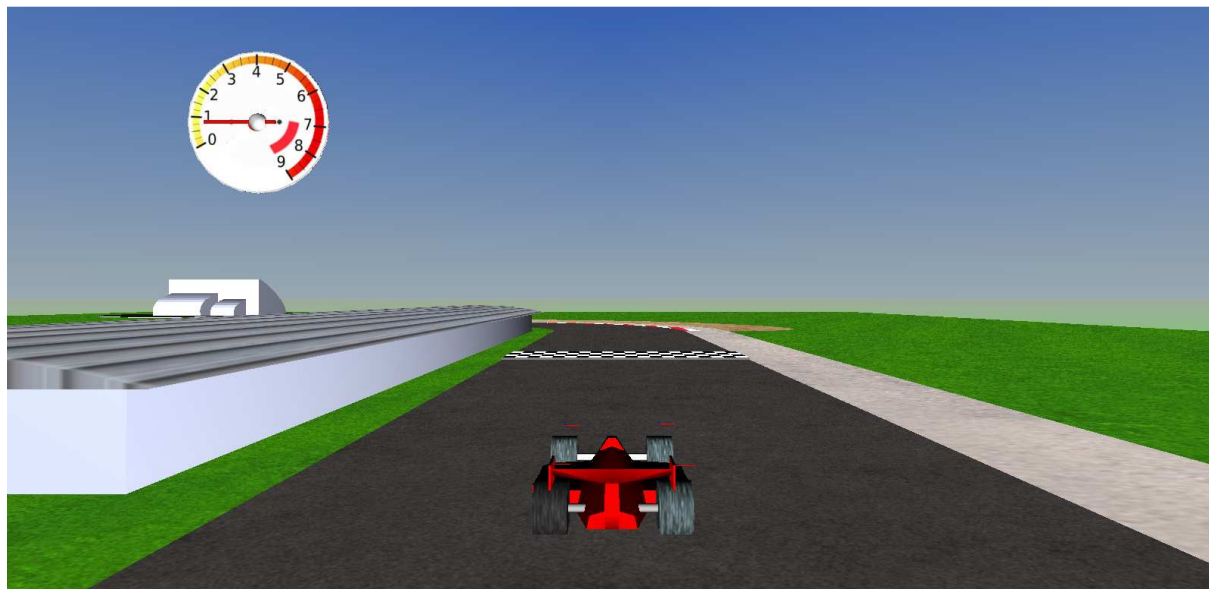
Obr. 2.2: Závodní okruh

Takto vytvořený okruh zobrazený ve VR prohlížeči je na obrázku 2.2.

2.1.3 Tvorba viewpointů

Viewpoint je stanoviště ve virtuální scéně s jasně definovanou pozicí a orientací natočení, ze kterého je možno sledovat virtuální svět. Mezi viewpointy se lze jednoduše pohybovat pomocí kláves *Page down* a *Page up* nebo jejich přepínáním v dialogovém okně VRML prohlížeče.

Pro VR svět experimentálního vozidla byly vytvořeny tři dynamické a jeden statický viewpoint. Dynamické viewpointy jsou definovány jako potomci těla automobilu, pohybují se tedy společně s ním.



Obr. 2.3: Viewpoint „Pohled zezadu“

Je možné zvolit pohled z viewpointu „Pohled řidiče“, který je pohledem na virtuální svět ze sedadla řidiče, viewpoint pojmenovaný „Pohled zezadu“, je umístěn za vozidlem a umožňuje tak vidět celé vozidlo. Tento pohled je znázorněn na obrázku 2.3. Poslední dynamický pohled „Pohled shora“, umožňuje pohled na vozidlo z ptáčích perspektivy.

Statický viewpoint „Pohled z dálky“ není potomkem těla vozidla ale samostatným uzlem ve virtuálním světě. Jeho poloha se tedy nemění a je z něj možno vidět celý závodní okruh z větší vzdálenosti.

Tyto viewpointy jsou jasně definované pohledy určené ve virtuálním světě. Svět je však možno libovolně procházet pomocí navigačního menu VRML prohlížeče. V prohlížeči lze volit různé typy pohybu po VR světě typické jsou *Walk*, *Examine* a *Fly*. Navigační panel VRML prohlížeče také zpravidla obsahuje šipky pro snazší pohyb virtuálním světem.

2.1.4 Tvorba tachometru

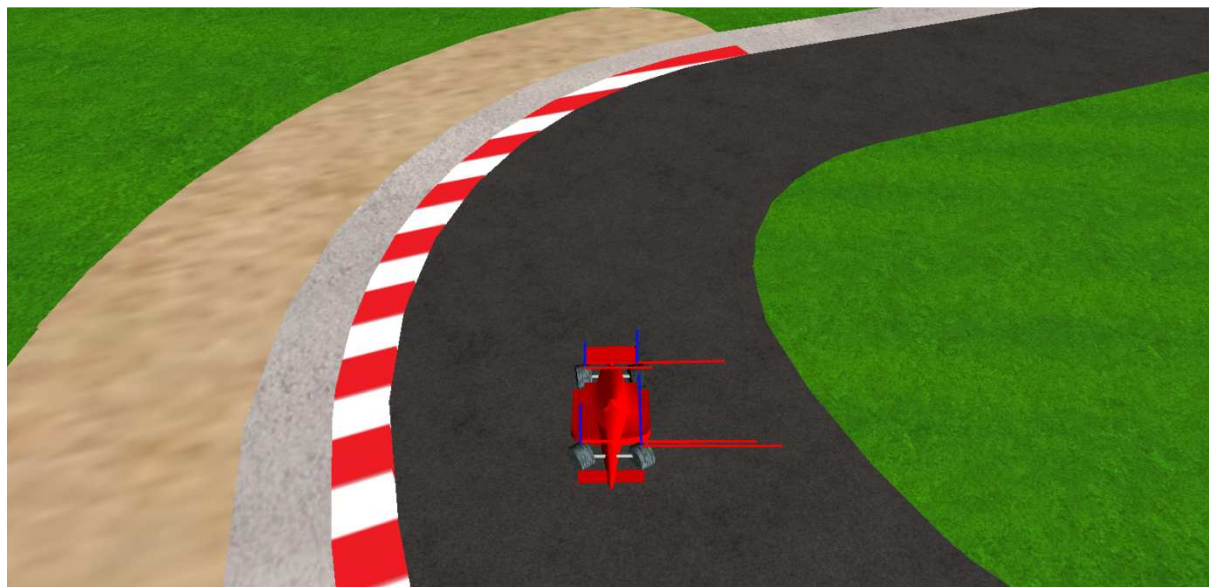
Ukazatel rychlosti je vytvořen jako válcové těleso o minimální výšce. Tento válec je doplněn bitmapovou texturou se vzhledem reálného ukazatele rychlosti. Parametr rotace ručičky je ovládán z prostředí Simulinku. Okamžitá rychlost vozidla je násobena výpočtem určenou konstantou pro přepočítání rychlosti na výchylku ručičky ukazatele. Tachometr tak umožňuje uživateli zjistit aktuální hodnotu rychlosti během vizualizace.

2.1.5 Tvorba modelu pro vykreslování působících sil

Vizualizace umožňuje uživateli ovládat vozidlo buď se dvěma nebo čtyřmi řízenými koly. Jednou z možností jak jednoduše porovnat výhody různého druhu řízení je porovnání sil působících na kola během jízdy. Síly působící na kola ve směru pohybu a také ve směru kolmém na směr pohybu jsou vypočítávány dynamickým modelem vozidla v Simulinku. Přesné hodnoty těchto sil je možné porovnat buď z grafů vykreslovaných v prostředí Simulinku nebo přímo během animace pomocí sil vykreslovaných v různých barevných odstínech do příslušných os pohybu.

Model sil tvoří tři úsečky svírající vzájemně úhel 90 stupňů. Jelikož je vymodelovaný okruh virtuálního světa vytvořen v rovině a neobsahuje žádné převýšení, hodnota vertikálních sil se nemění. Je vykreslována tedy jen síla působící ve směru pohybu vozidla a boční síla na směr pohybu kolmá. Pro přehlednost jsou vyvedeny v různých barevných odstínech. Model sil je vytvořen jako samostatný virtuální svět a vložen do virtuálního světa okruhu pomocí uzlu *Inline*, který umožňuje propojovat různé virtuální světy.

Působící síly jsou vykreslovány pro každé kolo vozidla. V hierarchii modelu jsou umístěny jako potomek příslušného kola. Zobrazení sil při průjezdu vozidla zatáčkou je na obrázku 2.4.



Obr. 2.4: Zobrazení sil působících na kola vozidla při průjezdu zatáčkou

Nárůst respektive pokles síly se projeví prodloužením respektive zkrácením úsečky tuto sílu reprezentující. Tato modifikace je prováděna parametrem *Scale*, jehož aktuální hodnota je načítána z prostředí Simulinku.

2.2 Propojení VRML vizualizace s prostředím MATLAB/Simulink

Pomocí natáčení joysticku vstupují do bloku kinematického a dynamického modelu hodnoty zrychlení a natočení vozidla. Vstupní údaj natočení nápravy je pomocí kinematických rovnic přepočítán na natočení jednotlivých kol. Ze vstupního parametru zrychlení je pomocí kinematických a dynamických závislostí určena celková rychlost automobilu a příslušné rychlosti rotace jednotlivých kol. Z určených hodnot rychlosti je integrací určena dráha pohybu. Poloha vozidla je v každém okamžiku jednoznačně určena souřadnicemi x a y v globálním souřadném systému. Z dynamických závislostí jsou dále dopočítávány velikosti sil působících na jednotlivá kola, prokluz kol a jízdní odpory. Kinematický a dynamický model byly vytvořeny jako diplomová práce Návrh dynamických modelů pro řízení trakce experimentálního vozidla [5].

Jak již bylo zmíněno každý objekt ve virtuálním světě je jednoznačně určen parametrem polohy a natočení, jejichž hodnota se dá během chodu vizualizace měnit nahráváním nových hodnot z prostředí Simulinku. Hodnoty, vypočtené pomocí kinematického a dynamického modelu, jsou tedy podle schématu předávány do jejich příslušných protějšků v bloku vizualizace. Názorné blokové schéma je uvedeno na obrázku 2.5.



Obr. 2.5: Schéma modelu experimentálního vozidla

Například poloha vozidla je ve virtuálním světě určena atributem vozidla s názvem *translation*, který je reprezentovaný vektorem se třemi složkami. Jelikož se při pohybu vozidla mění jen dvě souřadnice (vozidlo se nepohybuje ve vertikálním směru), je nutné pro zadání kompletního tří složkového vektoru použít blok *VR signal expander*, který doplní chybějící složku vektoru na potřebný rozměr. Alternativně je možno použít sběrnici se třemi vstupy a pomocí nulové konstanty doplnit chybějící třetí složku.

Rotace vozidla je určena atributem *rotation*, který je reprezentován vektorem se čtyřmi složkami. První tři složky určují osu rotace a poslední složka určuje hodnotu natočení v radiánech.

2.3 Způsoby řízení

V předchozím bodu byla představena možnost ovládání pohybu vozidla pomocí připojeného periferního zařízení. Někdy je však výhodné ovládat vozidlo programově pomocí přesně zadaných vstupních dat. Především pro potřeby experimentů je vhodné zadávat přesná vstupní data pomocí vytvořených signálů. Způsob řízení je možno přepnout z manuálního ovládání joystickem na programové řízení vstupním signálem pomocí dvoupolohového přepínače umístěného v simulinkovém modelu.

2.3.1 Programové řízení

Při zvolení programového řízení je možno využít několika přednastavených typů signálů, mezi kterými se vybírá přepnutím více portového přepínače či si naprogramovat libovolné nové vstupní hodnoty. Blok programového řízení obsahuje také vstupní signály vytvořených demonstračních scénářů experimentálního vozidla (viz. kapitola 4 Demonstrační scénáře).

2.3.2 Řízení pomocí periférií

Při řízení joystickem je ovládáno zrychlení vozidla pohybem rukojeti vpřed a vzad. Zatačení vozidla je ovládáno pohybem rukojeti doprava a doleva. Dvojice tlačítek umístěná vlevo na horní části rukojeti slouží k zapnutí a vypnutí zobrazování sil působících na vozidlo. Dvojice tlačítek umístěná vpravo na horní části rukojeti slouží k zapnutí a vypnutí natáčení všech čtyř kol. Schematické zobrazení ovládání pomocí joysticku je znázorněno na obrázku 2.6.



Obr. 2.6: Schéma řízení pomocí joysticku

Simulink nedovolí spustit matematický model, který obsahuje blok joysticku není-li tento joystick připojen. Při používání programového řízení bez připojeného periferního zařízení je tedy nutné blok joysticku z matematického modelu v Simulinku smazat.

2.4 Univerzálnost vizualizace

Velkou výhodou vizualizace je její univerzálnost. Je možno ji využít s různými matematickými modely a tak jednoduše vizualizovat chování modelů. Vizualizace pomůže získat představu o vlastnostech různých kinematických a dynamických modelů stejně tak jako pomůže studovat vlastnosti různých metod pro ovládání řízení vozidla. Při ovládání vozidla pomocí joysticku lze stiskem tlačítka přepínat mezi možnostmi dvou a čtyř řízených kol. Pomocí vykreslovaných sil lze jednoduše porovnat chování těchto dvou odlišných způsobů řízení během chodu vizualizace.

3 Návrh algoritmu pro řízení a natáčení zadních kol

V této kapitole je podle literatury uvedené v (1.2) odvezen algoritmus pro natáčení zadních kol v závislosti na rychlosti. Navržený algoritmus je poté validován simulačními výpočty a také experimentálním měřením provedeným s vozidlem CAR4. Pro názornost simulačních výpočtů jsou vytvořeny příslušné vizualizace. Kapitola obsahuje také implementaci algoritmu do prostředí MATLAB a Simulink.

3.1 Stanovení poměrného natočení zadních kol k_p

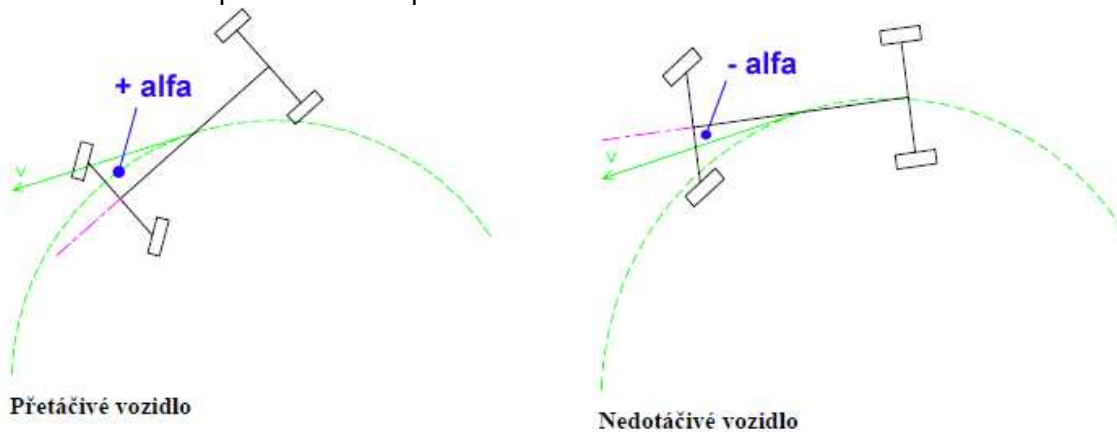
Podle Vlka [4] je natočení zadních kol určeno jako součin natočení předních kol a proporcionální konstanty k_p . Natočení zadních kol se určí podle vztahu (5.1), kde β_z je natočení zadních kol a β'_v je natočení kol předních.

$$\beta_z = k_p \beta'_v = k_p \frac{\beta_v}{i_f} \quad (5.1)$$

Klíčovým parametrem této úlohy je stanovit hodnotu konstanty k_p pro experimentální vozidlo, která je závislá na rychlosti pohybu vozidla. Kladné znaménko k_p určuje souhlasné řízení zadních kol, záporné znaménko určuje nesouhlasné řízení a hodnota $k_p=0$ znamená neřízená zadní kola konvenčního automobilu.

3.1.1 Odvození vztahu pro směrovou úchylku těžiště

Jedním ze způsobů jak určit optimální hodnotu k_p je provádět jízdu po kružnici a testovat vozidlo na přetáčivost respektive nedotáčivost.



Obr.3.1: Přetáčivé a nedotáčivé vozidlo [14]

Tuto vlastnost vozidla lze určit podle velikosti směrové úchylky α , která je svírána vektorem okamžité rychlosti pohybu těžiště vozidla a osou vozidla. Je-li $\alpha > 0$ vozidla má sklon k přetáčivosti, při $\alpha < 0$ je vozidlo nedotáčivé, jak je patrné z obrázku 3.1.

Podle [14] se se zmenšující velikostí směrové úchylky pohybu těžiště vozidla vzrůstá jistota řidiče při řízení automobilu. Minimalizováním směrové úchylky se limituje přetáčivost či nedotáčivost a vozidlo respektuje předepsaný směr pohybu. Vztah pro směrovou úchylku je podle [4].

$$\left(\frac{\alpha}{\beta'_v} \right) = \frac{C'_{\alpha p} C_{\alpha z} l (k_p l_p + l_z) - mv^2 (C'_{\alpha p} l_p - k_p C_{\alpha z} l_z)}{C'_{\alpha p} C_{\alpha z} l^2 - mv^2 (C'_{\alpha p} l_p - C_{\alpha z} l_z)} \quad (5.2)$$

Kde $C_{\alpha z}$ je směrová tuhost pneumatik zadní nápravy, $C_{\alpha p}$ je směrová tuhost přední nápravy, m je hmotnost vozidla, v je rychlost, l je délka vozidla a l_z a l_p je délka od těžiště vozidla k zadní respektive přední nápravě.

Pro experimentální vozidlo CAR4 lze vzhledem k souměrné geometrii zavést následující zjednodušení.

$$l_z = l_p = \frac{l}{2} \quad (5.3)$$

Vzhledem k použití shodných pneumatik lze zavést.

$$C'_{\alpha p} = C_{\alpha z} = C \quad (5.4)$$

Po dosazení (5.3) a (5.4) do (5.2).

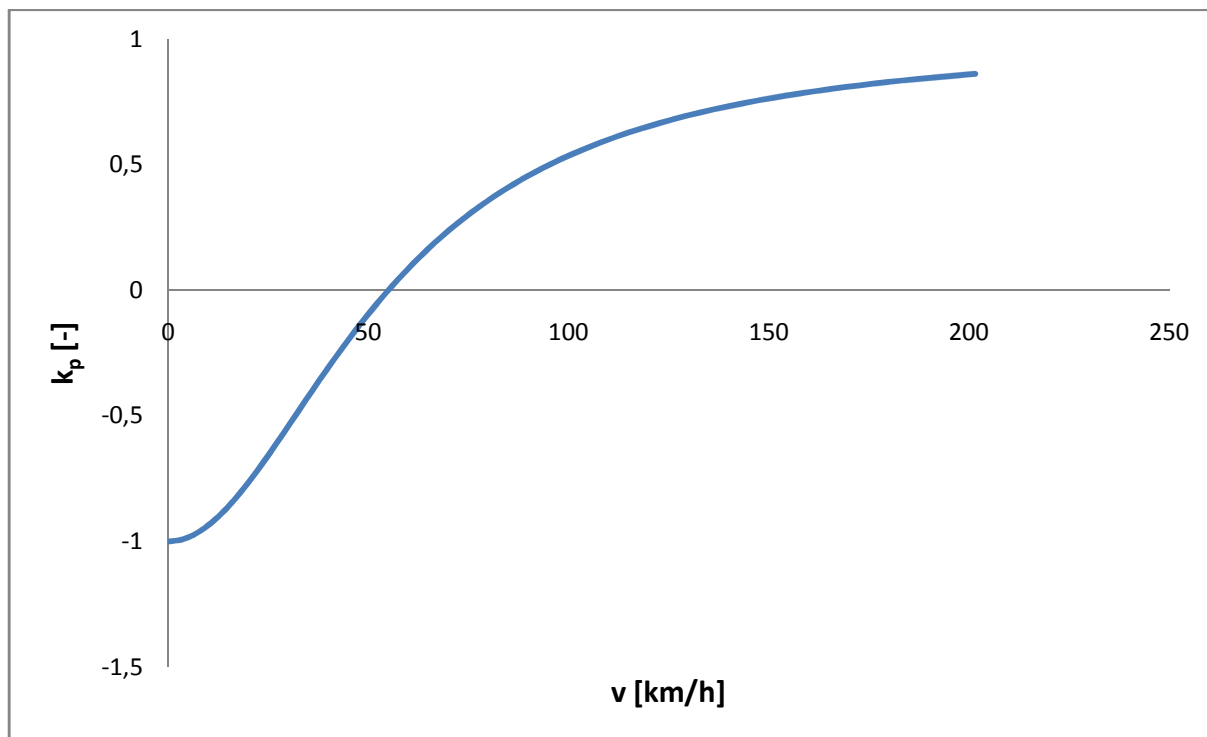
$$\left(\frac{\alpha}{\beta'_v} \right) = \frac{\frac{1}{2} (Cl (k_p + 1) - mv^2 (1 - k_p))}{Cl} \quad (5.5)$$

Budeme se snažit změnou poměru natočení předních a zadních kol dosáhnout limitní ideální hodnoty $\alpha = 0$ při které se vozidlo pohybuje ve směru okamžité rychlosti těžiště, která je při pohybu po kružnici kolmá na střed otáčení. Vozidlo tak nevykazuje přetáčivé ani nedotáčivé chování. Po dosazení $\alpha = 0$ do (5.5) vyjádříme hodnotu konstanty proporcionálního natočení zadních kol k_p [-] v závislosti na rychlosti.

$$k_p = \frac{mv^2 - Cl}{Cl + mv^2} \quad (5.6)$$

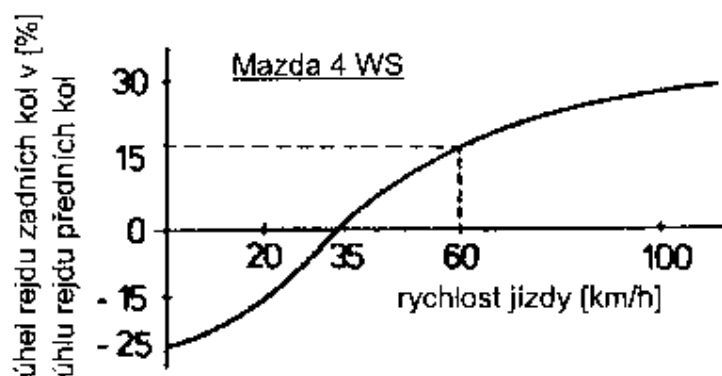
3.1.2 Sestrojení závislosti poměrného natočení zadních kol na rychlosti

Z rovnice (5.6) určíme hodnoty konstanty proporcionálního natočení pro rychlosti v rozsahu 0 až 200 kmh⁻¹ a získáme závislost na obrázku 3.2.



Obr. 3.2: Závislost poměru natočení zadních kol ku předním na rychlosti vozidla

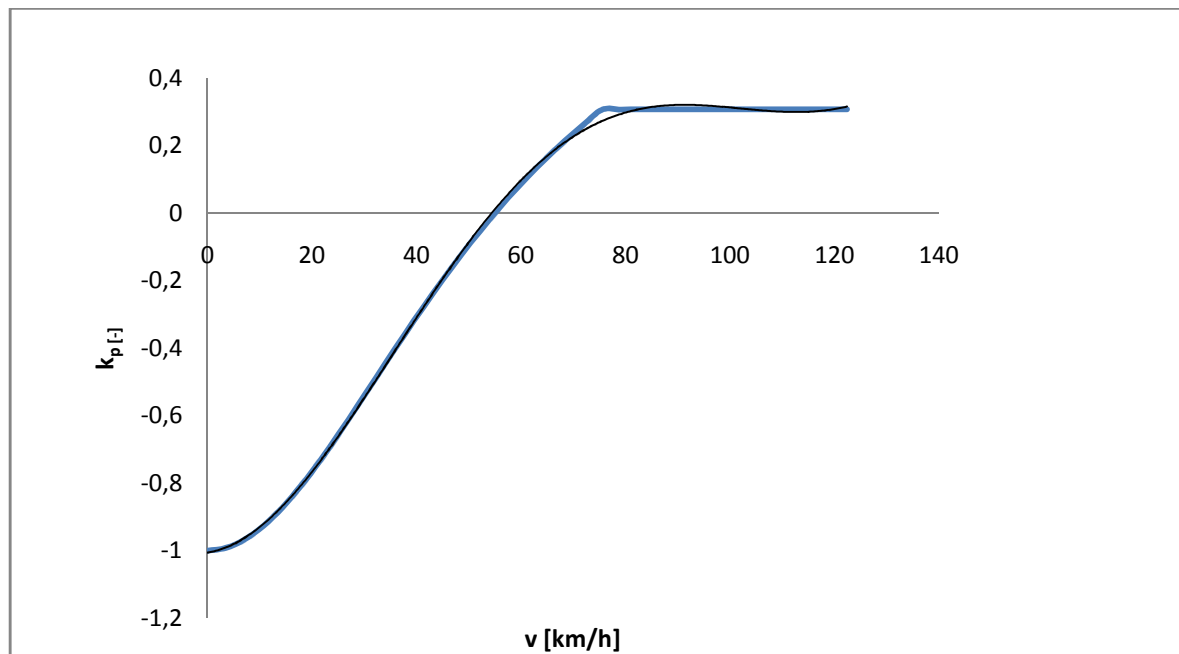
Pro srovnání je na obrázku 3.3 uvedena křivka závislosti natočení zadních kol u vozidla Mazda 4WS.



Obr. 3.3: Závislost poměru natočení zadních kol ku předním na rychlosti vozidla[4]

Z obrázku 3.2 je patrné, že experimentální vozidlo může při nesouhlasném řízení za nízkých rychlostí natáčet zadní kola až stejnou hodnotou natočení jako natočení kol předních v opačném směru ($k_p = -1$). V porovnání s křivkou vozu Mazda 4WS (obr.3.3), která při nízkých rychlostech dosahuje poměru pouze $k_p = -0,25$. Tento velký rozsah poměru k_p je dán především souměrnou geometrií experimentálního vozidla, shodnými parametry pneumatik a nízkou hmotností.

Při velmi vysokých rychlostech se dle obrázku 3.2 koeficient proporcionálního natočení zadních kol blíží opět plné výchylce kol předních ($k_p=1$). Podle [4] se pro oblast jízdní dynamiky při vysokých rychlostech používá hodnota $k_p=0,3$. Křivka z obrázku 3.2 tedy byla podle těchto poznatků omezena limitní hodnotou $k_p=0,3$ pro rychlost 80 kmh^{-1} a vyšší. Tato závislost je na obrázku č. 3.4.



Obr. 3.4: Křivka upravená dle doporučení

3.2 Implementace algoritmu pro řízení zadních kol do Simulinku

Závislost na obrázku 3.4 byla aproximována polynomem pátého stupně.

$$k_p = 3E-11v^5 + 3E-08v^4 - 1E-05v^3 + 0,000v^2 - 0,000v - 1,000 \quad (5.7)$$

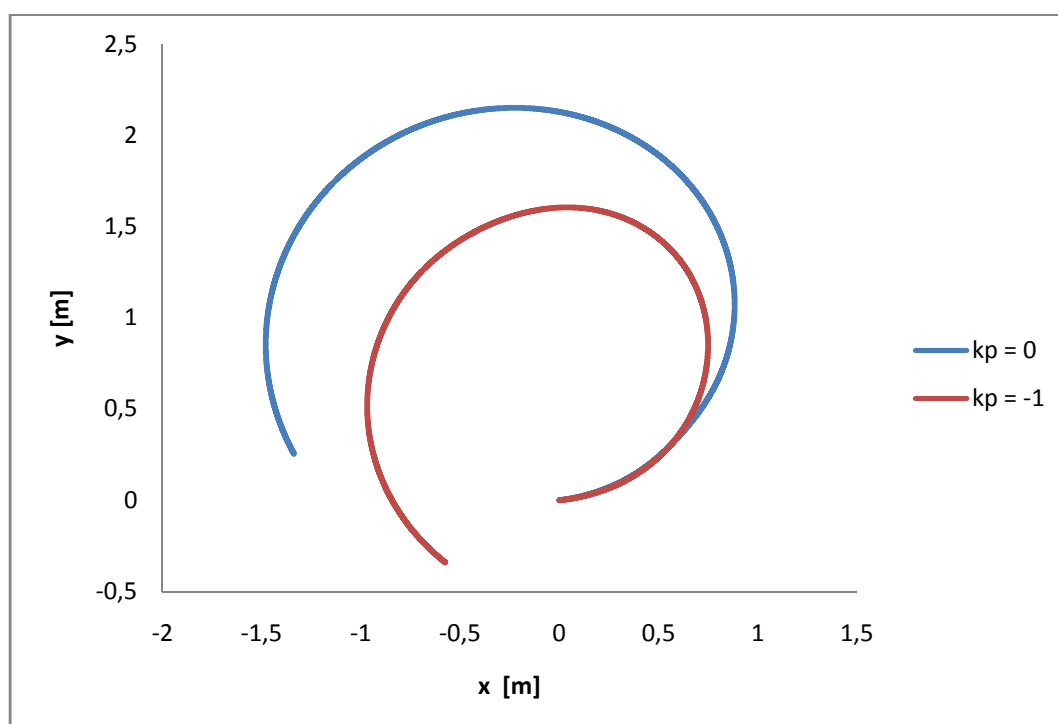
Polynom (5.7) byl implementován do bloku kinematického modelu v Simulinku. Algoritmus nejprve testuje jestli uživatel zadal řízení zadních kol (viz. Kapitola 2.3.2 *Řízení pomocí periferií*) poté podle hodnoty okamžité rychlosti v dopočítá dle (5.7) koeficient poměrného natočení zadních kol k_p .

3.3 Testování algoritmu pro řízení zadních kol při nesouhlasném řízení za pomalých rychlostí

Pro testování algoritmu byla provedena simulace za použití matematického modelu popisujícího pohyb vozidla. Pro názornost této simulace byla provedena také její vizualizace. Algoritmus byl použit při řízení zadních kol experimentálního vozidla *CAR4*, s kterým byl proveden experiment pro porovnání s výsledky simulace.

3.3.1 Simulace nesouhlasného řízení zadních kol

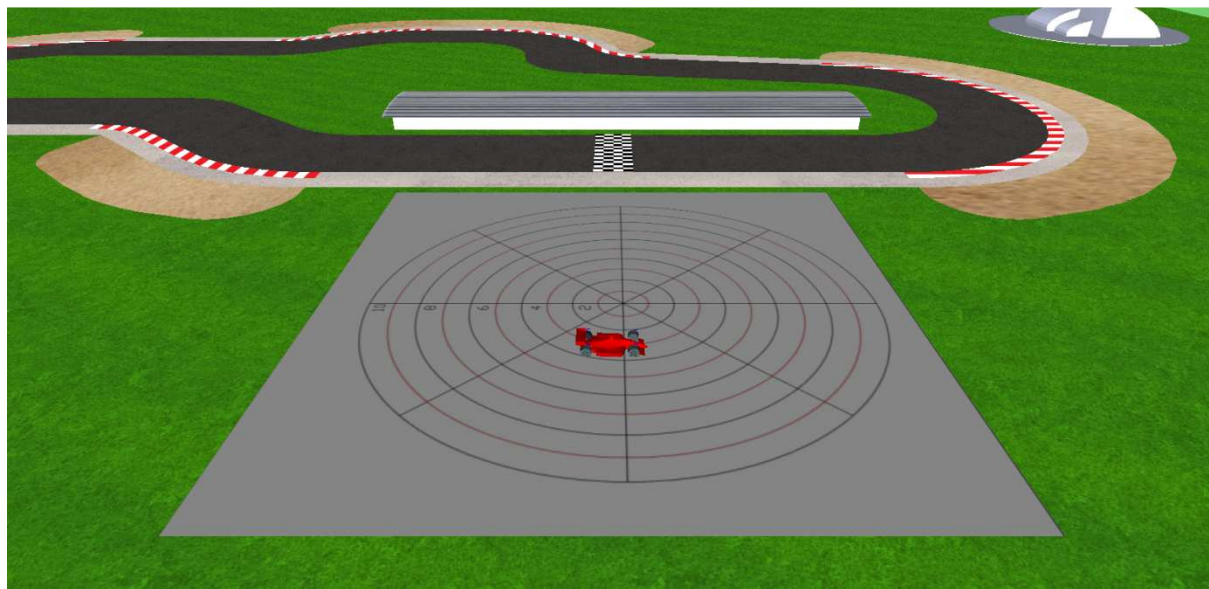
Algoritmus byl testován za konstantní rychlosti 5 kmh^{-1} a plném natočení předních kol. Výsledkem jsou dvě kruhové trajektorie pohybu na obrázku 3.5.



Obr. 3.5: Porovnání kruhové trajektorie konvenčního vozidla a vozidla se řízenými zadními koly.

Z výsledku tohoto experimentu je patrné, že při využití nesouhlasného řízení zadních kol ($k_p = -1$) je možné snížit poloměr zatáčení při rychlosti 5 kmh^{-1} na hodnotu $R_z \approx 0,7 \text{ m}$. Poloměr zatáčení při stejné rychlosti a neřízených zadních kolech ($k_p=0$) je $R_z \approx 1,5 \text{ m}$.

Pro názornost prováděných simulací byla vytvořena vizualizace pro testování jízdy za použití nesouhlasného řízení zadních kol. Vizualizace na obrázku 3.6 obsahuje souřadný systém a sérii kružnic s uvedenou hodnotou poloměru, pro přibližný odhad poloměru zatáčení.

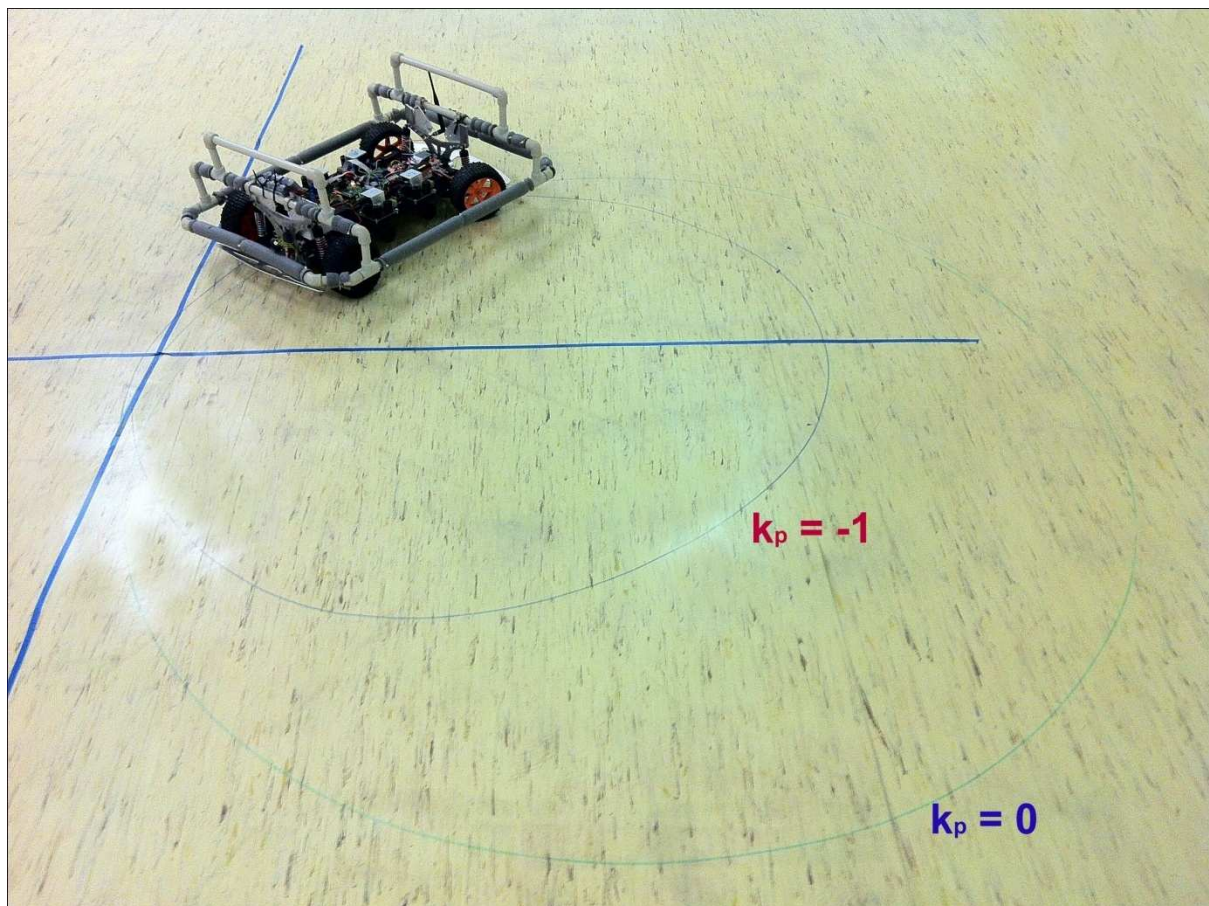


Obr. 3.6: Vizualizace pro odhad poloměru zatáčení

3.3.2 Experimentální měření při nesouhlasném řízení zadních kol

Algoritmus pro natočení zadních kol při malých rychlostech byl rovněž testován na experimentálním vozidle CAR4. Cílem experimentu bylo určit nejmenší možný poloměr zatáčení, kterého lze dosáhnout při využití algoritmu pro natočení zadních kol. Pro porovnání byl také určen poloměr zatáčení s neřízenými zadními koly.

Byl zaveden souřadný systém a vyznačeny osy x a y . K experimentálnímu vozidlu byl připevněn barevný popisovač, který vyznačil kružnicové trajektorie při pohybu vozidla. Určené trajektorie jsou znázorněny na obrázku 3.7. Vozidlo se pohybovalo z počátku souřadného systému, který je určen průsečíkem modrých čar.



Obr. 3.7: Porovnání kružnicové trajektorie experimentálního vozidla se řízenými a neřízenými zadními koly.

Bylo provedeno 5 měření při nesouhlasném natočení zadních kol o maximální výchylku ($k_p = -1$) a průměrná hodnota poloměru zatáčení byla určena jako $R_z \approx 0,8\text{ m}$. Bylo provedeno také 5 měření při konvenčním řízení automobilu bez natáčení zadních kol ($k_p = 0$). Průměrná hodnota poloměru zatáčení byla určena jako $R_z \approx 1,16\text{ m}$.

Výsledkem počítačové simulace i experimentu s vozidlem CAR4 se potvrdila vhodnost řízení zadních kol, při kterém se dá snížit poloměr zatočení až o 40%. Je tak zajištěna výrazně lepší manévrovatelnost, která je jedním z hlavních požadavků kladených na experimentální vozidlo CAR4.

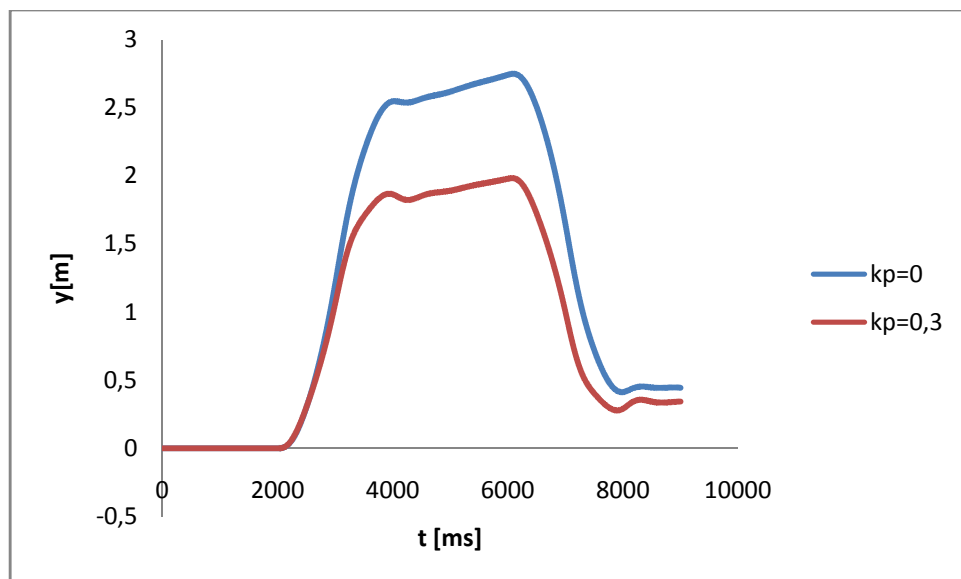
3.4 Testování algoritmu pro řízení zadních kol při souhlasném řízení za vysokých rychlostí

Při testování algoritmu pro řízení zadních kol při souhlasném řízení za vysokých rychlostí bylo postupováno podobně jako v předchozí kapitole (3.3). Nejprve byla provedena počítačová simulace využívající matematický model popisující pohyb vozidla. Tato simulace je také vizualizována. Poté bylo za použití algoritmu provedeno experimentální měření na vozidle CAR4.

3.4.1. Simulace souhlasného řízení zadních kol

Při tomto testu byla za použití algoritmu pro řízení zadních kol testována efektivita souhlasného řízení při maximální rychlosti vozidla. Sledovanou hodnotou byla velikost vybočení ze směru jízdy, při prudkém zabočení a návratu do původního směru. Jedná se o takzvaný „losí test“ [16], který simuluje objetí překážky či předjíždění za vysokých rychlostí.

Před začátkem a po skončení manévru se vozidlo pohybuje ve směru osy x a vybočení probíhá ve směru osy y . Naměřené hodnoty vybočení ze směru jsou znázorněny na obrázku 3.8.



Obr. 3.8: Porovnání velikosti vybočení ze směru konvenčního vozidla a vozidla se řízenými zadními koly.

Velikost vychýlení trajektorie u vozidla se řízenými zadními koly je znatelně menší než u konvenčního vozidla. Z obrázku 3.8 se odečtením získá maximální hodnota vybočení ze směru jízdy. Při manévru se řízenými zadními koly ($k_p = 0,3$) je velikost výchylky $l_{kp03} \approx 1,8$ m. Při manévru provedeném s neřízenými zadními koly ($k_p = 0$) je hodnota výchylky vybočení ze směru rovna $l_{kp0} \approx 2,7$ m.

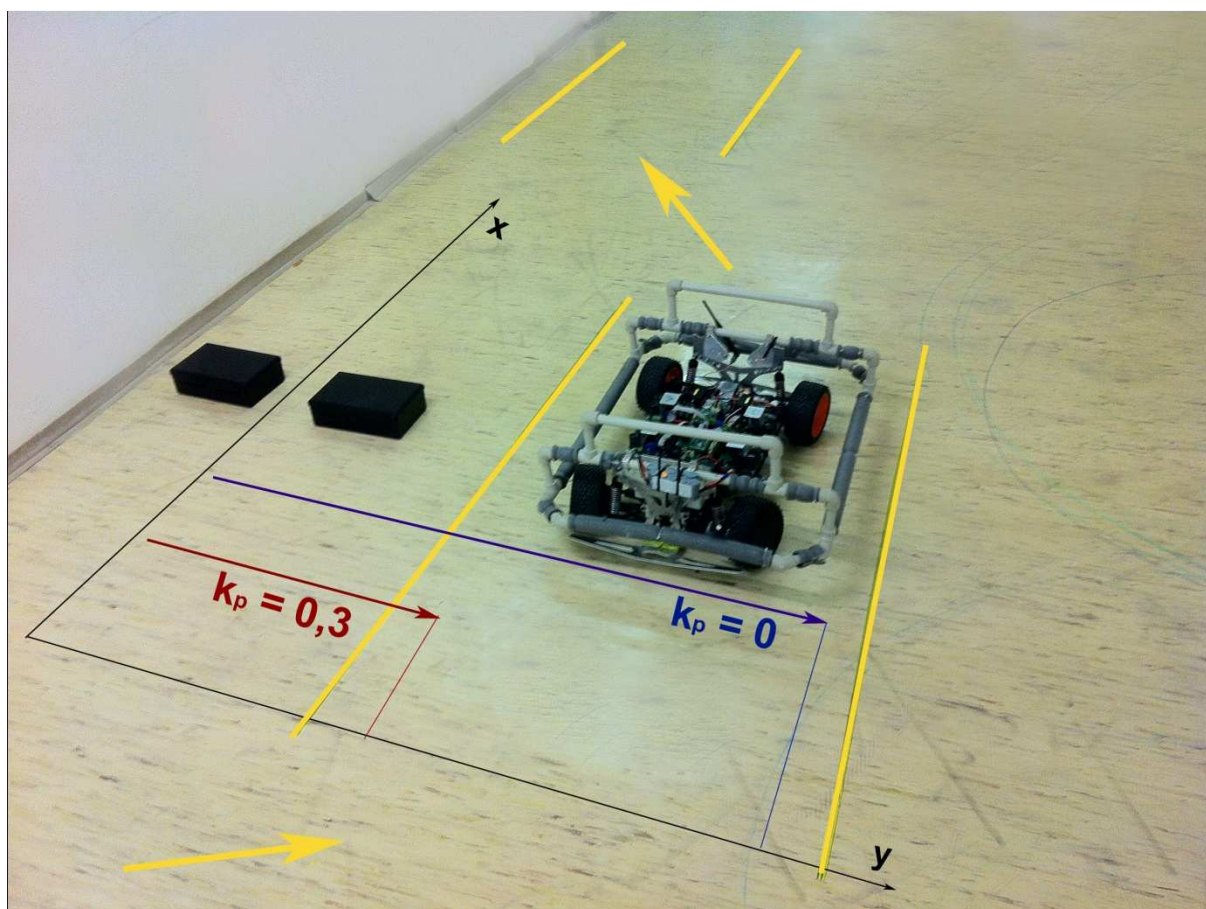
Vizualizace „losího testu“ je znázorněna na obrázku 3.9. Vozidlo projede první šestici kuželů, prudce zabočí doleva projede následující šestici a prudkým zabočením doprava se vrací do původního směru jízdy.



Obr. č. 3.9: Vizualizace losího testu

3.4.2 Experimentální měření při souhlasném řízení zadních kol

Algoritmus pro řízení zadních kol byl také testován na experimentálním vozidle *CAR4* za vysokých rychlostí. Byla sestavena dráha a překážky pro „losí test“, který je zobrazen na obrázku 3.10.



Obr. 3.10: Losí test provedený s experimentálním vozidlem

Vozidlo se pohybovalo ve směru osy x , rovnoběžné se zdí. Před překážkou, která je reprezentována dvojicí černých kvádrů, vozidlo prudce vybočilo a po jejím objetí se vrátilo do původního směru jízdy. Maximální výchylka z jízdního směru byla měřena ve směru osy y .

Manévr losího testu byl proveden pět krát pro vozidlo se řízenými zadními koly za maximální rychlosti přičemž poměrná konstanta natočení zadních kol je rovna $k_p = 0,3$. Pět měření bylo provedeno také pro konvenční automobil s neřízenými zadními koly kde $k_p = 0$. Sledovaná veličina byla výchylka ze směru jízdy při objíždění překážky. Maximální průměrná výchylka ze směru jízdy byla určena pro $k_p = 0,3$ jako $l_{kp03} = 1,27$ m a pro vozidlo s neřízenými koly $k_p = 0$ nabyla hodnotu $l_{kp0} = 2,31$ m.

Z výsledků simulace i experimentálního měření vychází hodnota výchylky ze směru jízdy menší, v případě že jsou zadní kola řízena souhlasně v porovnání s neřízenými zadními koly. Tento typ řízení zadních kol tedy dovoluje vozidlu rychlejší návrat do původního směru jízdy po skončení manévru. V případě silničních automobilů lze tímto rychlým návratem do jízdního pruhu zamezit možné čelní srážce s protijedoucím vozidlem. Je také posílena stabilita vozidla při manévru.

Experimentální vozidlo bude ovšem vzhledem ke své maximální rychlosti pohybující se kolem 50 kmh^{-1} využívat především oblast nesouhlasného řízení.

4 Demonstrační scénáře

Tato kapitola se věnuje tvorbě a záznamu scénářů virtuálních scén a porovnává různé možnosti exportu. Obsahuje také přehled vytvořených demonstračních scénářů vizualizujících zajímavé jízdní manévry provedené s experimentálním vozidlem.

4.1 Tvorba demonstračních scénářů

Pro názornou ukázkou některých možností vizualizace pohybu experimentálního vozidla byly vytvořeny demonstrační scénáře jízdních manévru.

Jazyk VRML umožňuje rozpohybovat jednotlivá tělesa pomocí uzlu nazvaného *interpolátor*. Tento uzel vypočítá v závislosti na čase trajektorii pohybu mezi uživatelem definovanými body. Pro virtuální scénu ovládanou modelem vytvořeným v Simulinku je ovšem vhodnější vytvořit pouze vstupní signál pomocí Simulink bloku *SignalBuilder*. Tento signál je vstupním parametrem matematického modelu který popisuje pohyb vozidla. Pro každý scénář je použita dvojice těchto bloků přičemž jeden ovládá akceleraci vozidla a druhý natočení přední nápravy.

Byly vytvořeny tři scénáře zobrazující jízdu na okruhu, smyk při průjezdu zatáčkou a losí test. Pro spuštění scénáře uživatel připojí příslušný blok *SignalBuilderu*, nesoucí jméno scénáře, ze Simulink bloku „Programové řízení“ a přepne dvoupolohový přepínač z polohy ovládání joystickem na polohu programového ovládání.



Obr. 4.1: Průjezd vozidla zatáčkou

Demonstrační scénáře byly zaznamenány z nově vytvořeného *viewpointu* dynamické kamery, která se vhodně pohybuje kolem vozidla a detailně zaznamenává jízdní manévry.

Snímek z tohoto *viewpointu* vytvořený při demonstračním scénáři jízdy po okruhu je na obr. 4.1.

4.2 Možnosti záznamu demonstračních scénářů

Pro záznam scén je výhodné použít nástroje pro tvorbu animací, které jsou dostupné společně se softwarem *Simulink 3D Animation*. Běžně jsou dostupné dva způsoby záznamu virtuální scény.

První způsob zaznamenává sekvenci obrázků a ukládá ji jako soubor s příponou AVI, který je spustitelný v běžném multimediálním přehrávači. Jednotlivé snímky tvořící AVI soubor jsou zaznamenávány přesně tak jak se zobrazují ve VRML prohlížeči. Uloží se tedy i veškeré pohyby provedené během nahrávání simulace a přepínání mezi různými *viewpointy*. Této vlastnosti bylo využito při tvorbě některých scénářů, kdy je střídáním pohledů z různých *viewpointů* vytvořena velmi dynamická scéna. Snímek z *viewpointu* „Pohled řidiče“ je na obrázku 4.2.



Obr. 4.2: Pohled řidiče

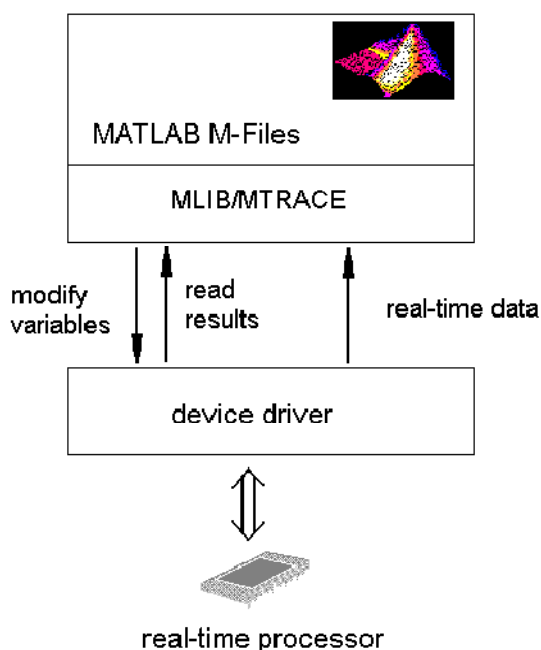
Druhý způsob umožňuje zaznamenání pohybu uložením trajektorie trojrozměrných těles do souboru WRL. Při přehrávání takto vytvořené animace je možné se virtuální scénou jakkoliv pohybovat což výrazně umocňuje iluzi trojrozměrného prostoru. Pro spuštění souboru s příponou WRL je možno využít *Simulink 3D Animation Player*, který lze spustit zadáním příkazu *vrplay* do příkazového řádku MATLABu.

Scénáře byly vytvořeny oběma způsoby. Soubor AVI je i při použití ztrátové komprese výrazně větší v porovnání se souborem WRL. K distribuci souboru WRL je nutné přiložit také soubor obsahující textury a případné další externí prvky.

5 Propojení simulačního modelu běžícího na dSPACE s vizualizací ve VRML

Tato kapitola se zabývá generováním kódu z prostředí Simulink a jeho spuštěním na systému dSPACE, umožňujícím řízení v reálném čase. Je zde popsáno načítání dat ze systému dSPACE pomocí knihovny MLIB. Kapitola se zabývá také testováním odezvy komunikace mezi hostitelským PC a systémem dSPACE. Vlastnosti propojení jsou nejprve testovány na jednoduchém příkladu a následně je vytvořeno prostředí pro načítání dat a zobrazování vizualizace pohybu experimentálního vozidla.

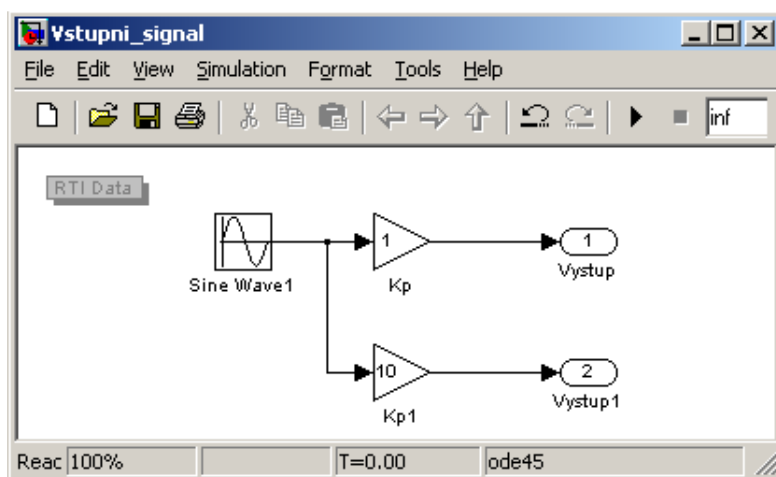
Kinematika a dynamika experimentálního vozidla je popsána komplexním a výpočetně poněkud náročným kinematickým a dynamickým modelem. Náročnost výpočtů se projevuje dobou potřebnou k jejich zpracování, což má přímý vliv na svižný chod vizualizace. Cílem propojení simulačního modelu běžícího na dSPACE s VRML vizualizací je provádět výpočet matematického modelu popisujícího pohyb vozidla na výkonném hardwaru systému dSPACE. Vypočítané hodnoty jsou načítány funkcí MLIB do Simulinku, kde je pomocí *Simulink 3D Animation* vykreslována vizualizace. Schéma komunikace mezi MATLABem a procesorem pro řízení v reálném čase je na obrázku 5.1.



Obr. 5.1: Schéma komunikace MATLABu a dSPACE procesoru pomocí knihovny MLIB [7]

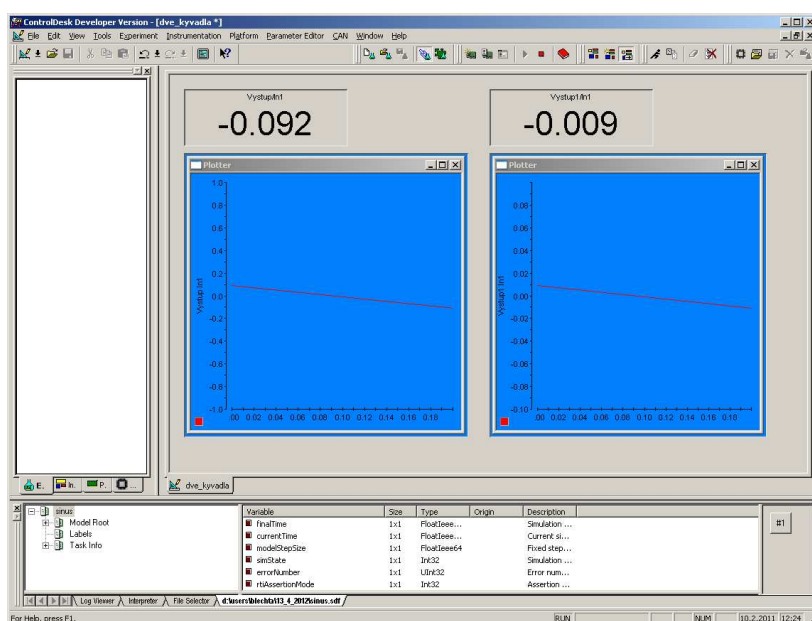
5.1 Testování čtení a zápisu dat z a do systému dSPACE pomocí knihovny MLIB na příkladu kyvadla

Řízení v reálném čase a komunikace mezi Simulinkem a systémem dSPACE byla nejprve testována na jednoduchém modelu dvojice kyvadel. Kyvadla byla vytvořena dvě z důvodů vzájemného porovnání časů odezvy při různých způsobech zápisu dat do systému dSPACE. Dvojice kyvadel, která se kývá podle sinusového průběhu, byla zkompileována do jazyka C pomocí příkazu *Incremental build* a spuštěna na systému dSPACE. Tento model je na obrázku 5.2. Z kompilovaného modelu budou načítány hodnoty obou výstupů, jenž budou nahrávány do VRML bloku vizualizace jako parametr výchylky kyvadel.



Obr. 5.2: Model kompilovaný do jazyka C, jenž je spouštěný na dSPACE

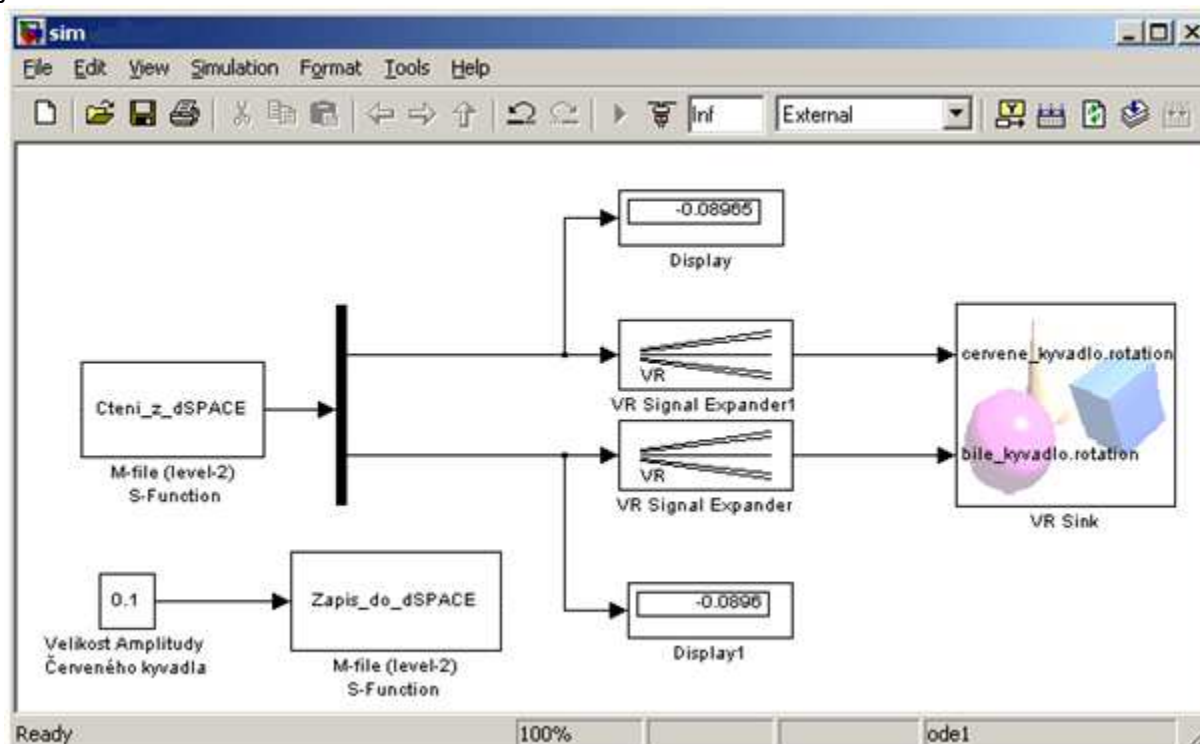
Tento zkompileovaný model následně běží nezávisle na Simulinku na výkonem dSPACE systému. V rozhraní aplikace *ControlDesk* lze pomocí virtuálních nástrojů sledovat průběh simulace běžící na dSPACE v reálném čase.



Obr. 5.3: Rozhraní prostředí ControlDesk

Na obrázku 5.3 je vytvořeno jednoduché rozhraní zobrazující okamžitou hodnotu výstupních signálu a jejich vykreslení v rozhraní aplikace *ControlDesk*.

Pro načítání a zápis dat a vizualizaci pohybu kyvadel je vytvořen další Simulink model, který je na obrázku 5.4.



Obr. 5.4: Model pro zápis a načítání dat z a do systému dSPACE a vizualizace

Pro načítání dat z dSPACE za jeho běhu do Simulinku je použita funkce MLIB. Prvním krokem při použití MLIB je vybrání příslušného dSPACE procesoru, na kterém probíhá simulace. Pro procesorovou kartu DS1103 je výběr proveden následujícím příkazem.

```
mllib('SelectBoard', 'ds1103');
```

Je doporučeno využít funkci knihovny MLIB která nejprve testuje zda-li aplikace běží na systému dSPACE, než z něj načítá hodnoty. Pomocí MLIB lze číst data z většiny Simulink bloků. Je nutné správně zapsat cestu k blokům, které chceme číst. Cesta ke všem blokům modelu včetně jejich popisu je uvedena v souboru .trc, který je vytvořen při generování C kódu a uloží se do adresáře modelu.

Volání funkce MLIB je realizováno MATLAB S – funkcí. Pomocí funkce MLIB se načítají data popisující pohyb kyvadla z real time procesoru do Simulinku následujícím příkazem.

```
Rotace_kyvadla_1 = {'Model Root/controller/Kp/Gain'};  
Var1 = mllib('GetTrcVar', Rotace_kyvadla_1);  
Rotace_kyvadla_2 = {'Model Root/controller/Kp1/Gain'};  
Var2 = mllib('GetTrcVar', Rotace_kyvadla_2);
```

Tyto hodnoty jsou načítány jako VRML parametr rotace kyvadel a vizualizovány. Je možné načítat hodnoty buď z bloku *Gain* nebo z bloku *Output*. Porovnáním hodnot rotace zobrazovaných v uživatelském rozhraní *ControlDesk* a hodnot načítaných funkcí MLIB a

Dále byla testována odezva při zápisu nových dat do systému dSPACE pomocí MLIB. Na obrázku 5.2 jde vidět, že jedno kyvadlo má desetinovou amplitudu v porovnání s kyvadlem druhým jehož amplituda je násobena desetinásobným zesílením. Cílem tohoto experimentu je pomocí funkce MLIB zapisovat desetinásobnou hodnotu zesílení kyvadla s desetinovou amplitudou a dosáhnout tak stejného rozkmitu obou kyvadel. Zápis dat do dSPACE za jeho běhu se provede následujícím příkazem.

Po zápisu desetinásobného zesílení a zobrazení hodnot rotace v uživatelském rozhraní ControlDesku jsou obě hodnoty rotace stejné. Avšak po načtení dat funkcí MLIB zpět do Simulink modelu a zobrazení na displeji je vidět, že se hodnoty vzájemně liší již na druhém desetinném místě. Při použití funkce MLIB současně pro čtení i zápis hodnot se tedy setkáváme již s patrnou odezvou.

Z důvodu patrné odezvy byla pro vizualizování pohybu experimentálního vozidla zvolena cesta programového řízení raději než ovládání pomocí periférií. Naprogramovaný scénář pohybu vozidla je zkompileován společně s celým modelem a funkce MLIB je využita jen ke čtení. Pro řízení pomocí periferního zařízení by bylo vhodnější jej připojit přímo k systému dSPACE, například pomocí sériové linky. Ovládání periferním zařízením v reálném čase pomocí knihovny MLIB by se setkala s velkou odezvou.

41

Hodnoty z těchto výstupů jsou načítány stejně jako v kapitole 5.1 pomocí funkce MLIB z dalšího Simulink modelu kde jsou nahrávány do bloku vizualizace. Zpracovávání kompilovaného matematického modelu na výkonném procesoru dSPACE a načítání výsledných hodnot se projeví výrazným zrychlením výpočtově náročné simulace a svižnějším zobrazením vizualizace.

Závěr

V první části této bakalářské práce jsem se zabýval tvorbou prostředí pro vizualizaci pohybu vozidla se čtyřmi řízenými a hnanými koly. Prostředí vytvořené pro vizualizaci a testování kinematických a dynamických modelů je plně funkční a umožňuje také zobrazovat síly působící na všechna kola během jízdy. Byl vytvořen i virtuální model tachometru, zobrazující okamžitou rychlost. Vizualizace umožňuje jak ovládání pomocí joysticku tak i přesné programové řízení. Řízení joystickem uživateli umožňuje tlačítka přepínat mezi řízením dvou či všech čtyř kol a také zapnout zobrazení sil působících na kola během jízdy.

V kapitole 3 byl podle literatury uvedené v kapitole 1.2 navrhnut algoritmus pro řízení zadních kol v závislosti na rychlosti, který byl validován pomocí počítačových simulací a experimentálního měření provedeného při použití tohoto algoritmu na vozidle CAR4. Z výsledku počítačové simulace i z výsledku experimentálního měření je patrné, že při pomalých rychlostech umožní navrhnutý algoritmus snížit minimální poloměr zatočení až o 40% v porovnání s neřízenými zadními koly. Je tak výrazně zvýšena manévrovatelnost experimentálního vozidla. Při prudkém vybočovací manévru při souhlasném řízení za vysokých rychlostí navrhnutý algoritmus sníží výchylku ze směru jízdy až o 20%. Je tak také zvýšena stabilita vozidla při jízdách manévrech za vysokých rychlostí. Navrhnutý algoritmus pro řízení zadních kol v závislosti na rychlosti tedy zlepšuje jízdní vlastnosti při nesouhlasném řízení za pomalých rychlostí stejně tak jako při souhlasném řízení za rychlostí vysokých.

Pro názornost použití vizualizace pohybu experimentálního vozidla byly v kapitole 4 vytvořeny demonstrační scénáře několika zajímavých jízdních manévru, jenž prezentují některé z možností vizualizace.

V kapitole 5 byla pomocí experimentu testována odezva systému dSPACE při použití knihovny MLIB. Ukázalo se, že knihovna MLIB není vhodná pro plynulé zapisování dat do systému dSPACE za jeho chodu kvůli pomalé odezvě. Po provedení testování komunikace mezi systémem dSPACE a prostředím Simulink upraven matematický model pohybu experimentálního vozidla, jenž byl po zkompilování spuštěn na systému dSPACE. Výkonná jádra multiprocesorové desky s kartou DS1103, výrazně zrychlila provádění výpočtu matematického modelu a tedy přispěla k plynulejšímu a stabilnějšímu chodu vizualizace.

Cíle práce vytyčené v zadání se podařilo velmi uspokojivě splnit a doufám, že vytvořený text bude sloužit studentům, kteří budou pokračovat v práci na projektu CAR4, či jiném příbuzném tématu.

Literatura a odkazy

- [1] ŽÁRA, Jiří. *VRML 97: Laskavý průvodce virtuálními světy*. 1. Vyd. Brno : Computer Press, 1999. 250 s. ISBN 80-7226-143-6
- [2] GERGELITSOVÁ, Šárka. *VRML v příkladech*. 1. Vyd. Praha : BEN – Technická literatura, 2004. 223 s. ISBN 80-7300-138-1
- [3] GREPL, Robert.: *Modelování mechatronických systémů v Matlab SimMechanics*. 1. Vyd. Praha: BEN – Technická literatura, 2007. 152 s. ISBN 978-80-7300-226-8
- [4] VLK, František. *Dynamika motorových vozidel*. 1. vyd. Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc., nakladatelství a vydavatelství, 2000. 433 s. ISBN 80-238-5273-6
- [5] JASANSKÝ, Michal. *Návrh dynamických modelů pro řízení trakce experimentálního vozidla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 123 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Robert Grepl, Ph.D.
- [6] TŮMA, Jiří. Analýza stability a řiditelnosti vozidla AWS 4x4 pomocí nelineárního dynamického modelu. Praha: Strojnický časopis, 43, duben 1992, č. 4, s. 352-364
- [7] dSPACE Systems. *First Work Steps*, 2006
- [8] dSPACE Systems. *Implementation Guide*, 2006
- [9] dSPACE Systems. *MATLAB dSPACE Interface Libraries*, 2006
- [10] DANĚK, Jan. *Vizualizace dynamických systémů v prostředí virtuální reality* [online] , 2012 [cit. 12.03.2012]. Dostupné z <http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_07_1201.pdf>.
- [11] *Dokumentace k produktu Simulink 3D Animation* [online] [cit. 12.11.2011]. Dostupné z <<http://www.mathworks.com/help/toolbox/sl3d>>.
- [12] International Standard ISO/IEC 14772-1:1997, *The Virtual Reality Modeling Language (VRML)* [online] [cit. 26.2.2012] Dostupné z <<http://new.web3d.org/files/specifications/14772/V2.0/index.html>>
- [13] BRABEC, Pavel. *Systémy řízení zadních kol automobilu* [online] [cit. 28.3.2012]. Dostupné z <http://intech2.tul.cz/dokumenty/vystupy_z_projektu/02~TUL%20-%20Klíčová%20aktivita%202/In-TECH%20_%204WS.pdf>
- [14] SZLACHTA, Jiří. *Systémy řízení směrové ovladatelnosti automobilu* [online] [cit. 14.3.2012] Dostupné z <<http://akce.fs.vsb.cz/2000/asr2000/Sbornik/papers/szlachta.pdf>>

- [15] BRABEC, Pavel, MALÝ, Miroslav, VOŽENÍLEK, Robert. *Simulace řízení zadních kol automobilu* [online][cit. 15.4.2012] Dostupné z <
<http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2002/Simulace%20řízení%20zadních%20kol%20automobilu.pdf> >
- [16] GENS, Magnus. *Moose Crash Test Dummy* [online] [cit. 1.5.2012] Dostupné z
<<http://www.vti.se/sv/publikationer/pdf/moose-crash-test-dummy--masters-thesis.pdf>>
- [17] GREPL, Robert. *Jak psát závěrečnou práci* [online] [cit. 11.5.2012] Dostupné z
<<http://www.umat.fme.vutbr.cz/mechlab/smazat/ruzne/latex/Grepl-2005-Jak-psat-zaverecnou-praci-DPS.pdf>>

Přílohy na CD

Hlavní dokument

- BP 2012 Blechta Martin Vizualizace pohybu vozidla se čtyřmi řízenými a hnánými koly.pdf

Kinematický a dynamický model a vizualizace

- Model a vizualizace

Demonstrační scénáře

- Jízda po okruhu
 - Jízda po okruhu.avi
 - Jízda po okruhu.wrl
- Losí test
 - Losí test.avi
 - Losí test.wrl
- Smyk
 - Smyk.avi
 - Smyk .wrl