

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra řídicí techniky

Odhadování decelerace vozidla fúzí měření z akcelerometru a odometrie

Matouš Vondrášek

Vedoucí: doc. Ing. Zdeněk Hurák, Ph.D.
Obor: Kybernetika a robotika
Květen 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vondrášek** Jméno: **Matouš** Osobní číslo: **499190**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra řídicí techniky**
Studijní program: **Kybernetika a robotika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Odhadování decelerace vozidla fúzí měření z akcelerometru a odometrie

Název bakalářské práce anglicky:

Estimation of vehicle deceleration by fusion of measurements of acceleration and odometry

Pokyny pro vypracování:

1. Nastudujte si v (vedoucím práce poskytnuté i další) odborné literatuře současný stav metod pro odhad (úhlové) rychlosti a případně i zrychlení s využitím inkrementálních enkodérů.
2. Nastudujte si také základní metody pro fúzi měření z různých senzorů (zejména Kalmanův ale případně i komplementární filtr). Soustřeďte se na ty, které jsou relevantní pro fúzi měření ze dvou senzorů, přičemž měření z jednoho z nich (z enkodéru) přichází aperiodicky v závislosti na rychlosti samotné.
3. Z popsanych metod zvolte a případně upravte takové, které by mohly být relevantní pro odhadování translační rychlosti a zrychlení kolejového vozidla. Zvažte, zda bude výhodné, aby metody využívaly i jen jednoduchého modelu vozidla, včetně jeho adhezních charakteristik.
4. Dané metody implementujte coby bloky v Simulinku (pokud možno s ohledem na budoucí generování kódu).
5. Formou numerických simulací (s jednoduchým modelem vozidla) demonstруйте funkčnost daných metod a případně je mezi sebou porovnejte s ohledem na přesnost, spolehlivost, výpočetní náročnost.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Allotta, B., V. Colla, a M. Malvezzi. „Train Position and Speed Estimation Using Wheel Velocity Measurements“. Proc. of the Inst. of Mech. Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit 216, č. 3, květen 2002: 207–25.
- [2] Ararat, Öncü, a Mehmet T. Söylemez. „Robust Velocity Estimation for Railway Vehicles“. IFAC-PapersOnLine, 20th IFAC World Congress, 50, č. 1, červenec 2017: 5961–66.
- [3] Gurtner, Martin. „Pokročilé metody návrhu velmi přesného řízení pohybu“. Bakalářská práce, České vysoké učení technické v Praze, 2013. Kapitola 5.
- [4] Malvezzi, Monica, et al. „Train Position and Speed Estimation by Integration of Odometers and IMUs“. In Proc. of 9th World Congress on Railway Research (WCRR 2011). Lille, 2011.
- [5] Petrella, Roberto, et al. „Speed measurement algorithms for low-resolution incremental encoder equipped drives: a comparative analysis“. In 2007 Int. Aegean Conf. on Electrical Machines and Power Electronics, 780–87, 2007.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Zdeněk Hurák, Ph.D. katedra řídicí techniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **14.02.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **22.09.2024**

doc. Ing. Zdeněk Hurák, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce panu doc. Ing. Zdeňku Hurákovi, Ph.D. za cenné rady a vstřícný přístup. Dále bych chtěl vyjádřit svůj dík panu Ing. Loiovi Do, který mi byl vždy ochoten poradit. V neposlední řadě děkuji i svým přátelům a blízkým za poskytnutou podporu.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškerou použitou literaturu v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, 26. května 2023

Abstrakt

Tato práce se zabývá odhadem decelerace vozidla. Toho je dosaženo fúzí měření z akcelerometru a odometrie. Měření z odometrie je nejprve zpracováno na rychlost. K potlačení šumu a samotné fúzi následně poslouží komplementární filtr.

Klíčová slova: decelerace, akcelerace, zrychlení, fúze, odometrie, kolejová vozidla, tramvaj, vlak, prokluz

Vedoucí: doc. Ing. Zdeněk Hurák,
Ph.D.
Karlovo náměstí 13, Praha 2,
E-11

Abstract

This work is focused on estimation of vehicle deceleration. The goal is achieved by accelerometric and odometric data fusion. Odometric data are at first processed in order to extract angular velocity. Noise suppression and fusion itself is done by complementary filter.

Keywords: deceleration, acceleration, fusion, odometry, rolling stock, tram, train, slip

Title translation: Estimation of vehicle deceleration by fusion of measurements of acceleration and odometry

Obsah

1 Úvod	1	6.3 Šum senzoru	26
1.1 Cíl práce	1	7 Fúze dat ze sensorů	27
1.2 Motivace	1	7.1 Komplementární filtr	27
1.3 Osnova	2	7.1.1 Princip	27
2 Model dynamiky dopředného pohybu tramvaje	3	7.1.2 Vstupy filtrace	28
2.1 Dynamika dopředného pohybu tramvaje	3	7.1.3 Simulace	28
2.1.1 Vazební graf dynamiky dopředného pohybu	3	8 Závěr	31
2.1.2 Zjednodušení vazebního grafu.	4	8.1 Shrnutí	31
2.1.3 Stavový popis	5	8.2 Budoucí vývoj	31
2.1.4 Specifikace vybraných parametrů	6	Bibliografie	33
2.2 Implementace dopředné dynamiky	7		
3 Sensory	9		
3.1 Odometrická měření	9		
3.1.1 Princip odometrie	9		
3.1.2 Implementace odometrie	9		
3.2 Měření z akcelerometru	10		
3.2.1 Princip akcelerometru	10		
3.2.2 Implementace akcelerometru.	10		
4 Simulace	13		
4.1 Parametry modelu / Tatra T3 ..	13		
4.2 Data z experimentu	14		
4.3 Data ze simulace	14		
5 Zpracování odometrie	17		
5.1 Základní metody zpracování odometrie	17		
5.1.1 Měření periody	17		
5.1.2 Metoda měření frekvence....	18		
5.1.3 Metoda CSDT (Constant Sample-time Digital Tachometer)	18		
5.1.4 Porovnání metod zpracování odometrie	19		
5.2 Pokročilejší metody zpracování odometrie	22		
5.2.1 Polynomiální extrapolace ...	22		
5.2.2 Další metody	22		
5.3 Shrnutí	23		
6 Akcelerometr	25		
6.1 Výstup akcelerometru	25		
6.2 Zarovnání os akcelerometru a měřeného zrychlení	25		

Obrázky

2.1 Vazební graf dynamiky dopředného pohybu tramvaje	4
2.2 Zjednodušený vazební dynamiky tramvaje	5
2.3 Stavový popis modelu dynamiky tramvaje	5
2.4 Model dynamiky tramvaje v prostředí Simulink	7
3.1 Model odometrického čítače v prostředí Simulink	10
4.1 Koeficient přilnavosti pro jednotlivé adhezní podmínky v závislosti na v_s	14
4.2 Simulace	16
5.1 Porovnání metod zpracování odometrie	20
5.2 Porovnání metod pro konstantní úhlové zrychlení	21
7.1 Vstupy filtrace	28
7.2 Porovnání výstupu komplementárního filtru s reálnou hodnotou zrychlení	29
7.3 Absolutní chyba odhadu zrychlení	30
7.4 Porovnání výstupu komplementárního filtru s reálnou hodnotou zrychlení, přiblíženo	30

Tabulky

4.1 Parametry adhezních podmínek převzaté z [2]	13
4.2 Konstanty použité v simulaci převzaté z [4, 5]	15
5.1 Simulační konstanty	21
5.2 Ostatní simulační konstanty	22
7.1 RMSE odhadů zrychlení	29

Kapitola 1

Úvod

1.1 Cíl práce

Cílem této práce je návrh metody zacházení s odometrickým a akcelerometrickým signálem, popsání jejich výhod a nevýhod, zpracování a následná fúze. Výstupní informací fúze bude hodnota zrychlení vozidla. Pro zjednodušení budu v této práci uvažovat jízdu po rovině.

1.2 Motivace

Spolehlivý odhad zrychlení a zpomalení vozidel je nezbytnou součástí přesného a efektivního řízení. Plánování rychlostního profilu pohybu kolejových, ale obecně i jiných, vozidel má široké spektrum využití. Pro všechny tyto projekty je odhad rychlosti a její změny – zrychlení – základním stavebním kamenem.

Tato práce je motivovaná částí projektu ČVUT s průmyslovým partnerem, společností Škoda Digital. Náplní tohoto projektu je návrh algoritmů a palubních i stacionárních jednotek pro chytrou dopravu, konkrétně pro kolejová vozidla – tramvaje a vlaky. Z toho důvodu se bude moje práce zabývat také specifiky tramvajů a jiných kolejových vozidel při modelování, fúzi a měření signálů.

Tradičně jsou v oblasti kolejových vozidel metody určování rychlosti a zrychlení založeny čistě na zpracování odometrie. Tato metoda má však spoustu nejistot. Závisí na okolních podmínkách a technických parametrech vozidla. Mezi obvodovou rychlostí a dopřednou rychlostí vozidla je nenulový rozdíl, takzvaný *prokluz*. Samotná odometrická informace je navíc vždy diskrétní v čase i v amplitudě a její chyba je závislá na úhlové rychlosti.

Jiným přístupem je přímé měření akcelerace pomocí senzoru příslušně pojmenovaného – akcelerometru. Výstupem akcelerometru nicméně není přímo zrychlení, ale *specifická síla*. Do té se jistým způsobem promítá vedle samotného fyzického zrychlení i zrychlení tíhové. Navíc akcelerometr trpí rušením ve všech částech frekvenčního spektra.

Oba uvažované zdroje mají svá specifika. Vhodnou fúzí těchto zdrojů lze využít těchto specifik a dosáhnout lepších výsledků pro odhad zrychlení než u každé z metod jednotlivě.

■ 1.3 Osnova

Pro získání dat ze senzorů k následné fúzi použiji simulace z prostředí Simulink. Získáním rovnic dynamiky dopředného pohybu tramvaje a samotnou implementací v prostředí Simulink se zabývám v kapitole 2.

Tvorbou a implementací senzorů připojených k modelu tramvaje se zabývám v kapitole 3.

Parametry samotné simulace a výstupy z ní prezentuji v kapitole 4.

Jako výstupy simulace jsou odometrická měření a modelovaný akcelerometrický signál. Zpracováním odometrie pro získání odhadu úhlové rychlosti se zabývám v kapitole 5. Vlastnostem akcelerometrického výstupu se věnuje kapitola 6.

Finálním krokem je fúze dat pomocí komplementárního filtru v kapitole 7.

Kapitola 2

Model dynamiky dopředného pohybu tramvaje

V této části se budu zabývat tvorbou modelu dynamiky dopředného pohybu tramvaje. Na tomto systému budu v následujících kapitolách ověřovat funkčnost a přesnost jednotlivých přístupů pro zpracování signálů ze senzorů na palubě vozidla a jejich následnou fúzi pro odhad zrychlení či zpomalení.

Simulace založené na tomto modelu budou použity k získání pseudoreálných dat, které rozšíří spektrum datasetů použitých jako vstup fúzovacích algoritmů.

2.1 Dynamika dopředného pohybu tramvaje

Model tramvaje budu vytvářet metodou vazebních grafů, vysvětlením vazebních grafů se zabývá [1]. Vazební grafy poskytují přehledný grafický vzhled do fyzikální podstaty systému. Jsou založené čistě na fyzikální podstatě a umožňují snadné získání stavového popisu systému.

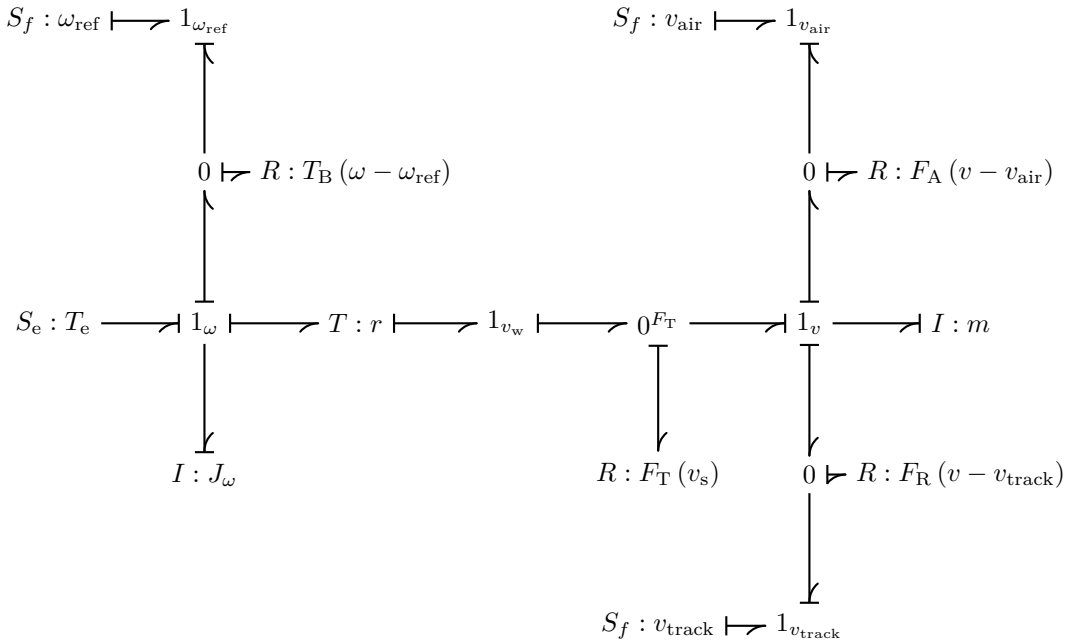
2.1.1 Vazební graf dynamiky dopředného pohybu

Plný nezjednodušený vazební graf lze vidět na obrázku 2.1.

Vstupem systému bude zdroj točivého momentu hnacích elektromotorů $S_e : T_e$.

Dále následuje první subsystém týkající se dynamiky kol soupravy. Vstupní moment T_e přímo roztáčí kola, kterým náleží vlastní moment setrvačnosti J_w . Poslední částí tohoto subsystému je mechanický odpor vůči roztáčení kol – moment tření $T_B(\omega - \omega_{\text{ref}})$, jež je závislý na rozdílu úhlové rychlosti kol ω a referenční úhlové rychlosti ω_{ref} .

Druhým subsystémem je už samotná tramvaj ve smyslu dynamiky jejího dopředného pohybu. Zde se přirozeně uplatňuje setrvačnost vozidla s modulem m – hmotností tramvaje, a odpor vůči dopřednému pohybu vozidla. Odpor vůči dopřednému pohybu je tvořen složkou $F_A(v - v_{\text{air}})$, která reprezentuje aerodynamický odpor, odpor vzduchu vůči pohybu a je závislá na rozdílu rychlosti vozidla v a rychlosti okolního vzduchu v_{air} . Druhou složkou odporu vůči dopřednému pohybu vozidla je $F_R(v - v_{\text{track}})$, síla potřebná k překonání



Obrázek 2.1: Vazební graf dynamiky dopředného pohybu tramvaje

odporu mezi jízdni soupravou a kolejemi. Závisí na rozdílu rychlosti soupravy v a referenční rychlosti kolejí v_{track} .

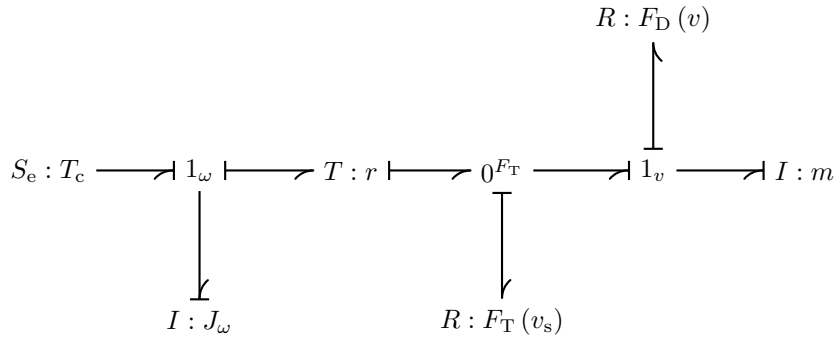
Nejzajímavější a také nejproblematičtější částí modelu je spojení těchto dvou subsystémů – přenos aplikované síly mezi koly tramvaje a celou soupravou, jakožto tělesem pohybujícím se vpřed. Tady je třeba uvažovat tzv. *prokluz*. Prokluz v_s je rozdíl obvodové rychlosti kola v_w a rychlosti posuvné dopředného pohybu v . Bez prokluzu by nedocházelo k žádnému přenosu síly mezi subsystémy. To znamená, že jej v reálném případě můžeme pozorovat prakticky po celou dobu pohybu soupravy. Aplikovaná síla $F_T(v_s)$ mezi koly tramvaje a kolejnicí, která je nezbytná pro pohyb tramvaje, je tedy funkcí prokluzu.

2.1.2 Zjednodušení vazebního grafu

Pro naše účely budu uvažovat všechny referenční rychlosti ω_{ref} , v_{air} a v_{track} nulové. Celý graf se tak výrazně zjednoduší a zpřehlední.

Další úpravou bude včlenění odporu $T_B(\omega - \omega_{\text{ref}})$, který je nyní závislý pouze na hodnotě ω , do zdroje momentu $S_e : T_e$, čímž vznikne zdroj $S_e : T_c$. Dále je možné spojit odporové síly $F_A(v - v_{\text{air}})$ a $F_R(v - v_{\text{track}})$, obě nyní závislé už pouze na hodnotě v , do jedné síly $F_D(v)$ zvané *Davisova síla*. Davisova síla je často používána právě ve vztahu s kolejovými vozidly a označuje celkový odpor prostředí vůči pohybu kolejové soupravy.

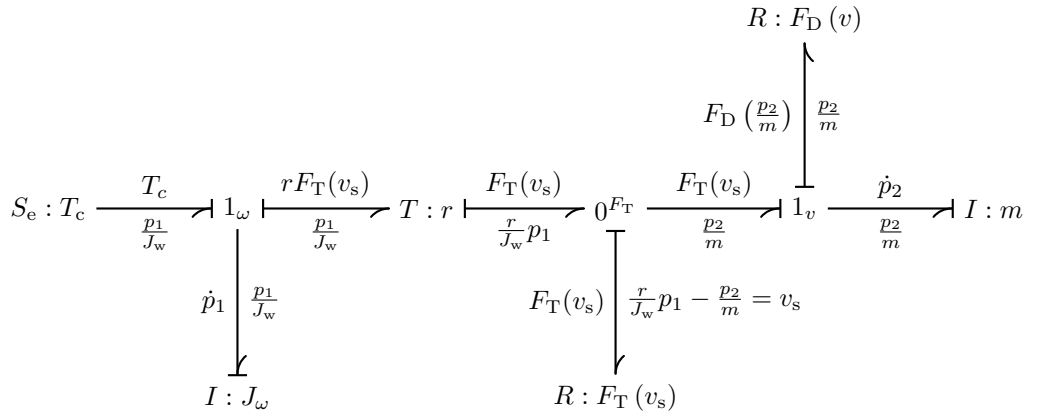
Zjednodušený vazební graf lze vidět na obrázku 2.2.



Obrázek 2.2: Zjednodušený vazební dynamiky tramvaje

2.1.3 Stavový popis

Vazební graf na obrázku 2.2 využijí k získání stavových rovnic systému, obrázek 2.3.



Obrázek 2.3: Stavový popis modelu dynamiky tramvaje

$$\dot{p}_1 = T_c - r F_T \left(\frac{r}{J_w} p_1 - \frac{p_2}{m} \right), \quad (2.1)$$

$$\dot{p}_2 = F_T \left(\frac{r}{J_w} p_1 - \frac{p_2}{m} \right) - F_D \left(\frac{p_2}{m} \right). \quad (2.2)$$

Stavové proměnné p_1 a p_2 ještě nahradím přirozenějšími a již dříve avizovanými veličinami ω a v

$$\omega = \frac{p_1}{J_w} \implies \dot{\omega} = \frac{\dot{p}_1}{J_w}, \quad (2.3)$$

$$v = \frac{p_2}{m} \implies \dot{v} = \frac{\dot{p}_2}{m}. \quad (2.4)$$

A nyní lze dosadit do rovnic (2.1) a (2.2)

$$\dot{\omega} = -\frac{r}{J_w} F_T (r\omega - v) + \frac{T_c}{J_w}, \quad (2.5)$$

$$\dot{v} = \frac{1}{m} F_T (r\omega - v) - F_D(v), \quad (2.6)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega} \\ \dot{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r^2}{J_w} \frac{\delta F_T}{\delta \omega} & \frac{r}{J_w} \frac{\delta F_T}{\delta v} \\ \frac{r}{m} \frac{\delta F_T}{\delta \omega} & -\frac{1}{m} \frac{\delta F_T}{\delta v} - \frac{\delta F_D}{\delta v} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{J_w} \\ 0 \end{bmatrix} T_c. \quad (2.7)$$

2.1.4 Specifikace vybraných parametrů

Aplikovaná síla $F_T(v_s)$

Síla $F_T(v_s)$ vyčísluje přenos síly mezi koly vozidla a dopřednou dynamikou tramvaje. Tento vztah je poměrně komplikovaný a závisí na mnoha parametrech včetně adhezních podmínek a míře prokluzu. Jednu z jejích podob jsem si vypůjčil z [2]

$$\mu = c_a \exp(-a_a v_s) - d_a \exp(-b_a v_s), \quad (2.8)$$

$$F_T = \mu F_N = \mu mg \cos \alpha, \quad (2.9)$$

kde μ je koeficient přílnavosti, sada parametrů $[a_a, b_a, c_a, d_a]$ jsou charakteristické pro jednotlivé typy adhezních podmínek, v_s je hodnota prokluzu ($v_s = r\omega - v$), m je hmotnost soupravy, g je tíhové zrychlení a α je aktuální sklon vozovky.

Davisova síla $F_D(v)$

Síla $F_D(v)$ vyčísluje celkový odpor prostředí vůči pohybu kolejové soupravy. Je složena z aerodynamických a mechanických sil a závisí mimo jiné na jednotlivých fyzických parametrech soupravy a kolejnic, sklonu trati a dalších vlastnostech prostředí. V práci [3] je zmíněna jedna z jejích verzí

$$F_D = Mg \left(0,1G + A + \frac{S^2}{B} \right), \quad (2.10)$$

kde M je hmotnost vozidla v tunách, G je sklon vozovky v procentech a S je rychlost v km/h, A a B jsou konstanty, které je třeba identifikovat.

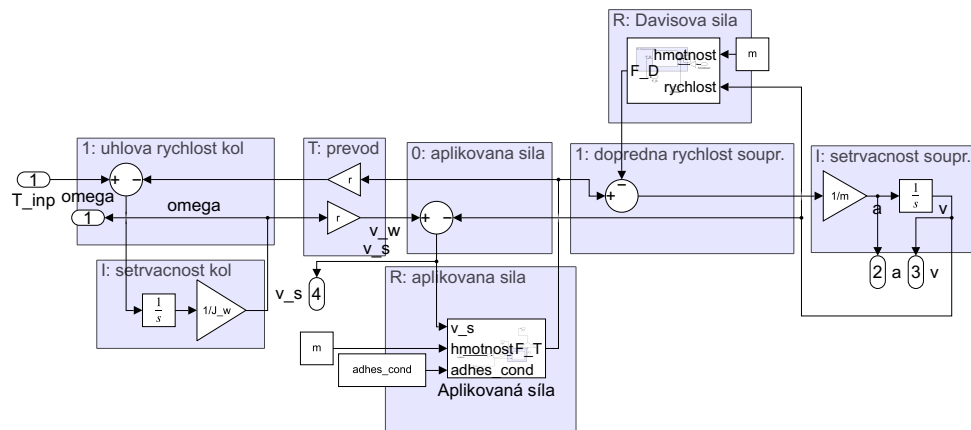
Vztah (2.10) jen převedu do základních jednotek

$$F_D = 0,001mg \left(10 \sin \alpha + A + \frac{(3,6v)^2}{B} \right), \quad (2.11)$$

kde m je hmotnost soupravy v kg, v je rychlost soupravy v m/s.

2.2 Implementace dopředné dynamiky

Podle schématu 2.2 jsem vytvořil v prostředí Simulink model dynamiky dopředného pohybu tramvaje, obrázek 2.4. S výhodou jsem využil vlastnosti vazebního grafu s kauzalitami, který znázorňuje směr „pohybu“ zobecněných úsilí a toků.



Obrázek 2.4: Model dynamiky tramvaje v prostředí Simulink

Kapitola 3

Senzory

3.1 Odometrická měření

3.1.1 Princip odometrie

Odometrie je založena na inkrementálním čítači polohy. Rozlišení takového čítače je dáno počtem zubů, které se nacházejí na disku kola, případně na jeho hřídeli. U tramvajů čítač snímá zuby na hřídeli kola.

Výstupem odometrie je tedy informace ve formě pulzů. Každý pulz znamená otočení kola o určitý úhel φ_p , kde

$$\varphi_p = \frac{2\pi}{N}. \quad (3.1)$$

Z pulzů odometrického čítače lze snadno odvodit celkový úhel otočení měřeného kola. Na základě časové změny úhlu otočení lze určit úhlovou rychlost daného kola.

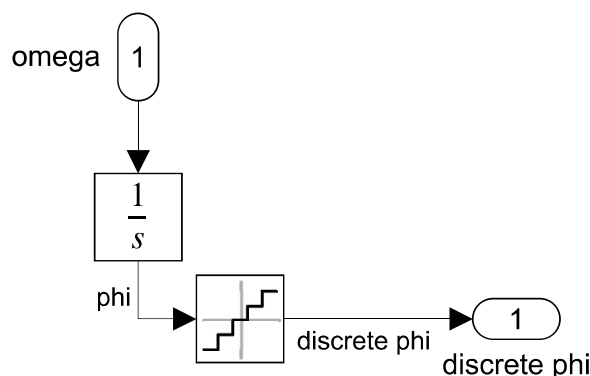
Zdrojem nepřesností určování úhlové rychlosti jsou jednak chybové parametry v konstrukci struktury inkrementálního čítače, jednak nepřesnosti při měření času. Chybové parametry konstrukce jsou závislé na kvalitě výroby, případně na míře opotřebení. Dalším problémem jsou nepřesnosti vycházející z diskrétního měření času, které se u jednotlivých metod také v určité míře projevují. Více se tématu zpracování odometrie budu věnovat v kapitole 5.

3.1.2 Implementace odometrie

Jeden odometrický pulz odpovídá úhlu otočení kola φ_p dle vztahu (3.1). Ve vazebním grafu 2.2, tedy i v simulinkovém schématu 2.4 je k dispozici přímo informace o úhlové rychlosti ω . Integrací a kvantováním této informace jsem namodeloval odometrický výstup. Ten zabezpečí Simulinkový bloček z obrázku 3.1. Jeho funkce je popsána následovně:

1. vstup úhlové rychlosti ω
2. integrátor, jehož výstupem je „uražený“ úhel Φ

3. kvantizátor s krokem φ_p , který simuluje diskrétnost odometrického měření, výstup φ



Obrázek 3.1: Model odometrického čítače v prostředí Simulink

$$\varphi = \left\lfloor \frac{\Phi}{\varphi_p} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{N\Phi}{2\pi} \right\rfloor, \quad (3.2)$$

kde φ_p je úhel odpovídající jednomu pulzu odometrického čítače.

Takto kvantovaná informace o úhlu již poslouží jako vstup do metod zpracování odometrie, kterými se zabývám v kapitole 5.

3.2 Měření z akcelerometru

3.2.1 Princip akcelerometru

Detailnějším vysvětlením principu akcelerometru se zabývám v kapitole 6.

Akcelerometr běžně udává velikost specifické síly ve směru každé ze 3 os x , y a z . Výsledná informace je tak vektor. Budu-li uvažovat jednu z os, typicky osu x srovnanou se směrem jízdy vozidla, tedy i vektorem jeho zrychlení a , bude hodnota specifické síly, tzn. i výstupu akcelerometru, ve směru této osy rovna

$$f_x^i = a + g \sin \alpha, \quad (3.3)$$

kde g je tíhové zrychlení a α je úhel sklon vozovky.

Při znalosti úhlu sklonu vozovky α můžeme z akcelerometru získat odhad zrychlení a . Tento odhad stejně jako výstup celého akcelerometru je však vždy zatížen šumem.

3.2.2 Implementace akcelerometru

Princip měření pomocí akcelerometru je značně jednodušší a přímočařejší. Ve vazebním grafu 2.2, tedy i v simulinkovém schématu 2.4 je přímo k dispozici

informace o dopředném zrychlení a kolejového vozidla.

V bločku $I : m$ je nejprve rozdíl aplikované síly F_T a odporové síly F_D vydělen hmotností m a potom integrován k získání rychlosti v jakožto jedné ze stavových veličin. Pokud je výstupem integrátoru rychlost, jeho vstupem musí samozřejmě být zrychlení a , které se i podle 2. Newtonova zákona rovná

$$a = \frac{F}{m} = \frac{F_T - F_D}{m} . \quad (3.4)$$

Jak jsem popsal v předchozí podsekcí 3.2.1, výstup akcelerometru je výslednice zrychlení a a g . V této práci ale předpokládám jízdu po rovině, tedy $\alpha = 0$. Můžu tedy pracovat čistě s osou zrychlení a , například osu x , která je neovlivněna zrychlením g . Požadované zrychlení a je z modelu přímo dostupné a může být použito pro další zpracování.

Při implementaci přidám k singálu zrychlení a ještě bílý šum, který simuluje šum při měření reálným senzorem. Takto zašuměná data už budou vstupem metod pro zpracování signálu z akcelerometru a jeho fúze v kapitole 7.

Kapitola 4

Simulace

V simulacích budu uvažovat jízdu po rovině, tedy $\alpha = 0$.

4.1 Parametry modelu / Tatra T3

Pro simulaci pohybu kolejového vozidla jsem si vybral tramvaj *Tatra T3*, jejímiž charakteristikami se bude tato sekce zabývat. Vztah pro aplikovanou sílu (2.8) a k němu vyčíslené hodnoty z tabulky 4.1 byly zjištěny na vozech *Shikanzen* v článku [2], měly by ale být validní pro veškerá kolejová vozidla.

Pro Davisovu sílu byly v [3] pro vztah (2.11) vyčísleny hodnoty konstant $A = 2,5$ a $B = 850$. Tyto konstanty byly identifikovány pro tramvaje *Sirio*, ale budou pravděpodobně tramvaji *Tatra T3* blízké. Závislost koeficientu přílnavosti na prokluzu a adhezních podmínkách je znázorněna v grafu 4.1.

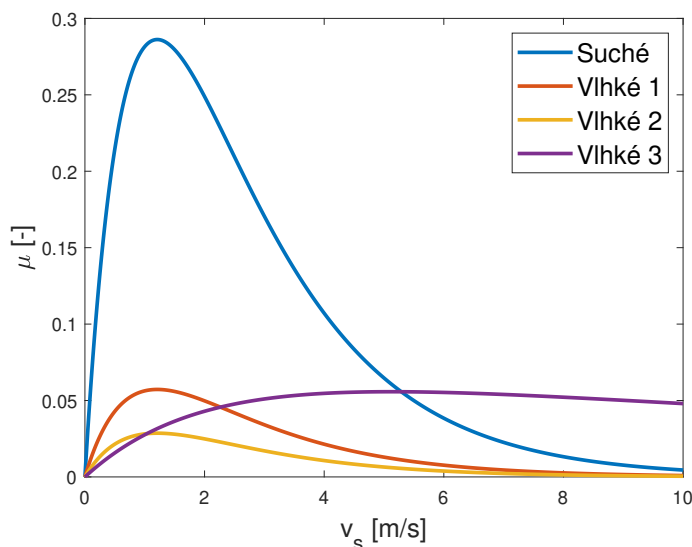
Co se týče odometrie, v této práci budu uvažovat dvě stopy odometrických zubů s posunem pro detekci směru otáčení, každá stopa čítající 125 zubů. Snímaná je vzestupná i sestupná hrana, pulzů přijde na jednu otáčku kola přesně $N = 500$.

Ostatní použité konstanty jsou převzaté z [4, 5] a jsou vypsány v tabulce 4.2.

adhezní podmínky	a_a	b_a	c_a	d_a	μ_{MAX} [-]	v_{sMAX} [m/s]
Suché	0,54	1,2	1,0	1,0	0,2862	1,21
Vlhké 1	0,54	1,2	0,2	0,2	0,0572	1,21
Vlhké 2	0,54	1,2	0,1	0,1	0,0286	1,21
Vlhké 3	0,05	0,5	0,08	0,08	0,0557	5,12

Tabulka 4.1: Parametry adhezních podmínek převzaté z [2]

Brzdná síla tramvajů pochází ze dvou zdrojů. Jednak je možno brzdít motorem, druhá možnost jsou pak mechanické brzdy. Ukazuje se, že v běžném provozu tramvaje brzdí převážně motorem a mechanické brzdy jsou použity



Obrázek 4.1: Koeficient přilnavosti pro jednotlivé adhezní podmínky v závislosti na v_s

až pro úplné zastavení, kdy je maximální odpor elektromotoru už velmi malý. Rozhodl jsem se proto maximální brzdňý výkon brát jako záporně vzatou hodnotu maximálního výkonu elektromotorů.

4.2 Data z experimentu

S týmem kolegů z Katedry řídicí techniky Fakulty elektrotechnické ČVUT jsme se ve spolupráci s průmyslovým partnerem zúčastnili experimentu na zkušební jízdě linky 7 pražské MHD. Naneštěstí se nám nepodařilo získat všechna data potřebná pro mou práci.

Jiná poskytnutá data od průmyslového partnera se mi bohužel nepodařilo vhodně časově synchronizovat. Reálná data proto ve své práci nepoužívám a spoléhám se pouze na data ze simulací.

4.3 Data ze simulace

Pro simulaci jsem navrhnul jednoduchý regulátor, který níže popíši. Především, že nebylo mým zadáním ani ambicí vytvořit přesné nebo optimální řízení. Stejně jako celý model má sloužit pouze ke generování dat k odometrii a akcelerometru.

Základem navrženého řízení je P ($k_p = 10^5$) regulátor, který reguluje prokluz v_s na požadovanou hodnotu. Tato reference je určena z rozdílu

značka	popis	hodnota	jednotka
J_w	moment setrvačnosti kol	82,3875	Nm
r	poloměr kola	0,325	m
m	hmotnost soupravy	16000	kg
g	tíhové zrychlení	9,81	m/s ²
num_of_wheels	počet kol soupravy	8	-
num_of_tr_wheels	počet hnaných kol soupravy	8	-
α	sklon vozovky	0	rad
N	počet odom. pulzů na otáčku	500	-
max_pow	maximální souhrnný výkon elektromotorů	176000	W
adhes_cond	adhezní podmínky	0 (Suché)	-

Tabulka 4.2: Konstanty použité v simulaci převzaté z [4, 5]

požadované a aktuální rychlosti

$$v_{s \text{ ref}} = \begin{cases} 0,5 \text{sign}(e) & e > 1 \\ 0,5e & \text{jinak} \end{cases}, \quad (4.1)$$

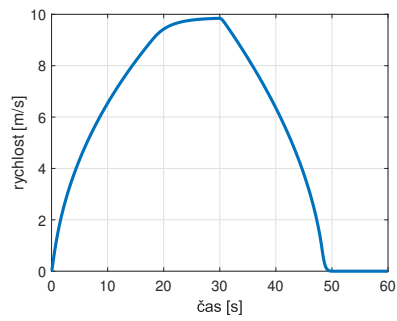
kde e je regulační odchylka, tedy rozdíl mezi požadovanou a skutečnou rychlostí.

K následujícím krokům mě inspirovala práce [5]. Výstupem regulátoru je požadovaný výkon, který je v dalším bločku převeden na točivý moment T_c , a to v závislosti na úhlové rychlosti ω . Maximální točivý moment T_c je nepřímo závislý na úhlové rychlosti ω , protože jejich součin je výkon motoru, který je limitován, viz. tabulka 4.2. Dále je zařazen dolnoproputní filtr s mezní frekvencí 3 rad/s, kvůli zpoždění reakce motorů.

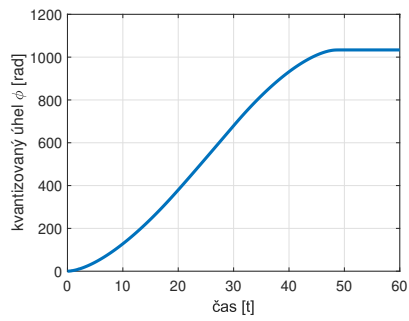
Scénář je jednoduchý:

1. Tramvaj na rovině se v čase 0 s rozjíždí z nulové rychlosti. V tu chvíli totiž přijde skok reference rychlosti na 10 m/s.
2. V čase 30 s přijde další skok reference rychlosti zpět na 0 m/s a tramvaj začne brzdít.

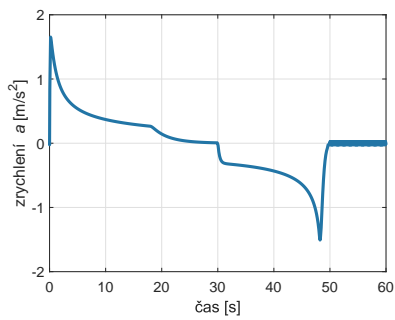
Z grafů v 4.2 mimo jiné vidíme, že regulace kolejových vozidel pomocí prokluzu může vést k poměrně dobrému řízení.



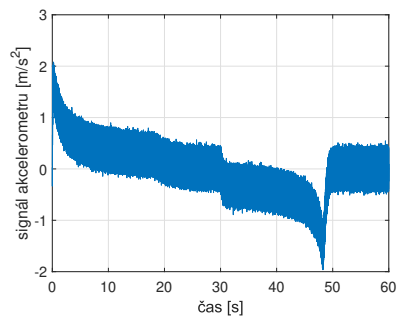
(a) : Rychlost v tramvaje



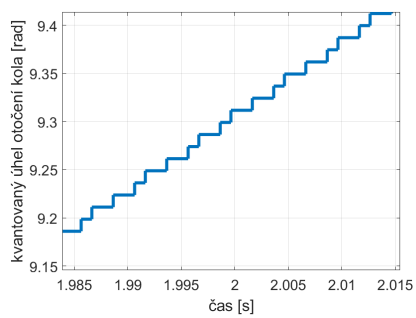
(b) : Odometrický výstup φ tramvaje



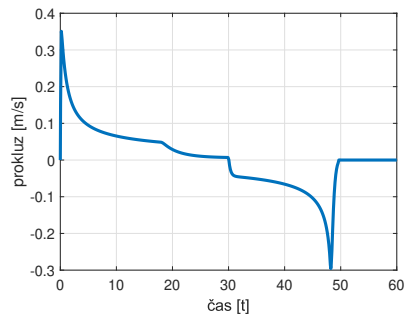
(c) : Zrychlení a tramvaje



(d) : Výstup akcelerometru



(e) : Přibližný odom. výstup φ



(f) : Prokluz v_s tramvaje

Obrázek 4.2: Simulace

Kapitola 5

Zpracování odometrie

Přesný odhad úhlové rychlosti otáčení kola vozidla je prvním krokem k získání odhadu zrychlení. Metodami pro odhad úhlové rychlosti z výstupu inkrementálního odometrického čítače se budu v této kapitole zabývat.

5.1 Základní metody zpracování odometrie

Nejjednodušší metody jsou založené pouze na čítání pulzů inkrementálního čítače polohy a časového čítače. Jejich nespornou výhodou je nízká paměťová a výpočetní náročnost, tedy i nižší cena jejich implementace. Při popisu těchto metod vycházím ze článků [6, 7].

5.1.1 Měření periody

Jednou z nejjednodušších metod měření úhlové rychlosti z odometrie je metoda měření periody.

V této metodě se jednoduše vychází ze vztahu

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}. \quad (5.1)$$

Ve chvíli, kdy dojde pulz z inkrementálního čítače polohy, algoritmus vyhodnotí odpovídající úhel a dobu od příchodu posledního pulzu. Jejich podíl je průměrná velikost úhlové rychlosti za právě skončený interval

$$\hat{\omega} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{\varphi_p}{n_t T_f}, \quad (5.2)$$

kde φ_p je úhel odpovídající jednomu pulzu inkrementálního čítače polohy, n_t je počet pulzů vysokofrekvenčního hodinového čítače od poslední aktualizace rychlosti a T_f je perioda rychlého hodinového čítače.

Chyba této metody bude největší, když pulz z čítače polohy přijde limitně blízko před dalším pulzem vysokofrekvenčního časového čítače

$$\hat{\epsilon} = \frac{\varphi_p}{n_t T_f} - \frac{\varphi_p}{(n_t + 1) T_f} = \frac{\varphi_p}{n_t (n_t + 1) T_f} \quad (5.3)$$

Relativní chyba je podíl absolutní chyby a reálné rychlosti. Pro horní odhad absolutní chyby (vztah (5.3)) dostanu horní odhad relativní chyby

$$\delta = \frac{\varphi_p}{n_t(n_t + 1)T_f} \left(\frac{\varphi_p}{(n_t + 1)T_f} \right)^{-1} = \frac{1}{n_t} = \frac{\omega T_f}{\varphi_p} \quad (5.4)$$

Ze vztahu (5.4) je patrné, že chyba této metody se zvyšuje s rostoucí úhlovou rychlostí měřeného kola. Tato chyba je horním odhadem chyby způsobené diskrétním vzorkováním času vysokofrekvenčním časovým čítačem. Metodu měření periody je proto vhodné použít pro nízké úhlové rychlosti.

5.1.2 Metoda měření frekvence

Další ze základních metod naopak měří počet pulzů inkrementálního čítače polohy během jedné pevně dané časové periody T

$$\hat{\omega} = \frac{n_p \varphi_p}{T}, \quad (5.5)$$

kde n_p je počet pulzů inkrementálního čítače polohy během jedné měřicí periody T , φ_p je úhel odpovídající jednomu pulzu inkrementálního čítače polohy.

Horní odhad absolutní chyby této metody odvodím ze situace, kdy měřicí perioda T skončí limitně blízko před příchodem dalšího pulzu z inkrementálního čítače polohy

$$\hat{\epsilon} = \frac{(n_p + 1)\varphi_p}{T} - \frac{n_p \varphi_p}{T} = \frac{\varphi_p}{T}. \quad (5.6)$$

Zajímavější je relativní chyba, vztážená opět ke správné hodnotě úhlové rychlosti

$$\delta = \frac{\varphi_p}{T} \left(\frac{(n_p + 1)\varphi_p}{T} \right)^{-1} = \frac{1}{n_p + 1} = \frac{\varphi_p}{\omega T}. \quad (5.7)$$

Ze vztahu (5.7) je zřejmé, že relativní chyba metody měření frekvence klesá s rostoucí úhlovou rychlostí ω . Tato skutečnost je dána tím, že pro vyšší úhlové rychlosti jsou pulzy z inkrementálního čítače polohy k dispozici častěji a během fixní periody T nemůže dojít k tak vysoké relativní odchylce. Metodu měření frekvence je proto vhodné použít pro vysoké úhlové rychlosti.

5.1.3 Metoda CSDT (Constant Sample-time Digital Tachometer)

Spektrum nízkých úhlových rychlostí spolehlivě odhaduje metoda měření periody. Zatímco pro spektrum vysokých úhlových rychlostí je vhodnější metoda měření frekvence. Logickým procesem je snaha o zkombinování těchto dvou metod, aby výsledek splňoval požadavek na přesnot určení úhlové rychlosti.

Jistou vhodnou kombinací metody měření frekvence a metody měření periody skýtá metoda CSDT (Constant Sample-time Digital Tachometer). Tato metoda je velmi podobná metodě měření frekvence, ale zpřesňuje hodnotu v čitateli vztahu (5.5). Vysokofrekvenční časový čítač totiž měří dobu ΔT od posledního pulzu inkrementálního snímače polohy do konce měřicí periody T . Vztah pro výpočet rychlosti pro metodu CSDT je

$$\hat{\omega} = \frac{n_p \varphi_p}{T + \Delta T_{i-1} - \Delta T_i} \quad (5.8)$$

Doba $(T + \Delta T_{i-1} - \Delta T_i)$ je přesnějším určením doby, za kterou přišlo n_p pulzů z inkrementálního čítače polohy. Díky tomu lze na metodu CSDT pohlížet také jako na metodu měření periody, kde se však měří perioda n_p pulzů, přičemž se tato hodnota n_p dynamicky mění úměrně aktuální úhlové rychlosti.

Pro nízké rychlosti se může stát, že během periody T nepříjde žádný pulz z odometrie. Obecně může přijít další odometrický pulz až během m -té periody. Metoda CSDT řeší tuto situaci tak, že periody bez odometrického pulzu nechává stejný odhad úhlové rychlosti jako v předchozí periodě. Vztah (5.8) je pro tyto případy nutné trochu upravit. Aktualizace po m periodách a obecný tvar určení úhlové rychlosti metodou CSDT

$$\hat{\omega} = \frac{n_p \varphi_p}{mT + \Delta T_{i-m} - \Delta T_i} \quad (5.9)$$

kde m je počet period čekání na pulz inkrementálního čítače polohy.

Samotná metoda CSDT zachovává pro nízké rychlosti předchozí odhad úhlové rychlosti, proto je pro případ zastavení nebo dokonce změny směru pohybu nepřesná. Drobné vylepšení přinese jednoduchá úvaha, totiž že počet period bez odometrického pulzu se dá použít pro určení horního odhadu úhlové rychlosti. Tato metoda se nazývá LVC (Low-Velocity Compensation).

Chyba metody CSDT vznikne pouze nepřesností měření časů ΔT_i a ΔT_{i-m} vysokofrekvenčním časovým čítačem s periodou T_f . Pro jednu aktualizaci rychlosti dle vztahu (5.9) je horní odhad relativní chyby metody

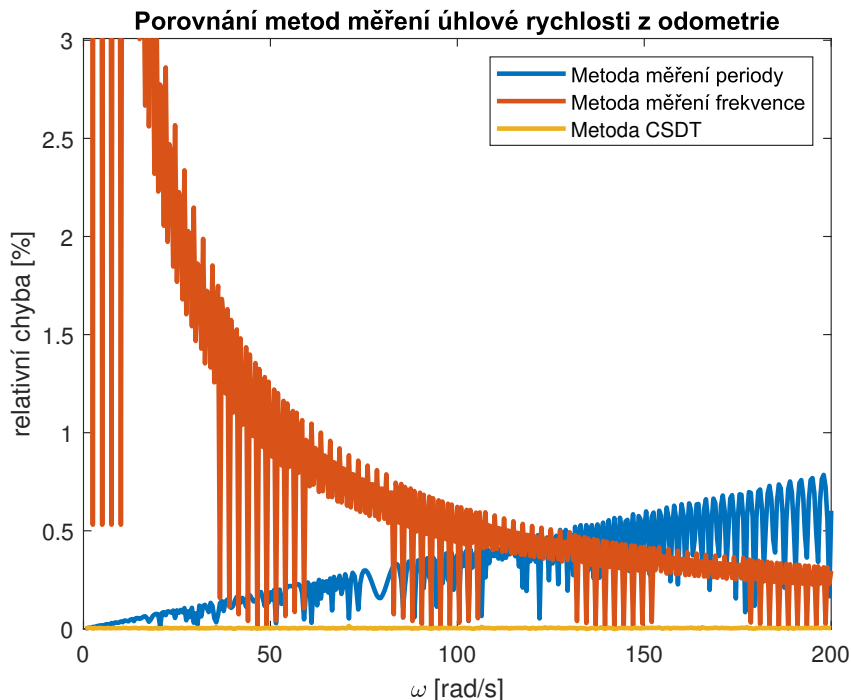
$$\delta = \frac{2T_f}{mT + \Delta T_{i-m} - \Delta T_i + 2T_f} \quad (5.10)$$

Ze vztahu (5.10) je zjevné, že pro výrazně rychlejší vysokofrekvenční časový čítač s periodou T_f než je měřicí perioda T je maximální chyba metody CSDT velmi malá. Navíc je velkou výhodou této metody fakt, že její chyba není závislá na úhlové rychlosti ω . Metoda CSDT je proto univerzální pro použití odhadu úhlové rychlosti v celém rozsahu rychlostí.

5.1.4 Porovnání metod zpracování odometrie

Jednotlivé metody jsem naimplementoval dle popisů výše v prostředí Simulink. Před samotným měřením rychlosti bylo třeba namodelovat výstup inkrementálního odometrického čítače odbobně jako v sekci 3.1. Vstupní úhlová rychlost ω bude v tomto případě konstantní. Takto kvantovaná informace o úhlu již poslouží jako vstup do metod zpracování odometrie.

■ Porovnání při konstantní úhlové rychlosti



Obrázek 5.1: Porovnání metod zpracování odometrie

Měření probíhalo pro konstantní úhlovou rychlost ω v rozmezí 0 až 200 rad/s s krokem 0,5 rad/s. Celkem tedy 401 měření, každé s vlastní konstantní hodnotou ω .

Jednotkový skok na začátku měření způsobil u všech metod více či méně významný zákmit. Proto byly pro výpočet relativní chyby použity až hodnoty po ustálení výstupu, konkrétně po čase $3T$. Chyba byla vypočtena jako RMSE (Root Mean Square Error) rozdílu odhadnuté úhlové rychlosti $\hat{\omega}$ a známé zadané referenční úhlové rychlosti ω . Hodnota chyby byla ještě vztahována k úhlové rychlosti ω

$$\delta_{\text{rel}} = \frac{\text{rmse}(\hat{\omega} - \omega)}{\omega_{\text{mean}}}, \quad (5.11)$$

kde ω_{mean} je střední hodnota úhlové rychlosti, v tomto případě nastavená konstantní rychlost.

U metody měření frekvence jsou pozorovatelné výrazné zákmity ve směru vyšší přesnosti, tj. nižší relativní chyby. Tyto pulzy jsou snadno vysvětlitelné tím, že na každou měřicí periodu T této metody vyšel (alespoň přibližně) celočíselný počet pulzů z inkrementálního čítače úhlu. Díky tomu se nestávalo, alespoň ne často, že by pro konstantní úhlovou rychlost ω přišel ve dvou po sobě následujících měřicích periodách T jiný počet pulzů odometrie a odhadovaná rychlost byla tak stabilní a relativně přesná.

Obdobné zákmity lze pozorovat u metody měření periody. Zde je tato skutečnost způsobena celočíselným počtem pulzů časového čítače.

Všechny použité simulační konstanty jsou v tabulce 5.1.

T	T_f	N	ω_{\min}	ω_{\max}	ω_{step}
10 ms	1 μs	500	0 rad/s	200 rad/s	0,5 rad/s

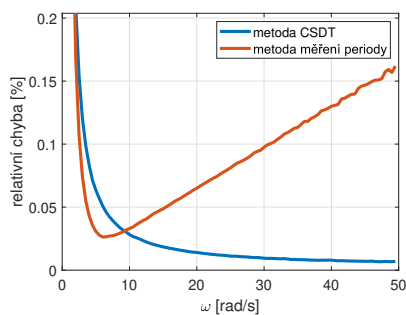
Tabulka 5.1: Simulační konstanty

■ Porovnání při konstantním úhlovém zrychlení

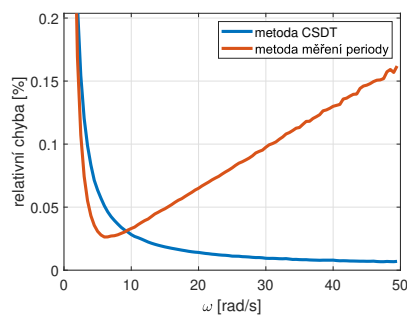
Obdobně jako v předchozí oddílu 5.1.4 porovnám přesnost metod pro odhad úhlové rychlosti z odometrie. Tentokrát bude vstupní úhlová rychlost ω trojúhelníkový signál

$$\omega(t) = \begin{cases} 0,5t, & 0 \leq t < 100 \\ 100 - 0,5t, & 100 \leq t < 200 \end{cases} \quad (5.12)$$

Z průběhu odhadu úhlové rychlosti jednotlivých metod byl vždy vzat úsek o šířce ω_{width} 1 rad/s se střední hodnotou ω_{mean} v rozmezí 0,5 až 49,5 rad/s s krokem ω_{step} 0,5 rad/s. Potom byla opět podle vztahu (5.11) vyčíslena relativní chyba pro konkrétní úsek a závislost této chyby na úhlové rychlosti ω je vynesena v grafu 5.2.



(a) : Relativní odchylka metod při úhlovém zrychlení 0,5 rad/s²



(b) : Relativní odchylka metod při úhlovém zrychlení -0,5 rad/s²

Obrázek 5.2: Porovnání metod pro konstantní úhlové zrychlení

Chyby při zrychlování a zpomalování jsou tak prakticky totožné. Metoda měření frekvence při tomto měření vykázala o řád vyšší chybu a nebyla proto ani vykreslena v grafu 5.2. Tato chyba by nejspíše pro vyšší úhlové rychlosti byla nižší než chyba u metody měření periody, která má vzestupný trend. Nižší chybu než CSDT však metoda měření frekvence už z podstaty nevykáže.

Konstanty T , T_f a N jsou stejné jako v tabulce 5.1. Ostatní použité simulační konstanty jsou v tabulce 5.2.

■ 5.3 Shrnutí

V této části byl vysvětlen princip odometrie. Byly diskutovány různé metody odhadu úhlové rychlosti z výstupu odometrického inkrementálních čítače. Díky poměrně uspokojivé přesnosti a nízké paměťové i výpočetní náročnosti byla vybrána metoda CSDT ze vztahu 5.1.3 s vylepšením LVC.

Kapitola 6

Akcelerometr

6.1 Výstup akcelerometru

Akcelerometr neměří zrychlení, ale *specifickou sílu*. Specifická síla se dle [11] rovná

$$f^i = \ddot{p}^i - G^i, \quad (6.1)$$

kde \ddot{p}^i je fyzické zrychlení a G^i je tíhové zrychlení. \ddot{p}^i působí ve směru pohybu vozidla, G^i působí přímo dolů k zemi.

6.2 Zarovnání os akcelerometru a měřeného zrychlení

Třiosý MEMS (*Micro Electro Mechanical Systems*) akcelerometr měří specifickou sílu působící ve směru každé ze tří os x , y a z . Úhel vektorů \ddot{p}^i a G^i s osami akcelerometru je dán sklonem vozovky, případně i konfigurací vozidla a upevnění akcelerometru v něm. Vliv jednotlivých složek specifické síly na výstup akcelerometru pro uřitou jeho osu lze získat pomocí skalárního součinu specifické síly f^i s jednotkovým vektorem ve směru této osy.

V této práci uvažují, že vektor zrychlení a , který odpovídá vektoru \ddot{p}^i je zarovnaný s osou x akcelerometru. Skalární součin f^i s jednotkovým vektorem osy x je pak

$$f^i = a - G^i \cos \delta, \quad (6.2)$$

kde δ je úhel mezi osou x akcelerometru a směrem vektoru $-G^i$.

Jelikož vektor $-G^i$ působí přímo vzhůru, pak úhel δ odpovídá $\frac{\pi}{2} - \alpha$, kde α je úhel sklonu vozovky ve směru pohybu vozidla. Rovnici (6.2) lze pak upravit

$$f^i = a - G^i \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) = a - G^i \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) = a + G^i \sin \alpha, \quad (6.3)$$

která odpovídá rovnici (3.3).

Problematikou obecného zarovnání akcelerometru se zabývají jiné projekty na Katedře řídicí techniky.

■ 6.3 Šum senzoru

Šum akcelerometru je pro nižší frekvence převážně typu $1/f$, pro vyšší převládá bílý Gaussovský šum, podle [12]. Na modelování šumu akcelerometru bohužel nezbyl v časovém rozsahu této práce prostor, proto jsem jej nahradil pouze bílým Gaussovským šumem.

Kapitola 7

Fúze dat ze senzorů

Měřené veličiny na kolejovém vozidle a tedy i vstupy metod fúze navrhovaných v této kapitole jsem popisoval v předchozích kapitolách. Odometrický výstup z modelu tramvaje byl popsán v sekci 3.1. Zpracování odometrie pro získání odhadu úhlové rychlosti ω se věnovala kapitola 5. Akcelerometrický výstup z modelu tramvaje byl popsán v sekci 3.2. Výsledkem fúze těchto vstupů bude odhad zrychlení a kolejového vozidla.

7.1 Komplementární filtr

7.1.1 Princip

Princip komplementárního filtru je popsán například v článku [13]. Vstupem této metody jsou 2 či více signálů, které nesou informaci o jedné společné veličině, případně jejího integrálu či její derivace. Tento soubor signálů je následně váhovaně sečten tak, aby suma vah jednotlivých vstupních signálů dávala dohromady 1. Například pro 2 vstupy je první váhován činitelem $G(s)$, pak váha druhého je $1 - G(s)$

$$G(s)u_1 + (1 - G(s))u_2 = u_{\text{filt}} , \quad (7.1)$$

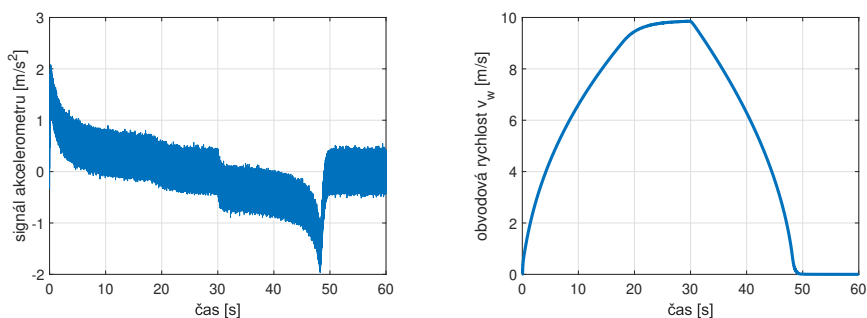
kde u_1 a u_2 je první a druhý vstup měřené veličiny a u_{filt} je výstup metody – filtrovaná veličina.

Pokud by tedy obě měření byla naprosto bezchybná, tedy $u_1 = u_2 = u$, pak výstup $u_{\text{filt}} = u$, jak je patrné z rovnice (7.1).

Metoda komplementárního filtru je celkem jednoduchá. Za povšimnutí však stojí, že váhy jsou frekvenčně závislé. Lze tedy jeden ze vstupních signálů upřednostňovat pro jedno spektrum, například pro nižší frekvence, ten druhý pak pro spektrum opačné, frekvence vyšší. Navíc tyto váhy nemusí být rigorózně přednastaveny, ale mohou být dynamicky měněny v závislosti například na jiné měřené veličině. Dodržena přitom musí být pouze podmínka jedničkového součtu vah.

7.1.2 Vstupy filtrace

K dispozici mám aktuálně odhadovanou úhlovou rychlost ω pomocí odometrie a modelovaný signál akcelerometru. Akcelerometr měří požadovanou veličinu – zrychlení a , signál je ovšem zatížen šumem. Filtrování tohoto šumu bude řešit až samotný filtr. Výstup z odometrie je ještě třeba k filtraci připravit.



(a) : Vstupní informace zrychlení z akcelerometru

(b) : Vstupní informace rychlosti z odometrie

Obrázek 7.1: Vstupy filtrace

Odometrie

Úhlovou rychlost ω převedu jednoduše na obvodovou rychlost

$$v_w = \omega r, \quad (7.2)$$

kde r je poloměr kola vozidla.

U kolejových vozidel je navíc třeba počítat s prokluzem v_s , viz. podsektce 2.1.1. Téma prokluzu je poměrně komplikované a jeho hodnota se velmi těžko určuje. Naštěstí je mým cílem získat z obvodové rychlosti v_w odhad zrychlení a , přičemž derivací se aditivní chyby zanedbají. Chyba odhadu zrychlení a derivací v_w pak nezávisí na hodnotě prokluzu v_s , ale pouze na jeho časové změně, kterou budu považovat za zanedbatelnou.

Numerická diference obvodové rychlosti v_w a následné odfiltrování vyšších frekvencí signálu poskytne odhad zrychlení vozidla a .

7.1.3 Simulace

Komplementární filtr s fixními váhami

V prvním návrhu budu postupovat následovně. Pro filtraci zašuměného signálu akcelerometru zařadím dolnoprůstní filtr

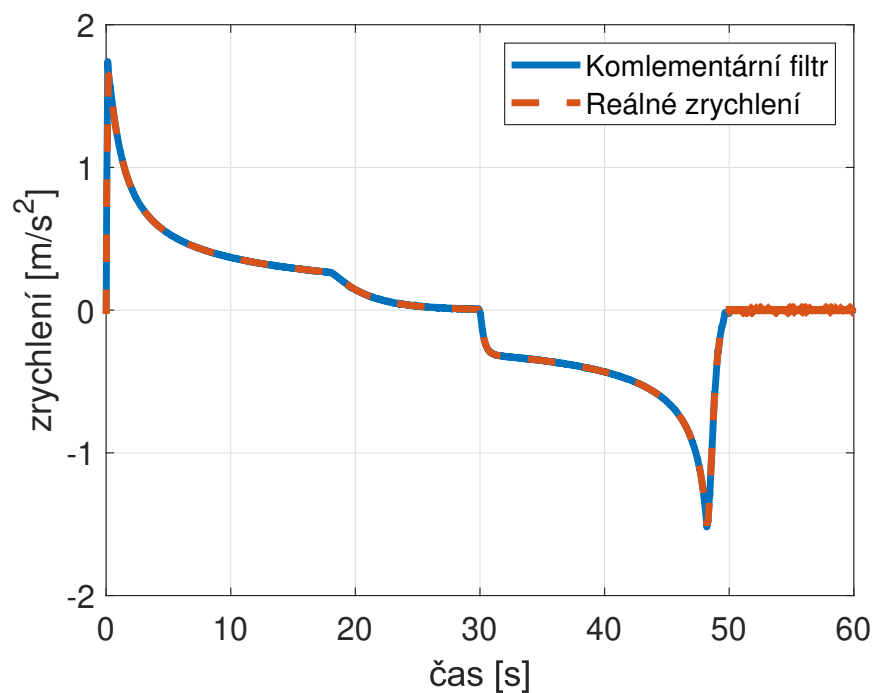
$$G(s) = \frac{200^2}{(s + 200)^2}. \quad (7.3)$$

Zrychlení získanému z odometrie jakožto druhému vstupu případně váha

$$1 - G(s) = \frac{s^2 + 400s}{(s + 200)^2}, \quad (7.4)$$

kterou můžeme označit za hornopropustní filtr.

Použijí stejné parametry a rychlostní profil jako v simulaci z kapitoly 4. Na obrázku 7.2 je porovnání výstupu komplementárního filtru s reálnou hodnotou zrychlení a získanou z modelu z kapitoly 2. Na obrázku 7.4 je pak přiblížena největší odchylka. Na dalším obrázku 7.3 vidíme chybu odhadu zrychlení nefiltrovaného akcelerometrického signálu, akcelerace diferencí odometrie a nakonec implementovaného komplementárního filtru.

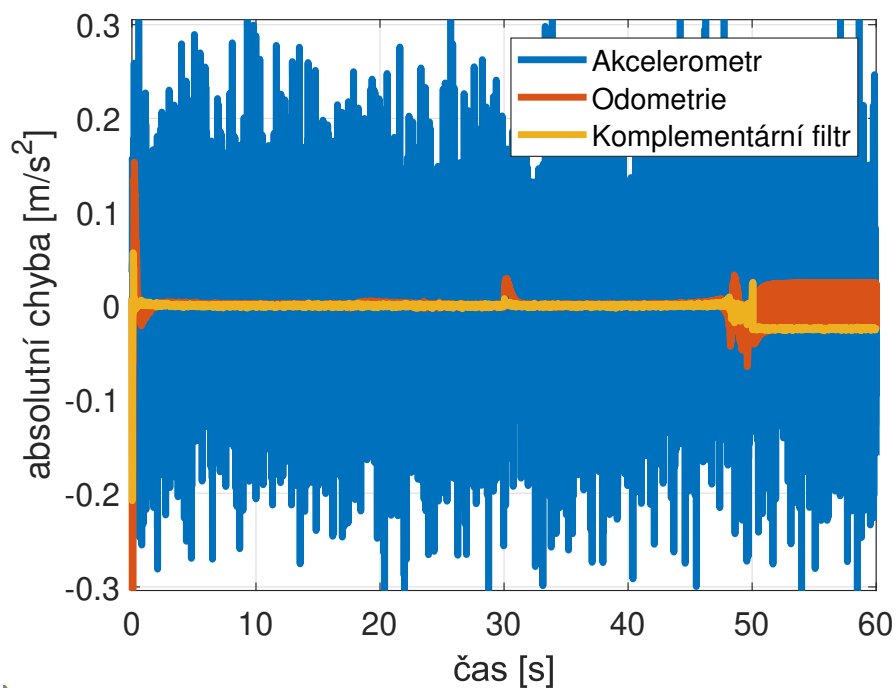


Obrázek 7.2: Porovnání výstupu komplementárního filtru s reálnou hodnotou zrychlení

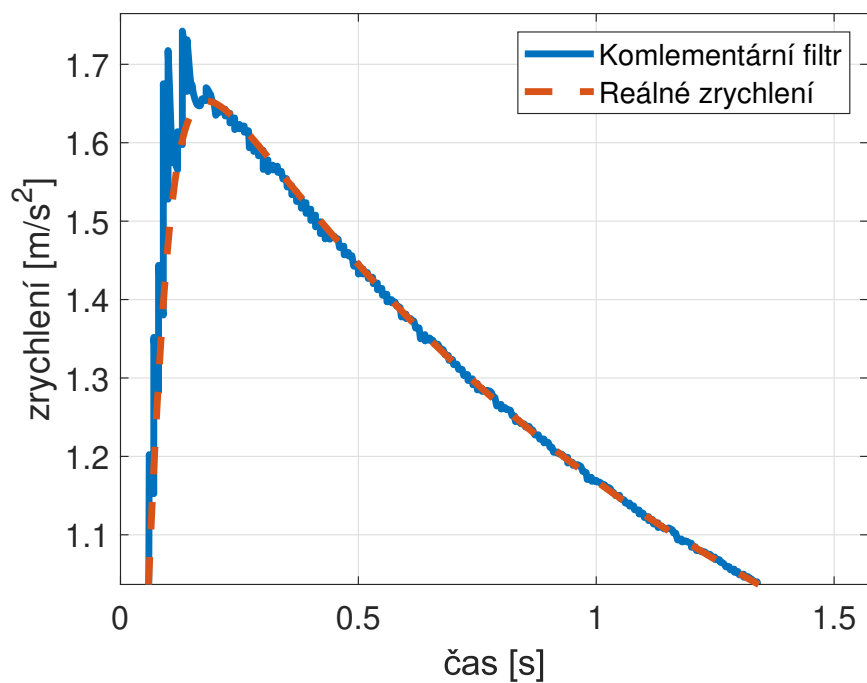
Absolutní chybu jednotlivých odhadů zrychlení jsem vyčíslil v tabulce 7.1 pomocí RMSE celého průběhu. Z hodnot RMSE je patrné, že fúze jednotlivých vstupů komplementární filtrací vykazala lepší výsledky, než každá z metod odhadu zrychlení samostatně.

	Akcelerometr	Odometrie	Komplementární filtr
RMSE [-]	0,10	0,022	0,012

Tabulka 7.1: RMSE odhadů zrychlení



Obrázek 7.3: Absolutní chyba odhadu zrychlení



Obrázek 7.4: Porovnání výstupu komplementárního filtru s reálnou hodnotou zrychlení, přiblíženo

Kapitola 8

Závěr

8.1 Shrnutí

Vytvořený model v prostředí Simulink má mnoho parametrů, které museli být vypůjčeny z ostatních prací. Navíc byly tyto parametry identifikovány na jiných vozidlech, než na vozidle mnou zkoumaném – *Tatra T3*. Přesto je kvalita výstupu modelu poměrně uspokojivá.

V simulaci jsem vyzkoušel návrh řízení pomocí regulace prokluzu. Výsledky řízení byly relativně dobré.

Odhad úhlové rychlosti z odometrie pomocí zvolené metody CSDT s vylepšením LVC byl vcelku přesný. Relativní chyba odhadu byla velmi nízká ve všech částech spektra a to pro konstatní rychlost i konstatní zrychlení. Navíc metoda neklade vysoké nároky na výpočetní výkon a paměť procesoru.

Nakonec jsem se zabýval fúzí odhadu úhlové rychlosti z odometrie a měření z akcelerometru pro získání odhadu zrychlení. Výsledky této fúze byly uspokojivé a odchylka naměřeného zrychlení od reálné hodnoty byla nižší než u každého z fúzovaných signálů jednotlivě.

V práci se podařilo splnit nastavené cíle.

8.2 Budoucí vývoj

Budoucí práce by se měla dle mého názoru zabírat měřeními na reálných systémech a získáváním dat z běžného provozu tramvají či vlaků. Reálná data by mohla být využita i pro určení konstatnt použitého modelu i některého z modelů zmíněných v sekci 5.2.2 a zlepšení odhadu úhlové rychlosti z odometrie. Naměřená data by se dala použít i pro návrh Kalmanova filtru.

Jako další návrh fúzovacího algoritmu by mohl být komplementární filtr s váhami závislými na jiné měřené veličině, například na úhlové rychlosti.



Bibliografie

- [1] Forbes T. Brown. “Hamiltonian and lagrangian bond graphs”. In: *Journal of the Franklin Institute* 328.5 (1991), s. 809–831. ISSN: 0016-0032. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-0032\(91\)90056-9](https://doi.org/10.1016/0016-0032(91)90056-9). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016003291900569>.
- [2] Y. Takaoka a A. Kawamura. “Disturbance observer based adhesion control for Shinkansen”. In: *6th International Workshop on Advanced Motion Control. Proceedings (Cat. No.00TH8494)*. 2000, s. 169–174. DOI: 10.1109/AMC.2000.862851.
- [3] Jakob Edstrand. “Calculation method for powering a tramway network”. diplomová práce. Göteborg, Švédsko: Chalmers University of Technology, 2012.
- [4] Stanislav Linert, Pavel Fojtík a Ivo Mahel. *Kolejová vozidla pražské městské hromadné dopravy*. Praha: Dopravní podnik hl. m. Prahy, 2005. ISBN: 80-239-5463-6.
- [5] Loi Do. “V2V communication-enabled collision avoidance for railroad vehicles”. diplomová práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2019.
- [6] Roberto Petrella et al. “Speed measurement algorithms for low-resolution incremental encoder equipped drives. a comparative analysis”. In: *2007 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics*. IEEE, 2007, s. 780–787. ISBN: 978-1-4244-0890-0. DOI: 10.1109/ACEMP.2007.4510607. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4510607/>.
- [7] Martin Gurtner. “Pokročilé metody návrhu velmi přesného řízení pohybu”. bakalářská práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2013.
- [8] C. Canudas de Wit et al. “A new model for control of systems with friction”. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 40.3 (), s. 419–425. ISSN: 00189286. DOI: 10.1109/9.376053. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/376053/>.

- [9] O. Polach. “Creep forces in simulations of traction vehicles running on adhesion limit”. In: *Wear* 258.7 (2005). Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems, s. 992–1000. ISSN: 0043-1648. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.046>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164804003072>.
- [10] Öncü Ararat a Mehmet T. Söylemez. “Robust Velocity Estimation for Railway Vehicles”. In: *IFAC-PapersOnLine* 50.1 (2017). 20th IFAC World Congress, s. 5961–5966. ISSN: 2405-8963. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1256>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896317317706>.
- [11] Jay A. Farrell. *Aided Navigation. GPS with High Rate Sensors*. USA: The McGraw-Hill Companies, 2008.
- [12] Faisal Mohd-Yasin, Can E Korman a David J Nagel. “Measurement of noise characteristics of MEMS accelerometers”. In: *Solid-State Electronics* 47.2 (2003), s. 357–360. ISSN: 0038-1101. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-1101\(02\)00220-4](https://doi.org/10.1016/S0038-1101(02)00220-4). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038110102002204>.
- [13] Walter T. Higgins. “A Comparison of Complementary and Kalman Filtering”. In: *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* AES-11.3 (1975), s. 321–325. DOI: 10.1109/TAES.1975.308081.