

ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

I ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ
1. Датум и орган који је именовао комисију 22.12.2020. Наставно-научно веће Природно-математичког факултета Универзитета у Новом Саду
2. Састав комисије са назнаком имена и презимена сваког члана, звања, назива уже научне области за коју је изабран у звање, датума избора у звање и назив факултета, установе у којој је члан комисије запослен: - др Мирјана Ивановић, редовни професор, рачунарске науке и информатика, 29.04.2002, Природно-математички факултет, Универзитет у Новом Саду – председник - др Милош Радовановић, ванредни професор, рачунарске науке, 12.12.2016, Природно-математички факултет, Универзитет у Новом Саду – ментор - др Владимир Курбалија, ванредни професор, рачунарске науке, 1.2.2020, Природно-математички факултет, Универзитет у Новом Саду – члан - др Милош Савић, ванредни професор, рачунарске науке, 17.11.2020, Природно-математички факултет, Универзитет у Новом Саду – члан - др Драган Бошковић, професор истраживач (енг. Research Professor), инжењерство информационих система, 01.09.2016, Државни Универзитет у Аризони - члан
II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ
1. Име, име једног родитеља, презиме: Саша Александар Пешић
2. Датум рођења, општина, држава: 11.12.1992., Нови Сад, Србија
3. Назив факултета, назив студијског програма дипломских академских студија – мастер и стечени стручни назив: Природно-математички факултет Универзитета у Новом Саду, Дипломирани информатичар – мастер
4. Година уписа на докторске студије и назив студијског програма докторских студија: 2016, Докторске академске студије – Информатика
5. Назив факултета, назив магистарске дисертације, научна област и датум одбране: -
6. Научна област из које је стечено академско звање магистра наука: -

III НАСЛОВ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Наслов на енглеском језику:

An advanced resource management and indoor positioning edge computing architecture

Наслов на српском језику:

Напредна (edge computing) софтверска архитектура за управљање ресурсима и унутрашње позиционирање

IV ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Докторска дисертација има 197 страна, 7 поглавља организованих у два дела, 6 табела, 55 слика и 219 библиографских референци. Дисертација је структурирана на следећи начин:

- Part I: Edge Computing: Security and Resource Management (Део I: Парадигма рачунања на ивици мреже: управљање безбедношћу и ресурсима система)
 - Chapter 1: Internet of Things and Edge Computing (Поглавље 1: Интернет ствари и парадигма рачунања на ивици мреже)
 - Chapter 2: Security and Privacy Concerns (Поглавље 2: Проблеми безбедности и приватности)
 - Chapter 3: An MQTT-based Resource Management Framework (Поглавље 3: Софтверски оквир за управљање ресурсима базиран на MQTT протоколу)
- Part II: BLEMAT: Bluetooth Low-Energy Microlocation Asset Tracking Edge Computing Software Architecture (Део II: BLEMAT: Систем за откривање и праћење позиција у унутрашњем простору)
 - Chapter 4: Indoor Positioning: Introduction (Поглавље 4: Унутрашње позиционирање: увод)
 - Chapter 5: BLEMAT: Preliminaries (Поглавље 5: BLEMAT: увод)
 - Chapter 6: Software Engines Implementation Details (Поглавље 5: Детаљи имплементације софтверских оквира)
 - Chapter 7: Conclusion and Future Work (Поглавље 7: Закључци и будућа истраживања)

Део I дисертације има за циљ да објасни IoT (*Internet of Things*) и *edge computing* (рачунање на ивици мреже) рачунарске системе и њихове одговарајуће архитектуре. Поглавље 1 усредсређено је на IoT и *edge computing* рачунарске системе. Њихове дефиниције дате су у Секцији 1.1, на бази актуелних истраживања. У Секцији 1.2 продискутовани су типични IoT и *edge computing* типови дизајна архитектура, њихове компоненте, а наведено је и пет фаза у дизајну IoT и *edge computing* архитектура. Секција 1.3 даје приказ перспективних приступа, проблема и утицаја IoT и *edge computing* архитектура у областима индустрије (Подсекција 1.3.1) и глобалне економије (Подсекција 1.3.2). Наведена су могућа подручја примене и уобичајени случајеви коришћења, као и оперативни, пословни, економски и друштвени изазови и могућности.

Поглавље 2, је посвећено темама безбедности и приватности IoT и *edge computing* рачунарских система. Секције 2.1 и 2.2 дају теоријски увод у ову тему. Секција 2.3 приказује слична истраживања која се фокусирају на различите прегледе и категоризације безбедности у IoT и *edge computing* рачунарским системима. У Секцији 2.4 представљан је један нови, методолошки оквир за преглед безбедности архитектура IoT и *edge computing* система. Представљени оквир, CAAVI-RICS, оригиналан је методолошки допринос ове дисертације.

Поглавље 3 састоји се од истраживања, дизајна и примене оквира за управљање ресурсима (у тези назван RMF) које је заснован на MQTT комуникационом протоколу. Секције 3.1 и 3.2 дају увод у управљање ресурсима као и преглед истраживања која су спроведена о овој теми. Сви детаљи RMF софтверске архитектуре и њене компоненте детаљно су описани у Секцији 3.3. Секције 3.4 и 3.5 детаљно представљају радне процесе унутар RMF-а и напредне способности RMF-а када је у питању број сценарија који могу бити обрађени. Секција 3.6 приказује експерименте, резултате, и садржи дискусију о предностима и манама RMF-а, као и о наредним корацима у истраживању и имплементацији.

Део II дисертације фокусиран је на BLEMAT, софистицирани и високо функционални Блутут систем за унутрашње позиционирање, развијен као оригиналан допринос ове дисертације.

Поглавље 4 приказује основне концепте система за унутрашње позиционирање: њихове дефиниције, врсте примене, уобичајено коришћене технике позиционирања и уобичајене случајеве коришћења. Осим тога представљени су и оперативни, пословни, економски и друштвени изазови које овакви системи доносе. Секција 4.1 даје уобичајене дефиниције система за унутрашње позиционирање. Секција 4.2 пружа преглед најчешће коришћених техника позиционирања у затвореном простору и анализира потребне хардверске и софтверске компоненте. Секција 4.3 представља типичне опције физичког распореда (енг. *deployment*) за такве системе позиционирања и објашњава предности и недостатке за сваки од њих. Секција 4.4 дискутује специфичне захтеве дизајна и изазове за примену система унутрашњег позиционирања у *edge computing* рачунарским окружењима. Секција 4.5 расправља о повезаним истраживачким недостацима у техникама позиционирања, филтрирању података о позицијама и могућностима физичког распореда за овакве системе.

Поглавље 5 је усмерено на описивање компонената архитектуре и оперативних токова рада унутар VLEMAT-а. Секција 5.1 представља функционалну архитектуру високог нивоа са дијаграмом компоненти VLEMAT система. Секција 5.2 је посвећена радним токовима/процесима у оквиру VLEMAT-а који функционишу на *edge computing* слоју (на ивици мреже), на IoT контролерима. Секција 5.3, представља физичке контексте (зграде) у којима VLEMAT активно ради.

Поглавље 6 обрађује све подсистеме имплементирание у VLEMAT-у. Приказују се кључне компоненте, адекватна актуелна истраживања, истичу оригинални доприноси ове дисертације, детаљи имплементације, резултати и дискусија о њима. Секција 6.1 представља процесе унутар VLEMAT-а задужене за моделирање и анализу образаца кретања посматраних објеката или људи. Секција 6.2 представља дизајн и примену подсистема за предвиђање заузетости просторија. Секција 6.3 уводи подсистем назван GEMAT за креирање виртуелних граница. Секција 6.4 представља подсистем за откривање изгледа плана, тј. архитектуру посматраног унутрашњег простора. Детаљан приказ VLEMAT-ових функционалности које омогућавају генерисање графова социјалне интеракције корисника унутрашњег простора приказан је у Секцији 6.5.

Поглавље 7 доноси закључке изведене из истраживања на овој дисертацији као и предлоге могућих будућих истраживања.

V ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Дисертација у целини, као и њени поједини делови имају добро систематизовану структуру и план излагања. Дисертација има два истраживачка задатка, стога је подељена на два дела: Део I и Део II.

Део I укључује поглавља 1-3 и представља истраживање, проблем и предложено решење за први истраживачки задатак: успостављање софтверског оквира за самостално управљање логичким ресурсима дистрибуираних IoT система, базираног на MQTT комуникационом протоколу. Поглавље 1 представља уводни део који је добро организован и садржи детаљан преглед свих појмова и дефиниција неопходних за разумевање материје приказане у овом Делу. Поглавље 2 даје безбедносни контекст у каквом фигуришу овакви системи, истовремено приказујући модел за посматрање безбедности система CAAVI-RICS. На крају, поглавље 3 описује имплементацију поменутог софтверског оквира на јасан и довољно детаљан начин, уз сумиране резултате приказане у табеларном и графичком формату.

Део II укључује поглавља 4-6 и представља истраживање, проблем и предложено решење за други истраживачки задатак: успостављање напредног софтверског оквира за унутрашње позиционирање под називом VLEMAT. Проблематика истраживања је јасно формулисана и мотивисана у поглављу 4, док су резултати изложени прецизно и систематично у поглављима 5 и 6. Како се VLEMAT састоји од 8 комплексних подсистема, у поглављу 6 је сваки од подсистема детаљно описан, а резултати су илустровани на прикладан начин.

Можемо закључити да је кандидат добро систематизовао постојеће радове у овој истраживачкој области, док је својим резултатима дао оригиналан допринос у области рачунарских наука. Тиме је он у потпуности реализовао постављене циљеве дисертације.

Према правилима Универзитета, текст дисертације тестиран је на плагијаризам коришћењем софтвера iThenticate. Софтвер је пријавио укупан индекс сличности од 51%. Од тога, бар 48% преклапања текста је везано за радове самог кандидата. Издвајамо највеће преклапање са три рада од 14%, 10% и 9%:

Saša Pešić, Milenko Tošić, Ognjen Iković, Miloš Radovanović, Mirjana Ivanović, Dragan Bošković. "BLEMAT: Data Analytics and Machine Learning for Smart Building Occupancy Detection and Prediction", International Journal on Artificial Intelligence Tools, 2019 – 14%

Sasa Pesic, Milos Radovanovic, Mirjana Ivanovic. "An MQTT-based Resource Management Framework for Edge Computing Systems", 2020 International Conference on INnovations in Intelligent SysTems and Applications (INISTA), 2020 – 10%

Saša Pešić, Miloš Radovanović, Mirjana Ivanović, Milenko Tošić, Ognjen Iković, Dragan Bošković. "Graph-based Metadata modeling in Indoor Positioning Systems", Simulation Modelling Practice and Theory, 2020 – 9%

што је очекивано, будући да су то радови у којима су делимично приказани резултати дисертације и у којима је кандидат први аутор. Остатак преклапања од мање од 3% односи се на опште појмове и често коришћене фразе.

VI СПИСАК НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КОЈИ СУ ОБЈАВЉЕНИ ИЛИ ПРИХВАЋЕНИ ЗА ОБЈАВЉИВАЊЕ НА ОСНОВУ РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА У ОКВИРУ РАДА НА ДОКТОРСКОЈ ДИСЕРТАЦИЈИ

Категорија M21

Pešić Saša, Ivanović Mirjana, Radovanović Miloš, Costin Bădică. CAAVI-RICS Model for Observing the Security of Distributed IoT and Edge Computing Systems. Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 105, 102125. Elsevier. 2020.

Pešić Saša, Radovanović Miloš, Ivanović Mirjana, Tošić Milenko, Iković Ognjen, Bošković Dragan. Graph-based metadata modeling in indoor positioning systems. Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 105, 102140. Elsevier. 2020.

Категорија M23

Pešić Saša, Radovanović Miloš, Ivanović Mirjana, Tošić Milenko, Iković Ognjen, Bošković Dragan. BLEMAT: Data Analytics and Machine Learning for Smart Building Occupancy Detection and Prediction. International Journal on Artificial Intelligence Tools, Vol. 28, No. 06, 1960005. World Scientific. 2019.

Категорија M33

Pešić Saša, Radovanović Miloš, Ivanović Mirjana, Tošić Milenko, Iković Ognjen, Bošković Dragan. Context aware resource and service provisioning management in fog computing systems. In International Symposium on Intelligent and Distributed Computing, Belgrade, Serbia, 11-13 October, 2017. Springer, Cham. pp 213-223

Pešić Saša, Radovanović Miloš, Ivanović Mirjana, Tošić Milenko, Iković Ognjen, Bošković Dragan. Bluetooth low energy microlocation asset tracking (BLEMAT) in a context-aware fog computing system. In Proceedings of the 8th International Conference on Web Intelligence, Mining and Semantics, Novi Sad, Serbia, 25-27 June, 2018. ACM. pp 1-11.

Pešić Saša, Radovanović Miloš, Ivanović Mirjana, Tošić Milenko, Iković Ognjen, Bošković Dragan. GEMAT-Internet of Things Solution for Indoor Security Geofencing. In Proceedings of the 9th Balkan Conference on Informatics, Sofia, Bulgaria, 26-28 September, 2019. ACM. Article 12, pp 1-8.

Pešić Saša, Radovanović Miloš, Ivanović Mirjana, Tošić Milenko, Iković Ognjen, Bošković Dragan. Conceptualizing a collaboration framework between Blockchain technology and the Internet of Things. In Proceedings of the 20th International Conference on Computer Systems and Technologies, Ruse, Bulgaria, 19-20 June, 2019. ACM. pp 56-61.

Pešić Saša, Radovanović Miloš, Ivanović Mirjana, Tošić Milenko, Iković Ognjen, Bošković Dragan. Hyperledger Fabric Blockchain as a Service for the IoT: Proof of Concept. In International Conference on Model and Data Engineering, Toulouse, France, 28-31 October, 2019. Springer, Cham. pp 172-183.

Pešić Saša, Radovanović Miloš, Ivanović Mirjana, Tošić Milenko, Iković Ognjen, Bošković Dragan, Badica Costin. CAAVI-RICS Model for Analyzing the Security of Fog Computing Systems. In Proceedings of the International Symposium on Intelligent and Distributed Computing, Saint-Petersburg, Russia, 7-10 October, 2019. Springer, Cham. pp 23-34.

Pešić Saša, Radovanović Miloš, Ivanović Mirjana, Tošić Milenko, Iković Ognjen, Bošković Dragan, Badica Costin. CAAVI-RICS Model for Analyzing the Security of Fog Computing Systems: Authentication. In Proceedings of the 20th International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies, Gold Coast, Australia, 5-7 December, 2019. IEEE. pp 226-231.

Pešić Saša, Radovanović Miloš, Ivanović Mirjana. An MQTT-based Resource Management Framework for Edge Computing Systems. In Proceedings of the International Conference on INnovations in Intelligent SysTems and Applications (INISTA), Novi Sad, Serbia, 24-26 Aug. 2020. IEEE. pp 1-7.

VII ZAKЉUČCI OДНОСНО РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

Научни резултати дисертације се могу сагледати у оквирима два правца истраживања датим у деловима I и II дисертације.

Део I имао је за циљ да расветли IoT и *edge computing* рачунарске системе и пратеће рачунарске парадигме софтверских архитектура, њихову дефиницију, подручја примене и случајеве уобичајене употребе, као и оперативне, пословне, економске, и друштвене изазове и користи. Као **први истраживачки резултат** у оквиру овог дела дисертације, предложен је један нови, методолошки оквир за преглед безбедности IoT и *edge computing* архитектура система: CAAVI-RICS. Помоћу CAAVI-RICS методологије омогућено је истраживање 5 аспеката сигурности IoT и *edge computing* рачунарских система (кредибилитет, аутентификацију, ауторизацију, верификацију и интегритет). Методологија их објашњава, разматра њихов утицај, уочава главне проблеме које могу да изазову ако су неправилно дизајнирани и сагледава савремена безбедносна решења која их потпомажу.

Као **други истраживачки резултат** дела I дисертације, дизајниран је и имплементиран оквир за управљање ресурсима (у тези назван RMF). RMF је дизајниран за *edge computing* архитектуре и у стању је да руководи следећим аспектима: управљањем ресурсима, детекцијом кварова и администрацијом примопредаје процеса, логичким и физичким балансирањем оптерећења и праћењем стања физичких и логичких ресурса система. RMF је моделован по узору на тзв. *soft sensors* принцип дизајна, који тежи јаком хијерархијском раздвајању функционалности од најједноставнијих до најкомплекснијих, тако стварајући модуларније архитектуре које су отпорније на веће логичке кварове.

Део II фокусиран је на BLEMAT, софистицирани и високо функционални Блутут систем за унутрашње позиционирање, развијен као оригиналан допринос ове дисертације. **Први**

истраживачки резултат у оквиру овог дела дисертације односи се на дефинисање VLEMAT софтверске архитектуре. VLEMAT је *edge computing* рачунарски систем који у реалном времену врши унутрашње позиционирање.

Други истраживачки резултат (део II) представља имплементацију и тестирање VLEMAT-овог *context learning* подсистема у једној стамбеној згради. Овај подсистем подржава моделирање и анализу образаца кретања за посматране Блутут уређаје (и њихове власнике, тј. станаре). Показује се како се може доћи до постојећих образаца кретања, као и како се они могу тумачити за добробит система за управљање паметном зградом и њених станара.

Трећи истраживачки резултат (део II) представља дизајн и примену подсистема VLEMAT-а са новим приступима за предвиђање заузетости просторија. У оквиру дисертације представљен је модел за предвиђање дугорочне бинарне заузетости станова (заузет или није заузет) недељу дана унапред. Као важан резултат приказују се процеси за аутономно откривање шема заузетости унутрашњег простора по жељеном подручју грануларности (зграда, спрат или стан).

Четврти истраживачки резултат (део II) је дизајн подсистема који носи назив GEMAT. Овај подсистем пружа подршку за креирање виртуелних граница у унутрашњем простору. Приказује се успешно обрађивање софистицираних сценарија код виртуелних граница (темпоралне границе и везе између граница), што је ретка карактеристика оваквих система.

Пети истраживачки резултат (део II) представља подсистем VLEMAT-а за откривање распореда просторија унутрашњег простора тј. откривање информација о физичким препрекама у посматраном простору. Ова функционалност погодна је за просторе без наменског физичког распореда (нпр. складишта). У дисертацији представља се решење за апроксимирање основе простора (тј. распореда препрека) засновано на прикупљању података о позиционирању (локације људи, машина, итд.).

Шести истраживачки резултат (део II) надовезује се на други и нуди екстракцију и апроксимацију информација о друштвеним односима између станара посматране стамбене зграде. Овде су резултати двојаки. Са једне стране, анализира се и приказује конзистентност, тј. континуитет посматраних друштвених односа. Са друге стране, ради се на детекцији постојећих друштвених заједница (скупови станара који су чврсто повезани) и њиховој еволуцији. Уједно, предлаже се и алгоритам за праћење еволуције друштвених заједница.

VIII ОЦЕНА НАЧИНА ПРИКАЗА И ТУМАЧЕЊА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА

Приказ свих резултата истраживања је добро организован по логичким целинама, а формулација резултата је прецизна и добро илустрована примерима. Тумачење добијених резултата је коректно изведено, уз њихову детаљну анализу.

IX КОНАЧНА ОЦЕНА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

1. Да ли је дисертација написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме

Дисертација је у потпуности написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме.

2. Да ли дисертација садржи све битне елементе

Дисертација садржи све битне елементе. Дат је опширан увод у концепте и теорију који служе као полазна основа за резултате добијене у каснијим поглављима. Изложени су сви битни познати резултати на које се дисертација ослања. Обиман списак библиографских референци садржи релевантне радове и сведочи о добром познавању области. Дисертација је прегледна и добро организована.

3. По чему је дисертација оригиналан допринос науци

Први оригинални научни допринос у оквиру I дела дисертације је увођење нове методологије за преглед сигурносних аспеката рачунарских система, са посебним фокусом на високо дистрибуиране системе (IoT и *edge computing*), коју аутор назива CAAVI-RICS методологија.

Као **други оригинални научни допринос** у оквиру дела I, дисертација је обухватила дизајн и имплементацију софтверске архитектуре за управљање ресурсима *edge computing* система. Доприноси који разликују ову софтверску архитектуру од сличних истраживања су двојаки. Као прво, предлаже се софтверски оквир специфично дизајниран за IoT системе (незахтевни трошкови функционисања система). Као друго, развијају се стратегије не само за опорављање од застоја већ и за ефикасно поновно дистрибуирање управљачких алгоритама.

Оригинални доприноси другог дела дисертације обухватају имплементацију и експериментисање у оквиру BLEMAT подсистема. За разлику од већине сличних система BLEMAT нуди широк дијапазон сервиса поред унутрашњег позиционирања што је ретка карактеристика оваквих система. Овде се јасно издваја 5 оригиналних доприноса:

1. Креирање алгоритама, дизајн токова података, имплементација и валидација софтверског система за 3Д позиционирање, уз напредне функционалности за филтрирање позиција и сигнала (узимајући у обзир физички контекст унутрашњег простора).
2. Увођење нових приступа при моделирању унутрашњих простора и контекстуалних метаподатака за системе за унутрашње позиционирање кроз мапирање концепата физичког простора на математичке моделе (матрице и графове) који омогућавају квантификацију физичког контекста.
3. Креирање алгоритама и токова података за одређивање присутности објеката у унутрашњем простору користећи само локалну мрежну инфраструктуру уз моделе и алгоритме за динамичко, аутоматизовано откривање шема понашања и кретања објеката/људи у затвореним просторима.
4. Увођење нових примена алгоритама за машинско учење и то за дугорочно предвиђање заузетости унутрашњих просторија.
5. Развој софтверске архитектуре за динамичко креирање виртуелних граница уз подршку за креирање релација између виртуелних граница у унутрашњем простору и темпоралних виртуелних граница.

4. Недостаци дисертације и њихов утицај на резултат истраживања

Дисертација нема недостатака.

X ПРЕДЛОГ:

На основу укупне позитивне оцене дисертације, комисија предлаже да се докторска дисертација под називом “Напредна (edge computing) софтверска архитектура за управљање ресурсима и унутрашње позиционирање”, тј. на енглеском језику “An advanced resource management and indoor positioning edge computing architecture” кандидата Саше Пешића прихвати, а кандидату одобри јавна одбрана дисертације.

ПОТПИСИ ЧЛАНОВА КОМИСИЈЕ

Проф. др Мирјана Ивановић, редовни професор, председник

др Милош Радовановић, ванредни професор, ментор

др Владимир Курбалија, ванредни професор, члан

др Милош Савић, ванредни професор, члан

др Драган Бошковић, професор истраживач, члан