



УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ • ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ

Булевар краља Александра 73 • 11000 Београд • Република Србија •

Тел. 011/324-8464 • Факс: 011/324-8681

Универзитет у Београду
Већу научних области техничких наука

З А Х Т Е В

за давање сагласности на реферат о урађеној докторској дисертацији

Молимо да, сходно чл.46 ст.5.тач.4 Статута Универзитета у Београду („Гласник Универзитета“ бр.131/06), дате сагласност на реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата

Мр РАДЕТА (СТАНИСЛАВ) СТАНЧИЋА

Кандидат Мр Раде Станчић предао је урађену докторску дисертацију под називом:

„Развој интегрисаног система инерцијалне и сателитске навигације“

Универзитетско веће научних области техничких наука је дана 17.11.2005.године дало сагласност на предлог теме докторске дисертације.

Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата мр Радета Станчића образована је на седници 29.6.2010./19.10.2010.године, одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета бр. 758/3, у саставу:

Име и презиме члана Комисије	Звање	Установа у којој је запослен
1. Др Стевица Граовац	доцент	Електротехнички факултет у Београду
2. Др Мирослав Дукић	редовни професор	Електротехнички факултет у Београду
3. Др Весна Живковић	научни сарадник	Институт „М.Пупин“, Београд
4. Др Жељко Ђуровић	редовни професор	Електротехнички факултет у Београду
5. Др Радивоје Биљић	доцент	Електротехнички факултет у Београду

Наставно-научно веће Факултета прихватило је извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације на седници одржаној дана 19.10.2010.године.

Прилози:

1. Извештај Комисије са предлогом
2. Одлуку Наставно-научног већа Факултета о усвајању извештаја

ДЕКАН
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф.др Миодраг Поповић



УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ ● ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ

Булевар краља Александра 73 ● 11000 Београд ● Република Србија ●

Тел. 011/324-8464 ● Факс: 011/324-8681

На основу чл.128 Закона о високом образовању и чл.66 и 68 и Статута Електротехничког факултета у Београду, Наставно-научно веће на седници од 19.10.2010.године, донело је

ОДЛУКУ

Усваја се Извештај комисије у саставу: др Стевица Граовац, доцент Електротехничког факултета, др Мирослав Дукић, редовни професор Електротехничког факултета, др Весна Живковић, научни сарадник Института „Михаило Пупин“ у Београду, др Жељко Ћуровић, редовни професор Електротехничког факултета, др Радивоје Биљић, доцент Електротехничког факултета, о прегледу и оцени урађене докторске дисертације под насловом: **„Развој интегрисаног система инерцијалне и сателитске навигације“** коју је предао **мр Раде Станчић**, и упућује се на сагласност Већу научних области техничких наука.

Комисија за усмену одбрану именована је у саставу: др Стевица Граовац, доцент Електротехничког факултета, др Мирослав Дукић, редовни професор Електротехничког факултета, др Весна Живковић, научни сарадник Института „Михаило Пупин“ у Београду, др Жељко Ћуровић, редовни професор Електротехничког факултета, др Радивоје Биљић, доцент Електротехничког факултета.

ДЕКАН

Електротехничког факултета

Проф.др Миодраг Поповић

**НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКОГ ФАКУЛТЕТА У БЕОГРАДУ**

Одлуком наставно-научног већа Електротехничког факултета у Београду, донетом на 719-ој седници 29. јуна 2010. г., одређени смо за чланове Комисије за преглед и оцену докторске дисертације мр. инж. **Радета Станчића** под насловом **„Развој интегрисаног система инерцијалне и сателитске навигације“**. Након прегледа дисертације, подносимо Већу следећи:

ИЗВЕШТАЈ

1. УВОД

1.1 Наслов и обим дисертације

Докторска дисертација је под насловом **„Развој интегрисаног система инерцијалне и сателитске навигације“** и изложена је на 237 страна са једноструким проредом.

1.2 Хронологија одобравања и израде дисертације

Тема докторске дисертације је одобрена на седници Наставно-научног већа Електротехничког факултета у Београду 25. октобра 2005. г., а Веће области техничких наука Универзитета у Београду је дало сагласност 17. новембра 2005. г.

Кандидат је урађену дисертацију поднео на преглед и оцену 25. јуна 2010. г., а Наставно-научно веће Електротехничког факултета је 29. јуна 2010. г. именovalo комисију за преглед и оцену.

1.3 Научна област дисертације

Дисертација припада областима Аутоматско управљања и Обрада сигнала за које је матичан Електротехнички факултет Универзитета у Београду.

1.4 Биографски подаци о кандидату

Раде Станчић је рођен 2. октобра 1964. г. у Шапцу. Завршио је Војну гимназију у Београду 1983. године. Ваздухопловно-техничку војну академију је завршио у Рајловцу 1986. г., а после четворогодишњег службовања уписао се на школовање у ВТВА II степен у Жаркову, које је завршио на смеру Ваздухопловна електроника и телекомуникације, 1993. године. Магистрирао је на Електротехничком факултету у Београду, на смеру Дигитални пренос информација, одбраном теме под насловом: **„Интеграција система инерцијалне навигације и глобалне оријентације са циљем повећања тачности и смањења осетљивости на сметње“**, 2002. године.

У току вишегодишњег инжењерског рада учествовао је на више испитивања у модернизацији ракетног система на коме је као официр радио. Више од десет година је радио као наставник на Војној академији, на катедрама Ракетних система и Ваздухопловне опреме. Тренутно ради на месту инжењера за калибражу земаљских радио-навигацијских система у Агенцији за контролу летења Србије.

Облашћу интегрисаних навигационих система се интензивно бави од 2000. г. До сада је објавио два рада у међународним часописима, два рада на међународним конференцијама и три рада на домаћим конференцијама. Повремено је хонорарно ангажован на извођењу вежби из предмета Системи за навигацију на Електротехничком факултету у Београду, а од 2009. г. је део радног тима на развоју прототипа интегрисаног система навигације за спектар примена на копненим возилима и летилицама, при Иновационом центру ЕТФ.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

Структура и садржај дисертације

Дисертација је организована у форми увода, шест централних поглавља и закључка, а осим тога рад садржи насловну страну, листу табела, листу слика, седам одељака у форми додатака, као и списак коришћене литературе. По форми и садржају задовољава стандарде за докторску дисертацију.

Кратак приказ поглавља дисертације

У уводу рада дат је исцрпан преглед области интегрисаних навигационих система са посебним освртом на проблематику интеграције инерцијалних и сателитских система, предности таквог прилаза, базичне концепте интеграције, улогу оптималне естимације стања као механизма интеграције, перформансе остварених система као и технолошка решења примењена у функционалном моделу развијеном у току овог истраживачког рада и у уређајима сличне намене присутним на тржишту.

У првом поглављу је дат опис коришћених координатних система и њихових међусобних трансформација.

У другом поглављу је описан рад система сателитске навигације (Глобалног система позиционирања – GPS) у обичном и диференцијалном режиму. Извршена је анализа грешака које утичу на тачност одређивања позиције и брзине корисника, приказана је хардверска и софтверска структура пријемника и опис комуникационог протокола.

У трећем поглављу се разматра алгоритма рада реализованог "strapdown" система инерцијалне навигације. Анализиран је општи модел грешака инерцијалних сензора и грешака целокупног инерцијалног система при одређивању навигационих параметара и угаоне оријентације. Посебно је објашњен начин пригушења грешака у вертикалном и хоризонталном каналу коришћењем информација које потичу изван инерцијалног система (ИНС).

У четвртом поглављу су описане поједине шеме интеграције INS/GPS и дат је опис рада Калмановог филтра са посебним освртом на његову примену у овом конкретном нелинеарном систему.

У петом поглављу је дат опис практичне реализације хардверске и софтверске структуре интегрисаног INS/GPS навигацијског система. Представљена је теоријска основа новоразвијеног алгоритма интеграције и приказан опис рада система у режимима иницијализације, почетног подешавања и навигације.

У шестом поглављу су приказани резултати експерименталних тестова вршених у лабораторији и на терену. Уз помоћ посебно развијеног симулационог софтвера вршене су обимне анализе коришћењем скупа података са инерцијалних сензора и из GPS пријемника прикупљених у возњи, уз симулације губитка пријемног сигнала. Тиме је предложени алгоритам финално подешен и верификован.

У закључку су сумирани резултати дисертације и дате смернице за даљи рад са посебним освртом на реализацију на бази MEMS инерцијалних сензора и уз примену ARM микроконтролера.

У додацима су дате листа дефиниција, симбола и константи, матрична и векторска нотација и коришћени идентитети, модел гравитационог убрзања, "Lever-arm" компензација, протокол за комуникацију са инерцијалном мерном јединицом, као и посебна разматрања и корисне апроксимације које се односе на рад у реалном времену.

На крају рада је дат списак коришћене литературе на које се реферише у раду.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

Савременост, оригиналност и значај

Рад је проистекао из вишегодишњег бављења аутора истраживањем и развојем у области инерцијалних и сателитских навигационих система и њихове интеграције, која је у светским размерама изузетно актуелна у последњој деценији и карактерише је обиље научних радова и техничких реализација, све присутнијих и на тржишту.

Оригиналност теме се пре свега огледа у развоју новог алгоритма за пригушење грешака ИНС на бази мерења која потичу из GPS, а своди се на раздвајање парова коефицијената пригушења на два скупа, од којих се један примењује унутар самог ИНС, а други у оквиру модела грешке у Калмановом филтру. Овим различитим третманом фактора пригушења грешака су омогућене боље перформансе интегрисаног система у интервалима одсуства GPS сигнала у односу на до сада позната решења.

Значај дисертације је вишеструк. Развојем и верификацијом функционалног модела система створена је основа за примену оваквих система, номинално на копненим возилима, али и на летилицама. Пратећи софтверски пакет који је развијен за конкретне потребе рада представља опште развојно окружење за системе ове класе и омогућује низ практично корисних метода комбиновања симулације и живог рада система. Дефинисане су и спроведене све неопходне процедуре лабораторијске и теренске иницијализације и калибрације компонената и система у целини, што је

такође од значаја за будућа истраживања и развој. Коначно, у теоријском смислу, осмишљене је и у пракси верификован нови интеграциони алгоритам као надградња постојећих и са резултатима који нуде перспективу повишења перформанси интегрисаног система.

Осврт на референтну и коришћену литературу

Аутор је у раду претражио, а у дисертацији се коректно реферисао на бројну литературу (научне радове, уџбенике, монографије), како на енглеском, тако и на руском говорном подручју.

Анализа примењених научних метода и њихова адекватност за спроведено истраживање

Методологија примењена у овом истраживачком раду се може дефинисати као следећи низ активности:

- анализа постојећих решења у домену интеграције ИНС и GPS и сагледавање њихових предности и мана;
- одабир основне хардверске конфигурације система, поставке динамичког модела грешака у систему и концепције интеграционог алгоритма;
- реализација функционалног модела, развој пратећег софтвера за симулацију и анализу система и имплементацију интеграционог алгоритма;
- тестирање система у лабораторијским и теренским условима;
- на основу остварених резултата, предлог иновација интеграционог алгоритма, њихова имплементација и верификација.

Овај след корак је у био у потпуности адекватан за решење постављеног проблема. У резултату се дошло не само до конкретних реализација и решења, већ и до методолошке поставке у алгоритамском, хардверском и процедуралном смислу која има шири значај за истраживање и пројектовање интегрисаних навигационих система.

Оцена способности кандидата за самостални научни рад

Аутор је испољио изванредно познавање области, изузетну систематичност у аналитичком приступу у дефинисању система и процедура у његовом развоју, као и редак спој способности за поставку и софтверску имплементацију сложених алгоритама симулације ИНС и оптималне естимације грешака с једне, и хардверску реализацију функционалног модела система и практично тестирање у лабораторији и на терену, с друге стране.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

Приказ остварених научних доприноса

Интеграција ИНС са GPS превасходно добија на значају у случају спорадичних губитака сигнала GPS пријемника као основног извора навигационе информације и потребе да се до коректних вредности навигационих параметара у том интервалу дође на основу прорачуна ИНС базираног на инерцијалним компонентама релативно ниске тачности. Док чврста спрега ова два подсистема подразумева јединствен третман грешака у оба, слободу приступа информацијама о псеудорастојањима од пријемника до сателита и, генерално, води ка затвореним решењима специјално развијеним за дати скуп инерцијалних сензора и дати GPS пријемник, аутор се у свом раду определио за слабу, каскадну спрегу у којој су оба подсистема независна, а процена грешака ИНС се добија механизмом проширеног Калмановог филтра чија мерења чине разлике навигационих параметара срачунатих помоћу ИНС и GPS. На овај начин се обезбеђује да се ИНС реиницијализује након сваког мерења присутног у GPS, а да у интервалу одсуства GPS сигнала, настави рад у режиму предикције грешака. Наредна модификација која је типична за случај инерцијалних сензора ниске тачности се састоји у додатном пригушењу грешака ИНС на бази неке спољашње информације (у овом случају из GPS). Калманов филтар за процену грешака ИНС тада укључује и тзв. командне сигнале, а повратни сигнали у ИНС прорачуну имају ефекат да се уместо непригушених Schuler-ових осцилација грешака навигационих параметара, велике амплитуде, тада може постићи да се ове осцилације пригуше и знатно ограниче по амплитуди. Неповољна страна овог приступа је да се

великим повратним појачањем сигнала грешака проблем премешта на утицај високофреквентних компонената грешака инерцијалних сензора. Компромиси који произилазе из ове чињенице чине да само у краткотрајном одсуству GPS сигнала, ИНС на бази сензора ниске тачности може да пружи задовољавајуће резултате.

У том контексту, аутор се определио за следећи приступ:

- поставити модел грешака ИНС високог (петнаестог реда) који ће укључити шест основних навигационих параметара, три угла оријентације објекта у простору и по три грешке типа bias-а за брзинске жирокопе и линеарне акцелерометре (што је генерално атипично за примене на објектима који се крећу по копну);
- како се порастом реда модела (и Калмановог филтра за процену грешака ИНС) усложњава проблем иницијализације, максимално прецизирати и спровести процедуре иницијалног тестирања и подешавања (компонената у лабораторији и система на терену);
- пригушење грешака ИНС максимално активирати само у интервалима одсуства GPS сигнала, с тим да се формално раздвоје парови појачања који се повратно примењују у ИНС и унутар Калмановог филтра у режиму предикције;
- факторе појачања сигнала грешака додатно учинити зависним од актуелних линеарних убрзања које објекат трпи у интервалу одсуства GPS сигнала.

Критичка анализа резултата истраживања

Аутор је у дисертацији спровео све претходно поменуте кораке. Поставка линеаризованог модела грешке ИНС је доследно спроведена. Имплементација Калмановог филтра 15-ог реда је успешно обављена, при чему је решен низ практичних проблема као што су елиминација мерења која излазе ван опсега очекиваних, проблем иницијализације матрице коваријансе грешке стања и параметризације шума модела. У оквиру лабораторијских тестирања, аутор је развио оригиналну методологију идентификације модела високофреквентних компонената грешака инерцијалних сензора. Када су основни резултати тестирања функционалног модела у возњи показали слагање са перформансама система публикованим у литератури, приступило се поменутим модификацијама алгоритма које су резутовале у поправци тачности система у интервалима губитка GPS сигнала што је и био основни циљ рада.

Рад је обухватио анализу постојећих прилаза у области, поставку динамичког модела грешака у систему, имплементацију оптималног естиматора грешака, израду и тестирање функционалног модела, као и оригиналну модификацију интеграционог алгоритма, што је у целини резутовало успешно реализованим концептом интеграције ИНС и GPS.

Очекивана примена резултата у пракси

Функционални модел који је развијен и тестиран у склопу рада на дисертацији представља непосредну основу за прототип оваквог система на коме се ради. С обзиром на коришћени ред модела грешке евидентно је да се овај концепт интеграције може применити и на летилицама.

Верификација научних доприноса

Будући да је прилаз у интеграцији ИНС ниске тачности и GPS који укључује пригушење сигнала грешака оригинално разматран у радовима руских аутора, примарном потврдом научног доприноса дисертације може се сматрати рад:

Р.Станчић, С. Граовац: "Интегрирование бесплатформенной инерциальной навигационной системы низкой точности и GPS, концепция и результаты", Гироскопия и навигация, No 2 (61), 2008., pp. 16 – 27.

објављен у референтном руском часопису за област навигације, а такође и рад:

R. Stančić, S. Graovac: The integration of strap-down INS and GPS based on adaptive error damping", Robotics and Autonomous Systems, Volume 58, Issue 10, October 2010, pp. 1117-1129. ISSN 0921-8890

објављен у часопису са impact фактором 1.361, рангираним као 7/16 у области роботике и 23/59 у области аутоматике и система управљања.

Софтверска подршка за развој интегрисаног система је презентирана на водећој светској конференцији специјализованој за интеграцију навигационих система:

Stančić, R., S. Graovac: "Software Support for a Development of an Integrated INS/GPS System", 12-th International Conference on Integrated Navigation Systems, Saint Petersburg, May 2005.

Део резултата истраживања је презентирао и у раду на међународној конференцији:
R. Stančić, S. Graovac: "One Approach To The Integration Of Low Cost Strap-Down Inertial Navigation System And GPS", 6th IFAC Intl. Conference WS DECOM-TT 2009, September, 2009, Ohrid, Macedonia

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

У својој дисертацији, кандидат мр. инж. Раде Станчић је реализовао навигациони систем на бази интеграције инерцијалне и сателитске навигације, експериментално верификовао резултате рада и при томе предложио унапређење постојећих интеграционих алгоритама које је потврдио коришћењем података прикупљених у вожњи на терену. Кандидат је у реализацији докторске дисертације испољио врхунску зрелост за самосталан научни рад. Резултати истраживачког рада аутора су верификовани публикавањем радова у водећим научним часописима и на међународним и домаћим конференцијама.

Имајући све ово у виду, Комисија сматра да рад кандидата под насловом **„Развој интегрисаног система инерцијалне и сателитске навигације“** испуњава све формалне и суштинске услове да буде прихваћен као докторска дисертација и предлаже да се кандидату одобри јавна усмена одбрана.

Београд, 27. септембар 2010. г.

Комисија:

Др Стевица Граовац, доцент ЕТФ

Др Мирослав Дукић, професор ЕТФ

Др Весна Живковић, научни сарадник ИМП

Др Жељко Ђуровић, професор ЕТФ

Др Радивоје Биљић, доцент ЕТФ