

## Určování polohy kolejových vozidel s využitím inerciální navigace a detekce charakteristických segmentů tratě

Doktorand: Ing. Lukáš Pušman

Doktorand ve své disertační práci pracoval na tématu určování polohy kolejových vozidel, přičemž se jedná o určování polohy bez požadavku na bezpečnost se zaměřením na městskou hromadnou dopravu nebo menší dopravní síť. Podle úvodu i závěru práce je důležitým cílem práce navrhnout funkční zařízení, které dokáže dlouhodobě i bez příjmu GNSS (Global Navigation Satellite System) signálu vykonávat navigační úlohu. Ta je přitom zaměřena na verifikaci projížděné trati, určování rychlosti, režimu provozu a dalších dispečerských dat pomocí detekce charakteristických segmentů tratě, což je rozdíl oproti typickým navigačním úlohám zaměřeným na dlouhodobé určování přesné polohy.

V úvodu práce doktorand definuje cíle práce, načež v jejím závěru konstatuje, že cíle byly splněny prakticky beze zbytku. Protože jsou cíle v úvodu definované obecně bez kvantitativních požadavků a parametrů, lze v závěru uvést konstatování o splnění cílů práce. Ovšem kvůli absenci kvantitativních požadavků a parametrů nelze objektivně zhodnotit, do jaké míry jsou v úvodu stanovené cíle skutečně naplněny i z pohledu případného budoucího praktického využití navrženého systému. Doktorand v práci zdůrazňuje schopnost systému provádět navigační úlohu i bez využití signálu GNSS, avšak v práci není diskutováno, zda s ohledem na přesnost provádění navigační úlohy jen s využitím inerciálních prostředků je či není vhodné doplnit realizovaný systém i o využití GNSS informací. Ty jsou přitom v navrženém systému k dispozici a např. pro funkci detekce zastávek jsou použita i data z GNSS. Nadto doktorand v práci také zmiňuje výhody a nevýhody navigace pomocí inerciálních systémů a GNSS a konstatuje, že je třeba uvedené možnosti kombinovat, aby se „data vzájemně doplňovala a zpřesňovala“.

V oboru kolejové dopravy je disertační práce významná a původní využitím principu detekce charakteristických segmentů tratě. K tomu doktorand v kap. 6.2.3.4 popisuje, jak byla zaměřena testovací trať, aby následně mohly být detekovány charakteristické segmenty tratě. Není však jasné, jakým způsobem probíhá porovnání naměřených dat se zaměřenou tratí (ručně nebo strojově) a není popsáno, jak vypadá databáze segmentů trati zmíněná v úvodu práce nebo v kap. 5.3.2.9. V souvislosti s principem detekce charakteristických segmentů tratě není jasné, jak prakticky probíhá určení prvotní polohy vozidla před zahájením jízdy, resp. záznamu měřených dat.

Doktorand použil pro řešení zadané úlohy vhodné metody a dopracoval systém do podoby funkčního vzorku, který z pohledu HW i SW dovolil ověřovat zadané cíle a je i předpokladem pro další rozvoj systému směrem ke komerčnějšímu využití. K tomu je třeba řešit např. otázky typu trvalé umístění na vozidle, napájení zařízení, komunikaci s nadřazeným systémem apod., nicméně s ohledem na velký rozsah vyřešených úkolů lze očekávat, že doktorand je v tomto smyslu dostatečně fundovaný a navržený systém dostatečně adaptabilní.

Disertační práce je zpracovaná přehledně a v rozsahu cílů definovaných v úvodu v podstatě i systematicky. Určité systematické a systémové nedostatky spočívají v nedostatečném popisu databáze segmentů trati (a práce s ní při porovnání s naměřenými daty) a v absenci zhodnocení možného přínosu začlenění GNSS v řešené navigační úloze. Podobně jako v úvodu chybí také v závěru práce přesnější specifikace (kvantifikace) požadavků pro nejbližší zamýšlené nasazení systému u PMDP. Obtížně se pak hodnotí zralost realizovaného systému pro takovou praktickou aplikaci.

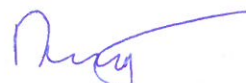
Po formální a jazykové stránce je práce provedená solidně, byly detekovány pouze dílčí gramatické chyby.

Publikační činnost doktoranda lze hodnotit jako dostačující.

**Předloženou disertační práci doporučuji k obhajobě.**

V Plzni, 30.11.2017

Oponent: Ing. Karel Beneš, Ph.D.  
Výzkumný ústav železniční, a.s.  
Technický vedoucí subsystému řízení a zabezpečení



## Oponentní posudek disertační práce

**Autor: Ing. Lukáš Pušman**

**Název práce: "Určování polohy kolejových vozidel s využitím inerciální navigace a detekce charakteristických segmentů tratě"**

**Obor: „Elektronika“ na Fakultě elektrotechnické ZČU v Plzni**

**Školitel: Doc. Ing. Jiří Skála, Ph.D.**

**Oponent: Doc. Ing. Václav Čada, CSc.**

Oponentní posudek disertační práce jsem vypracoval na základě požadavku děkana Fakulty elektrotechnické ZČU v Plzni doc. Ing. Jiřího Hammerbauera, Ph.D. ze dne 31. října 2017.

Posuzovaná práce má rozsah 99 stran včetně seznamu použité literatury, 43 obrázků a 13 tabulek. Dále práce obsahuje seznam 32 autorových publikací dělených podle Definice druhů výsledků výzkumu, experimentálního vývoje a inovací, dva výstupy mimo hodnocení RIV a tři připravované publikace. Práci hodnotím podle těchto kritérií:

1. zhodnocení významu disertační práce pro obor,
2. vyjádření k postupu řešení problému, použitým metodám a splnění určeného cíle,
3. stanovisko k výsledkům disertační práce a k původnímu konkrétnímu přínosu předkladatele disertační práce,
4. vyjádření k systematice, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni disertační práce,
5. vyjádření k publikacím předkladatele disertační práce,
6. jednoznačné vyjádření oponenta, zda doporučuje či nedoporučuje disertační práci k obhajobě.

### ad 1) **Zhodnocení významu disertační práce pro obor**

Disertační práce Ing. Lukáše Pušmana se zabývá navigačním systémem pro dispečerské a informační systémy městské hromadné dopravy nebo menších dopravních sítí či průmyslových aplikací. Přínosné je především propojení navigačních dat s provozními daty vozidla, čímž se získají souborné statistické údaje pro optimalizaci provozu nebo vývoje nových modelů. Určování polohy je řešeno i při dlouhodobé absenci signálu GNSS na základě detekce charakteristických segmentů trasy. Toto téma je vysoce aktuálním globálním tématem teoretického i aplikačního výzkumu.

### ad 2) **Vyjádření k postupu řešení problému, použitým metodám a splnění určeného cíle**

První část práce je věnována teoretickému shrnutí poznatků a principů určování polohy na zemském povrchu metodami globálního navigačního družicového systému (GNSS) nebo inerciálních měření a kombinaci nejméně frekventovanějších metod, ve kterých je integrována jednotka pro měření inerciálních veličin (IMU) a GNSS. V dalším textu je tato množina metod blíže specifikována a upřesněna pro navigaci kolejových vozidel, která se pohybují po předem daných drahách kolejových svršků (vlaky, tramvaje, dopravní systémy průmyslových provozů nebo povrchových dolů) a mají další specifické vlastnosti. Navrhované řešení je spíše orientováno na verifikaci předem známé dráhy, určování rychlosti sledovaného objektu, na režim provozu a další dispečerská data.

Problematické v této souvislosti vidím nasazení zkoumaného systému v podzemí např. v metru, které je v práci uváděno, protože v těchto případech systém GNSS vypadáva s ohledem na nedostupnost signálu družicového segmentu GNSS.

### ad 3) Stanovisko k výsledkům disertační práce a k původnímu konkrétnímu přínosu předkladatele disertační práce

Jedním z konkrétních přínosů předložené práce je zpřesňování inerciálních dat detekovanými charakteristickými segmenty tratě. Důležitými segmenty tratě jsou přímé úseky a kruhové oblouky. V práci je konstatováno, že je potřeba detekovat začátek a konec oblouku. Při návrhu výpočtu poloměru kruhového oblouku však nijak není zohledněna skutečnost, že mezi přímé úseky a úseky oblouků se z důvodu plynulosti změny křivosti vkládají přechodnice. V případě železničních kolejových vozidel se jedná o segmenty kubické paraboly. Tato skutečnost nikde v práci není zmíněna ani zohledněna.

V práci je uvažováno o identifikaci sledované trajektorie pohybu objektu nad mapami středních měřítek (Mapy.cz, OpenStreetMap, Google map,...). Přesnost polohového zákresu linie **osy** trati je v metrech až spíše v desítkách metrů. V těchto mapách nejsou zakresleny **jednotlivé koleje** ani v úsecích volné trati a úplně chybí kolejiště mezi zhlavími jednotlivých stanic a nádraží. Proto bych doporučoval využití dokumentace Jednotné železniční mapy (nebo Digitálních technických map ve městech), kde jsou jednotlivé body osy každé koleje zakresleny detailně s uvedeným staničením veškerých důležitých bodů osy koleje (začátek koleje, začátek přechodnice, konec přechodnice-začátek oblouku, vrchol oblouku, konec oblouku-začátek přechodnice, konec přechodnice,...) v setinách metrů. Obdobně toto platí o identifikaci výhybek (začátek výhybky, bod odbočení, konec výhybky).

Obecně velice problematické jsou jakékoli kartometrické práce (odměřování souřadnic, vzdáleností, délek oblouků, apod) z těchto podkladů s dostatečnou přesností odpovídající potřebám této práce.

Významným přínosem je též návrh a vlastní realizace zařízení pro měření a sběr dat. Součástí navrženého řešení je komunikace se senzory a GNSS modulem včetně ukládání dat na SD kartu. Nedílnou součástí je programové vybavení pro záznam, zpracování naměřených dat a jejich analýzu.

Zhodnocení funkcionality navrženého zařízení a statistického vyhodnocení výsledků ověřovacích měření je popsáno v závěrečné části práce. Zde postrádám především detailnější vyhodnocení a vysvětlení neshody výsledků GNSS a IMU zařízení v hodnotách dosahujících někdy až 30% (viz např. obr. 6.7). Domnívám se, že výsledky měření jsou významně závislé na rychlosti sledovaného objektu. Tomuto parametru však v analytické části práce není věnována pozornost vůbec.

Problematické je také hodnocení dosažených výsledků, pakliže apriori nebyla definována požadovaná přesnost navigace pro řešené konkrétní navigační úlohy. Jiná přesnost bude zřejmě požadována v případě rozhodování, po které koleji projíždí vlaková souprava na vícekolejně dráze nebo na jakou kolej vlak přijel po projetí nádražního zhlaví nebo na jakou kolej přijela tramvajová souprava do depa, a jiná v případě navigační úlohy typu zda je souprava v úseku Zbiroh – Hořovice, nebo již v úseku Hořovice – Zdice.

Bylo by vhodné vysvětlit významný rozdíl mezi vyhodnocenými úseky změřenými navrženou aparaturou a úseky odměřenými z mapových podkladů. V práci je konstatováno, že rozptyl měření aparaturou je více než dvakrát nižší oproti mapovým zákresům. Jaký charakter vyhodnocované odchylky v souboru měření vykazovaly? Byl prokázán vliv systematických chyb, a pakliže ano, tak jak jste tuto skutečnost vyhodnotil a vysvětlil?

#### ad 4) **Vyjádření k systematice, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni disertační práce**

V práci se vyskytlo několik formálních chyb, které však nemají podstatný vliv na výsledné závěry práce jako např.:

- opakovaně je v práci chybně použit termín **souřadný systém** pro **souřadnicový systém** (např. str. V, kap. 3.1, str. 2 a další)
- soustava orientovaná vůči Zemi (geocentrický souřadnicový systém?)
- zmatené vyznění poslední věty druhého odstavce kap. 2 na straně 4
- nesprávně použit pojem **projekce**, na místo **zobrazení**
- systémy GNSS určují polohu nejen na zemském povrchu (viz podkap. 2.1, str. 4), ale též v prostoru nad zemským povrchem (viz např. navigace letadel)
- v obrázku 2.7 je chybně vyznačena zeměpisná šířka  $\varphi$
- trajektorie navigovaného objektu je do mapových podkladů **zobrazována** nikoli **promítána** (podkapitola 2.4) či **situována** (2.4.1), protože projekce jsou pouze jednou ze tříd kartografických zobrazení
- obdobně termín softwarové mapové podklady by bylo vhodné nahradit pojmem digitální mapy nebo digitální mapové sady (pakliže se jedná přímo o data)
- podobně neexistují **fotografické mapy**, ale **ortofotografické zobrazení území**
- není možné tvrdit, že státní mapové dílo spravované rezortem ČÚZK je přesnější, než produkty publikované na Seznam.cz nebo OpenStreetMap
- do roviny se kartografickými zobrazeními zobrazují náhradní referenční plochy Země, kterými jsou koule nebo elipsoid a nikoli kružnice či elipsy. Proto se hovoří o ploše kulové (plocha koule) či elipsoidické (plocha elipsoidu) nikoli **eliptické**
- Mercatorovo konformní zobrazení není projekcí (v anglicky psané literatuře je pro kartografická zobrazení používán termín map projection)
- **oblouky s větším úhlem otočení** (podkapitola 6.2.2) je ve významu směrových změn trasy? Je nutné rozlišit velikost poloměru oblouků a délky oblouků. Nebo se jedná o délku oblouku vyjádřenou v úhlové míře?

#### ad 5) **Vyjádření k publikacím studenta**

Disertační práce obsahuje seznam 32 publikací dělených podle Definice druhů výsledků výzkumu, experimentálního vývoje a inovací, dva výstupy mimo hodnocení RIV a tři připravované publikace, jejímiž je Ing. Lukáš Pušman autor či spoluautor. V případě publikací vytvořených autorským kolektivem postrádám procentuální vyjádření podílů na publikaci. Dále by bylo vhodné doplnit informaci, které publikace vyšly v impaktovaných časopisech (sbornících) a výše impaktu.

#### ad 6) **Jednoznačné vyjádření oponenta, zda doporučuje či nedoporučuje disertační práci k obhajobě**

Předložená práce Ing. Lukáše Pušmana "Určování polohy kolejových vozidel s využitím inerciální navigace a detekce charakteristických segmentů tratě" splňuje podmínky doktorské disertační práce na Fakultě elektrotechnické ZČU v Plzni, a proto ji **doporučuji přijmout k obhajobě**.

Pakliže by bylo uvažováno o publikování výsledků doktorské práce, přimlouval bych se za opravu a dopracování především témat uvedených ve třetí kapitole předložené práce.

V Plzni 20. prosince 2017

Doc. Ing. Václav Čada, CSc.

Doc. Ing. Aleš Filip, CSc.  
Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Studentská 95, 532 10 Pardubice

---

**Oponentský posudek na doktorskou práci**  
**Ing. Lukáš Pušman:**  
**Určování polohy kolejových vozidel s využitím inerciální navigace a detekce**  
**charakteristických segmentů tratě**

#### **Aktuálnost tématu**

Doktorand se ve své práci zabývá velmi aktuální problematikou, kterou je určení polohy vozidel na principu inerciální a satelitní navigace (GNSS). Tyto technologie mohou spolu s dalšími subsystemy inteligentních dopravních systémů významně přispět ke zvýšení bezpečnosti a efektivnosti řízení na pozemních komunikacích. A to zejména tam, kde dochází k průniku s kolejovou, např. tramvajovou dopravou. Autor zaměřil svoji práci na využití relativně levných inerciálních senzorů MEMS, pomocí kterých identifikuje projížděné charakteristické segmenty tratě nezávisle na GNSS. Tento přístup k řešení je v souladu se současnými trendy bezpečné a spolehlivé lokalizace vozidel jak pro účely zabezpečení železniční dopravy (včetně ERTMS/ETCS), tak i autonomního řízení automobilů.

#### **Hodnocení stanovených cílů**

Doktorand ve své práci jasně formuloval následující cíle:

1) prostudování problematiky určování polohy vozidel, 2) výběr a implementace metod vhodných pro kolejová vozidla, 3) návrh a realizace zařízení pro měření a sběr dat, 4) implementace navržených navigačních algoritmů formou softwaru pro zpracování dat a 5) provedení měření v reálném provozu a vyhodnocení výše uvedených metod lokalizace vozidel.

Výsledkem doktorské práce je soubor původních metod a algoritmů umožňujících detekci polohy vozidel. Tyto metody byly experimentálně ověřeny na souboru vstupních dat. Autor všechny cíle v předložené práci splnil.

#### **Zvolené metody zpracování**

Autor podřídil volbu metod zpracování výše uvedeným cílům doktorské práce. Zvolené metody odpovídají stanoveným cílům.

#### **Hodnocení nových poznatků**

Autor navrhl několik původních metod pro detekci charakteristických vlastností segmentů tratě. Tyto metody popsal příslušným matematickým aparátem a provedl rozbor jejich vlastností. Následně vytvořil pro tyto metody příslušné programové vybavení.

Autor dále navrhl, realizoval a podrobně popsal zařízení pro měření a sběr dat. Následně toto zařízení použil pro experimentální ověření navržených metod určení polohy pomocí INS v automobilu, ve vlaku a v tramvaji.

Přestože autor ve své disertační práci si nekladal za cíl vytvořit techniky pro bezpečnou lokalizaci vozidel, navržené metody mohou významně přispět ke zvýšení bezpečnosti dopravy, např. formou systému pro dispečerské řízení vozidel.

Kladně lze hodnotit zejména myšlenku využití relativně levných inerciálních senzorů MEMS, které jsou cestou k praktickému využití výsledků disertace v provozu.

### **Význam práce pro společenskou praxi**

Význam vývoje metod pro určení polohy vozidel na principu inerciální navigace a GNSS je obrovský – je to cesta jak ke zvýšení efektivity řízení dopravy, její spolehlivosti, tak i bezpečnosti. Výsledky této práce mohou být využity např. formou komplementárního subsystému ke stávajícímu tramvajovému tachografu / odometrickému subsystému, který již často obsahuje i senzor GNSS.

### **Hodnocení použitých vědeckých metod**

Návrh metod pro detekci vozidel pomocí charakteristických vlastností segmentů tratě je podpořen matematickým popisem a rozбором jejich vlastností. Použité vědecké metody odpovídají požadavkům dizertační práce.

### **Hodnocení způsobu zpracování doktorské práce a publikační činnosti**

Autor používá jasné formulace, práce je velmi přehledná a má velmi dobrou grafickou úroveň. Práce obsahuje všechny obvykle používané náležitosti (seznamy použitých zkratk a symbolů, seznamy použité literatury, obrázků, tabulek, atd.). Výsledky své práce dostatečně publikoval v odborné literatuře, z toho 3 x ve sbornících na konferencích zahraničí.

### **Připomínky k práci**

- **Strana 1** – Autor ve druhém odstavci uvádí, že >> ... bude nasazení GNSS systémů v rámci železniční dopravy pravděpodobně ještě dlouhou dobu diskutováno a vyvíjeno.<< Pro úplnost uvádím, že v západní Austrálii (oblast Pilbara) na železniční síti Roy Hill délky cca 340 km je již nainstalován v provozu systém ERTMS/ETCS s virtuální balízou, která je detekovaná pomocí GNSS. Zde se využívají traťové balízy spolu s balízami virtuálními. Dále, od roku 2012 se zkouší systém ERTMS/ETCS úrovně 2 s detekcí virtuální balízy na principu GNSS dle SIL 4 na Sardinii na trati Cagliari-San Gavino. A do třetice, na trati poblíž Turina (Pinerolo- Sangone) má být do r. 2020 do komerčního provozu uveden a certifikován systém ERTMS/ETCS úrovně 2 s detekcí virtuální balízy na principu GNSS v souladu se SIL 4. Nemluvě o četných bezpečnostních aplikacích GNSS v železniční dopravě v rámci PTC (Positive Train Control) v USA či jinde ve světě. V práci mohl být uveden podrobnější přehled nedávných a současných projektů podporovaných v Evropskou komisí, ESA, GSA, UNIFE, atd. orientovaných na určení polohy vlaku.

- **Strana 11** - Není zřejmé, na jakém základě prováděl autor výběr senzorů. V práci nejsou definovány požadavky (byť třeba jen odhadnuté) pro navrhovaný systém a dílčí senzory.
- **Strana 93** - Z práce není zřejmé, jak spolehlivě má navržený systém určit svoji polohu na trati.

### **Celkové hodnocení**

Navzdory výše uvedeným připomínkám Ing. Lukáš Pušman v předložené doktorské práci prokázal, že dokáže jasně formulovat cíle výzkumných úkolů, ovládá metody vědeckého bádání a je schopen úspěšného řešení úkolů vědy a výzkumu. Doporučuji postoupit doktorskou práci Ing. Lukáše Pušmana k obhajobě.

### **Otázky k obhajobě doktorské práce:**

1. Jaké jsou hlavní kvantitativní požadavky výkonnosti na systém určení polohy vozidel pomocí identifikace charakteristických segmentů tratě? Myšleno, aby byl použitelný v reálném provozu.
2. Vysvětlete, jak spolehlivě určí navržený systém s IMU svoji polohu na trati? Otázka se týká závěrů uvedených kapitole 7 na str. 93.
3. Jak velká je maximální dovolená chyba polohy vozidla, kterou by měl navržený systém poskytovat? Např. pro potřeby tramvajové dopravy.

V Pardubicích dne 18.10.2017

podpis:

