

РЕЦЕНЗИЈА

НА ДОКТОРСКАТА ДИСЕРТАЦИЈА СО НАСЛОВ „ТЕОРЕТСКИ И ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИСТРАЖУВАЊА НА ТОЧНОСТА НА РОБОТИТЕ ВО ИНДУСТРИЈАТА ЗА ПРОИЗВОДСТВО НА ПРОИЗВОДИ ОД КОМПОЗИТНИ МАТЕРИЈАЛИ“ ИЗРАБОТЕНА ОД М-Р САМОИЛ САМАК, ПРИЈАВЕНА НА ТЕХНОЛОШКО-ТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ, УНИВЕРЗИТЕТ „ГОЦЕ ДЕЛЧЕВ“ ВО ШТИП

Со Одлука број 0206-509/5 од 14.10.2020 година донесена на 34. седница, одржана на 14.10.2020 год., на Наставно-научниот совет на докторски студии на Кампус 2 (биотехнички, техничко-технолошки и природно-математички науки) при Универзитет „Гоце Делчев“ во Штип, формирана е Комисија за оценка и одбрана на докторската дисертација со наслов „Теоретски и експериментални истражувања на точноста на роботите применети во индустријата за производство на производи од композитни материјали“, во состав:

- проф. д-р **Винета Сребренкоска** – претседател,
- проф. д-р **Владимир Дуковски** – член, интерен ментор,
- проф. д-р **Зоран Ивановски** – член, екстерен ментор,
- проф. д-р **Сашо Коцески** – член и
- проф. д-р **Светлана Ристеска** – член.

Комисијата во наведениот состав, по прегледувањето на докторската дисертацијата, го поднесува следниов

ИЗВЕШТАЈ

Анализа на трудот

Докторската дисертација е презентирана на 155 страници и ги содржи следниве делови: Содржина, Краток извадок, Проблематика на истражувањето, Моделирање – математички модели, Експериментални истражувања, Анализа на резултатите од експерименталните истражувања, Алгоритми за компензација. Верификација на резултатите, Заклучок, Референци. На крајот е дадена листа на табели - вкупно 33 и листа на слики – вкупно 63.

Во *Проблематика на истражувањето* се презентирани композитните материјали и технологии, автоматизација во индустрија на композитни материјали, точноста на роботите, со приказ на релевантните меѓународни стандарди ISO 230 и ISO 9283, точноста на роботите применети во производство на производи од композитни материјали, како и актуелните истражувања во областа на точноста на индустриските работи со детална разработка на волуметриска калибрација и параметарска калибрација.

Во *Моделирање – математички модели* се разработени кинематските модели, вклучувајќи ги кинематскиот модел според Денавит-Хартенберг (DH) конвенцијата, кинематски модел според теоријата на винт (Screw Theory), моделот на робот поставен на дополнителна линеарна оска, како и модел со негеометриски параметри. Во овој дел следи и моделирање на грешките, како и идентификација на параметри кај делумната калибрација, кај целосната калибрација на сите геометриски параметри, како и целосна калибрација со вклучени негеометриски параметри. Разработена е и калибрација на конфигурација од робот поставен на линеарна оска. На крајот е прикажана оптимизационата постапка со дефинирање на функцијата на целта и градиентен алгоритам за оптимизација.

Во *Експерименталните истражувања* е прикажана опремата за изведување на мерењата и софтверски алатки, како и сопствено развиената дополнителна опрема за мерење на ориентација. Претставена е машинска конфигурација со роботот KUKA KR500 и ATL глава како алат, која е главна алатка на истражувањето на оваа докторска дисертација.

Во поглавјето *Анализа на резултатите од експерименталните истражувања* на почетокот е разработена Делумната калибрација (алгоритам за одредување на параметрите на алатот), каде што се разгледани претходните истражувања за точностите при одредување

на параметрите на алатот, итеративната постапка за одредување на параметрите на алатот – прва итерација, верификацијата на алгоритмот за делумна калибрација – втора итерација. Покрај тоа, реализиран е избор на репрезентативни множества од положби – множество за калибрација и множество за валидација. Следува целосната калибрација – алгоритам за одредување на 30 геометриски параметри, каде што е направена анализа на резултатите со идентификација на геометриските параметри на целото множество од положби за калибрација, со детална анализа на отстапките во позиција и ориентација. Прикажани се тестот за ортогоналност, како и тестот за точност на патека и тестот за бидирекционално полагање. Следува алгоритмот за целосна калибрација со вклучени негеометриски параметри. Во овој дел е вклучен и алгоритам за целосна калибрација со вклучени негеометриски параметри со анализа на резултатите со идентификација на параметрите на целото множество од положби за калибрација, потоа се прикажани анализите на отстапките во позиција и ориентација. Посебно е значајна вкрстената анализа на резултатите со кластерирање на множествата од положби со анализата на резултатите добиени над целото множество од положби за калибрација, како и врз секој кластер од положби за валидација, одделно, како и вкрстена анализа на резултати добиени со оптимизација над податоците од еден кластер. На крајот од оваа глава е направена анализа со вклучување на грешките од дополнителна линеарна оска.

Последната, петта глава, се занимава со *Алгоритмите за компензација. Верификација на резултатите* во која е разработен итеративен нумерички алгоритам за компензација, како и верификација на резултатите од експерименталното истражување, со верификација на резултатите од алгоритмот за одредување на 30 геометриски параметри, како и верификација на резултатите од алгоритмот за целосна калибрација со вклучени негеометриски параметри.

Предмет на истражување и краток опис на применетите методи

Истражувањата на точноста на роботите веќе подолго време претставуваат фокусна точка не само на научните институции, туку уште повеќе и на компаниите кои произведуваат работи, како и на оние кои ги користат. Ова е посебно важно за одреден број на примени на роботите, како што се роботите користени во медицината, технологиите за композитни материјали, авиоиндустријата, вселенските истражувања итн.

Истражувањата реализирани во оваа дисертација се занимаваат со основите на теоријата на точност на роботите применета во областа на композитните материјали, посебно кај делот на работи со ротациски оски, кои доминираат во апликациите во индустријата и пошироко и кои претставуваат посебен предизвик во однос на анализата и калибрацијата на нивната точност.

Сопствените истражувања резултираа со разработени алгоритми и симулации со кои прецизно се моделира и анализира точноста на роботите, а кои се верифицирани со значителен број на експериментални истражувања. Истражувањата покажуваат огромен потенцијал за подобрување на точноста на роботите, базирани на развиените оригинални алгоритми и експерименталните техники со високософистицирана мерна техника. Ова не само што е новина за нашите простори, туку претставува и висок предизвик и за пошироката истражувачка заедница која се занимава со проблематиката на точност на роботите и нивната примена во индустријата на композитни материјали и производи.

Краток опис на резултатите од истражувањето

Целта на оваа докторска дисертација беше да се разработат калибрациски алгоритми за унапредување на точноста на робот од типот 6R со AFP/ATL глава, кои ќе бидат сеопфатни и ќе ги опфаќаат сите чекори од процесот на калибрација, при што резултатите ќе бидат експериментално потврдени. Развиени се, истражени и претставени резултатите од имплементација на следниве алгоритми:

1. Алгоритам за делумна калибрација на робот, со калибрирање на 6 параметри. Со оглед на тоа што производителите на индустриски работи нудат дополнителни модули за поголема точност на роботот, тестиран е АА (absolute accuracy) модулот на робот KUKAKR360 на тој начин што се идентификувани нови, калибрирани

- вредности на шесте параметри на AFP/ATL главата употребена како алат.
2. Алгоритам за целосна калибрација на робот со калибрирање на 30 геометриски параметри на индустриски робот KUKA од типот 6R, при што освен грешките во позицијата на крајниот алатот на роботот – вкупната позициска грешка, се минимизираат и грешките во ориентацијата, при што управувањето на роботот се врши преку неговите координати.
 3. Алгоритам за целосна калибрација на робот со калибрирање на 30 геометриски и 5 негеометриски параметри кои се однесуваат на крутоста на членовите на индустриски робот од типот 6R. Овој алгоритам се разликува од претходниот само по вклучувањето на негеометриските параметри што се однесуваат на крутоста и овозможува споредба на резултатите од двата алгоритми и процена на влијанието на негеометриските параметри врз точноста на роботот.
 4. Хибриден алгоритам за калибрација на машинска конфигурација составена од 6R индустриски робот поставен на линеарна оска, во кој се комбинираат методите на волуметриска калибрација на геометриските грешки зависни од позицијата (според ISO 230) стандардот со методите на параметарска калибрација опишани во претходните две цели.

Конечна оценка на докторската дисертација

Врз основа на анализата и проверката на докторската дисертација може да се заклучи дека трудот е успешно завршен, а проблематиката од теориски аспект систематично е разработена. Добиените резултати од направените истражувања во докторската дисертација се јасно презентирани, систематизирани и анализирани, а целта на истражувањето е успешно реализирана.

Преку теоретски, истражувачки и научен пристап е направено поврзување на истражувањето во еден целосен труд. Трудот е јасно напишан на научно и стручно ниво, со јасни анализи и дискусии на резултатите, како и нивно јасно презентирање во форма на табеларни податоци, графички прикази и сликовито.

Добиените резултати од истражувањата се објавени во меѓународни списанија и во зборници на трудови од меѓународни конференции.

Исполнетост на законските услови за одбрана на трудот

Кандидатот пред одбраната на докторскиот труд ги објавил следниве рецензирани истражувачки трудови.

Трудови објавени во зборници на меѓународни научни конференции и во индексирани меѓународни научни списанија:

1. **Samoil Samak**, Svetlana Risteska, Vladimir Dukovski, Sase Trajkoski, Some Experimental Investigation of Products from Thermoplastic Composite Materials Manufactured with Robot and LAFF, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), September 2020 Vol. 9 (Issue). ISSN 2278-0181
2. Svetlana Risteska, Anka Trajkovska Petkoska, **Samoil Samak**, Marian Drienovsky, Annealing Effects on the Crystallinity of Carbon Fiber-Reinforced Polyetheretherketone and Polyohenylene Laminate Composites Manufactured by Laser Automatic Tape Placement, February 2020 Materials Science 26(3):308-316 DOI: [10.5755/j01.ms.26.3.21489](https://doi.org/10.5755/j01.ms.26.3.21489)
3. Biljana Kostadinovska, Svetlana Risteska, Blagoja Samakoski, **Samoil Samak**, Nikolce Romevski, Influence of process parameters in production of resin film on Kevlar fabric prepreg ICAT'19 8th International Conference on Advanced Technologies, Bosnia and Herzegovina, August 26-30, 2019 Sarajevo.
4. Dimovski, I., Trompeska, M., **Samak, S.**, Dukovski, V., Cvetkoska, D. "Algorithmic approach to geometric solution of generalized Paden-Kahan subproblem and its extension", International Journal of Advanced Robotic Systems, 2018:I-II, DOI:10.1177/1729881418755157, SAGE, 2018.

5. **Samak, S.**, Dimovski, I., Trompeska, M., Hristoski, M., Kochoski, F., Dukovski, V. "Computerbased simulation and validation of robot accuracy improvement method and its verification in robot calibration procedure", ETAI 2018 International Conference, ETAI Society of Macedonia, 2018.
6. Cvetkoska, D., Dimovski, I., **Samak, S.**, Trompeska, M., Dukovski, V. "Using Constrained Multi- Optimization in Design of Composite for Filament Wound High Pressure Vessels", International Journal of Mathematics Trends and Technology (IJMTT) – Volume 61 Number 2, DOI:10.14445/22315373/IJMTT-V61P516, 2018.
7. Capeska, Svetlana and Risteska, Svetlana and **Samak, Samoil** and Kostadinovska, Biljana (2017) Impact of the technological parameters for the production of UD prepreg. Knowledge - International Journal, Scientific Papers, 20 (5). ISSN 2545-4439.
8. Dimovski, I., **Samak, S.**, Trompeska, M., Hristoski, M., Dukovski, V. "Influence Of Each Of The Geometric Errors On The Total Displacement Error Of The Machine", IEEE EUROCON 2017, 17th International Conference on Smart Technologies (pp. 866-869), DOI:10.1109/EUROCON.2017.8011234, 2017.
9. **Samak, S.**, Dimovski, I., Trompeska, M., Dukovski, V. "Avoiding heavy computations in inverse calibration procedure for 7 DOF robot manipulator", Journal of Electrical Engineering and Information Technologies, Vol. 1, No.1-2, pp.37-43, ISSN 2545-4250, 2016.
10. **Samak, S.**, Dimovski, I., Dukovski, V., Trompeska, M. "Volumetric calibration for improving accuracy of AFP/ATL machines", 7th International Scientific Conference on Defensive Technologies OTEH, Beograd 2016.

ЗАКЛУЧОК И ПРЕДЛОГ

Комисијата за оценка и одбрана на докторската дисертација „Теоретски и експериментални истражувања на точноста на роботите применети во индустријата за производство на производи од композитни материјали“ пријавена и изработена од кандидатот м-р Самоил Самак донесе заклучок дека истата претставува **самостојна научна работа со оригинални научни истражувања и значајни резултати**.

Врз основа на анализата и проверката на докторската дисертација може да се заклучи дека проблематиката систематично е разработена и е пристапено кон реализација на сите поставени цели и истите се реализирани. Експерименталните истражувања во голем дел ги потврдуваат теориските сознанија, а преку направените експерименти и анализа на добиените резултати кандидатот се здобил со сознанија и познавање за одредени теоретски и експериментални методи за истражување на индустриските работи, како и со познавање на научните методи за истражување на точноста на роботите применети во индустријата на композитни материјали, посебно во роботизираниите AFP/ATL технологии.

Докторската дисертација е научен труд со оригинални сознанија, а врз основа на содржината, обемот и постигнатото ниво на квалитет ги задоволува и исполнува условите потребни за изработка на докторски труд.

Врз основа на тоа, Комисијата има чест да му предложи на **Наставно-научниот совет на докторски студии на Кампус 2 да ја прифати позитивната рецензија на докторската дисертација со наслов „Теоретски и експериментални истражувања на точноста на роботите применети во производство на производи од композитни материјали“** изработена од Самоил Самак и да одобри јавна одбрана на истата.

РЕЦЕНЗЕНТСКА КОМИСИЈА

Проф. д-р Винета Сребренкоска – претседател, с.р.
Проф. д-р Владимир Дуковски, член, интерен ментор, с.р.
Проф. д-р Зоран Ивановски, член, екстерен ментор, с.р.
Проф. д-р Сашо Коцески, член, с.р.
Проф. д-р Светлана Рistesка, член, с.р.