

Oponentský posudek disertační práce

Doktorand: Ing. Roman Adámek
Téma disertační práce: Simulation-based Path Planning for Autonomous Ground Vehicles in Off-Road Environment

Školitel: doc. Ing. Robert Grepl, Ph.D.
Školící pracoviště: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
FSI VUT v Brně

Oponent disertační práce: prof. Ing. Petr Noskiewiç, CSc.
Fakulta strojní, Katedra automatizační techniky a řízení
VŠB-Technická univerzita Ostrava

Oponentský posudek je zpracován na základě jmenování oponentem předsedou komise pro obhajobu prof. Ing. Jindřichem Petruškou, CSc., dopisem ze dne 26.7.2024.

Předložená disertační práce Ing. Romana Adámka je zpracována v celkovém rozsahu 134 stran textu a příloh. Práce je vhodně strukturovaná a přináší informace o řešeném tématu, současném stavu a poznání v tématu disertace, používaných metodách, jejich implementaci a ověření funkčnosti navrženého řešení simulačně a na reálném objektu srozumitelně a v logickém sledu. Disertační práce je vypracovaná v anglickém jazyce.

Aktuálnost tématu disertační práce, cíle práce

Disertační práce se věnuje problému plánování trajektorie pohybu robotického vozidla v terénu, a to z hlediska lokálního a globálního plánování s využitím fyzikálního modelu dynamiky vozidla a vícevrstvých map poskytujících parametry o reálném terénu. Cíle disertační práce jsou podrobně formulovány v samostatné kapitole 3, ve které jsou detailně popsány tři hlavní etapy řešení. Téma práce je vysoce aktuální, navazuje na již dosažené poznatky a definuje očekávaný přínos autora – implementaci fyzikálního modelu vozidla a jeho simulace a profil reálného terénu do plánovacích algoritmů. Třetí část cílů disertační práce zahrnuje implementaci navržených algoritmů, jejich ověření pomocí simulace a na reálném robotickém vozidle.

Formulaci cílů disertační práce předchází úvod a podrobně zpracovaná kapitola 2 v rozsahu 20 stran přinášející přehled o metodách a algoritmech globálního a lokálního plánování trajektorie pro autonomně se pohybující roboty. Jednotlivé metody jsou stručně charakterizovány a je provedeno vyhodnocení jejich předností a slabých míst, což dokladuje široký přehled autora o aktuálním stavu řešené problematiky. Na základě této podrobné analýzy současného stavu řešené problematiky jsou formulovány cíle práce.

Dosažení v disertaci stanovených cílů

Souhrnně lze konstatovat, že cíle disertační práce byly dosaženy. Jejich řešení a dosažené výsledky dokladují následující hlavní kapitoly disertační práce. Kapitola 4 popisuje sestavení a implementaci fyzikálního simulačního modelu vozidla do plánovacích algoritmů, kapitola 5 dokumentuje vývoj hybridního plánovače trajektorie založeného na použití fyzikálního

simulačního modelu robotického vozidla a vícevrstvých map. Kapitola 6 popisuje a dokumentuje provedené experimenty na reálném robotickém vozidle TAROS 6x6 Furbo. Je shrnuta tvorba konkrétního simulačního modelu pro daný typ a konkrétní konstrukční uspořádání robotického vozidla, stanovení parametrů jeho modelu, je doložena experimentální identifikace řízení vozidla pomocí vyhodnocení funkční závislosti mezi zadaným úhlem natočení kol a poloměrem zatáčení vozidla a další identifikace dynamických vlastností vozidla. Významnou část v této kapitole představuje popis konfigurace instalovaného autonomního navigačního systému a instalace potřebných senzorů. Prezentované výsledky použití navržených algoritmů plánování trajektorie robotického vozidla, a to jak pomocí simulace, tak i získané měřeními a vyhodnocením realizovaného pohybu robotického vozidla v terénu, dokladují funkčnost navržených algoritmů plánování trajektorie. Tyto skutečnosti dokladují, že cíle disertační práce byly splněny.

Konkrétní přínos doktoranda

Konkrétní přínos doktoranda k řešené problematice spatřuji v následujících výstupech:

- Podrobné zpracování přehledu o stavu řešené problematiky v kapitole 1 a kapitole 2 pečlivě doplněné o odkazy na používanou literaturu a odborné články.
- Použití vícevrstvých map reálného terénu a návrh, realizace a implementace algoritmů umožňujících získat z nich data potřebná pro specifikaci terénu a určení jeho parametrů pro definování podmínek pohybu robotického vozidla.
- Implementace simulačního modelu řízeného robotického vozidla do plánovacích algoritmů. Tato část je stěžejní a vychází ze znalosti různých typů modelů dynamiky vozidel a z posouzení vhodnosti jejich použití s ohledem na potřebu simulace v reálném čase.
- Formulace kritéria pro optimalizaci trajektorie a vyhodnocení její kvality, řešení optimalizační úlohy.
- Vytvoření simulátoru pohybu robotického vozidla a simulaci pohybu vozidla v terénu po navržené trajektorii, implementaci dynamického modelu vozidla do simulátoru.
- Implementace navrženého algoritmu plánování trajektorie a řízení robotického vozidla do reálného řídicího systému a ověření jeho funkčnosti.

Význam pro praxi nebo rozvoj vědního oboru

Výsledky předložené disertační práce mají velký význam pro praxi, což dokladuje i jejich implementace na reálné robotické vozidlo TAROS 6x6 Furbo. Navržený algoritmus plánování trajektorie a jeho funkční implementaci lze použít v různých aplikacích autonomních mobilních robotů, ať už se jedná o jejich využití ve výrobě, skladovém hospodářství, výrobcích spotřebního průmyslu, zemědělství, lesnictví nebo v rámci speciální techniky.

Získané poznatky mají přínos i pro rozvoj vědního oboru autonomního řízení. Provedená implementace ukazuje na určitá omezení v komplexnosti použitého dynamického modelu

vozidla z důvodu potřeby jeho rychlého řešení v průběhu simulace. Eliminace těchto omezení představuje další možné směry výzkumu v hledání rovnováhy mezi rozlišovací úrovní modelů a jejich efektivním řešením.

Formální úroveň práce

Disertační práce je vhodně strukturovaná do 7 hlavních kapitol včetně úvodu a závěru, za kterým následuje seznam citované literatury, seznam publikací autora. Výklad problematiky, metod řešení, realizovaných experimentů, shrnutí dosažených výsledků, přínosů a výhled do budoucna tvoří obsah jednotlivých kapitol, které následují v logickém sledu. Rozsah práce, úroveň věcného zpracování a grafická úprava odpovídá požadavkům na disertační práci. Práce je velmi dobře napsaná v anglickém jazyce

Připomínky k disertační práci

Z výkladu v kapitole 4.2 vyplývá, že je souvislost mezi obrázkem 4.7, který ukazuje trajektorii s v prostoru, zřejmě se souřadnicemi x, y, z a obr. 4.9 zobrazujícím vozidlo na nakloněné trajektorii s a příslušné síly a jejich rozklady na nakloněné rovině. Na obr. 4.9 je znázorněn souřadnicový systém xy a z jeho orientace by měla osa x splývat s úsekem trajektorie s . Vztahy (4.20), (4.26) a další naznačují ale, že souřadnicový systém xyz odpovídá spíše prostorovému zobrazení na obr. 4.7, kde není uveden, ale xy představuje rovinu, do které je zobrazen průmět trajektorie s , a osa z určuje výškové souřadnice používané v uvedených vztazích. Uvedení stejně označeného souřadnicového systému xy v obr. 4.9 je potom matoucí. Zřejmě popis obr. 4.9 vznikl odděleně a byl vložen do širšího kontextu výkladu, kde se již osy xyz objevují jinak zavedené. Souřadnicové systémy by měly být odlišeny a pohybová rovnice (4.13) by měla být psána pro souřadnici ve směru úseku trajektorie s .

Dotazy k obhajobě:

V rámci obhajoby disertační práce by bylo vhodné, aby doktorand zodpověděl následující dotazy:

- Z popisu tvorby modelu dynamiky vozidla vyplývá, že byl použit jednostopý model vozidla a zřejmě planární, kap. 4.2. Jak je vyhodnocována stabilita vozidla při pohybu, která je zmiňována v textu (myšleno, že se vozidlo nepřevrátí)? Uvažuje se přitom směr jízdy vozidla na nakloněné rovině, jak je tomu např. u experimentu zobrazeném na obr. 4.10?
- Použité experimentální vozidlo je šestikolové a bylo také simulováno pomocí jednostopého modelu. Při posuzování jeho průchodnosti terénem to představuje zjednodušení, která ovlivňují dosažené výsledky. Zhodnoťte, jaký vliv má použití jednostopého modelu na kvalitu výsledků a jejich věrohodnost s reálnou situací. Co by znamenalo implementování dvoustopého modelu vozidla do Vámi navržených algoritmů?
- Jak by se řešila úloha nalezení trajektorie pro skupinu vozidel, např. tři, pět vozidel na stejné místo?

Prokázání odpovídajících znalostí v daném oboru

Předloženou disertační práci prokázal Ing. Roman Adámek široký přehled a hluboké znalosti v oblasti plánování trajektorií a autonomního řízení robotických vozidel v terénu. Ovládá metody modelování a simulace robotických systému v terénu, metody analýzy a simulace dynamických vlastností vozidel, návrhu trajektorie jejich pohybu v reálném terénu, dovede navrhnout řídicí a senzorový systém pro autonomní řízení robotických vozidel a realizovat experiment umožňující měření a vyhodnocení veličin potřebných pro verifikaci odvozených algoritmů návrhů trajektorií. Dosažené výsledky při řešení tématu disertační práce publikoval v příspěvcích na mezinárodních konferencích a v odborných časopisech registrovaných v databázích Scopus a WOS. Souhrnně lze konstatovat, že Ing. Roman Adámek prokázal schopnost samostatné vědecké práce vedoucí k dosažení nových poznatků přispívajících k rozvoji oboru strojního inženýrství.

Na základě výše uvedeného doporučuji předloženou disertační práci k obhajobě a souhlasím s následným udělením titulu Ph.D. podle zákona č.111/1998 Sb. v aktuálním znění.

prof. Ing. Petr Noskovič, CSc.
Katedra automatizační techniky a řízení
Fakulta strojní
VŠB-Technická univerzita Ostrava

V Ostravě – Porubě 23.8.2024