



Стојадиновић, М. С.¹⁾, Мајсторовић, Д. В.¹⁾, Durakbasa, М. Numan²⁾

МОДЕЛ ПЛАНИРАЊА ПУТАЊЕ ЗА ИНСПЕКЦИЈУ ПРИЗМАТИЧНИХ ДЕЛОВА НА МЕРНОЈ МАШИНИ

Резиме

У раду је представљен један нов модел планирања путање мерног сензора нумерички управљане мерне машине (НУММ). Модел се састоји из математичког модела, моделирања примитива за инспекцију, дистрибуције мерних тачака, анализа приступачности мерног сензора и принципа избегавања колизије. Геометријске информације потребне за планирање путање преузете су из интерних датотека 3D CAD модела призматичног дела (IGES и STL), док се улазни подаци о толеранција уносе на основу већ креиране онтолошке базе знања. Представљени модел је нов приступ орјентисан дефинисању интелигентног концепта инспекције. Његова предност се огледа у смањењу укупног времена мерења кроз смањење времена потребног за припрему (планирање) мерења услед аутоматског генерисања путање мерног сензора и њене оптимизације.

Кључне речи: мерна стратегија, призматични делови, НУММ, планирање путање

1. УВОД

Инспекција на мерној машини је базирана на комплексној софтверској подршци за различите класе метролошких задатака (толеранција). Спровођење униформног плана инспекције на њима представља специјални проблем, који зависи од метролошке комплексности призматичних делова, интуиције и искуственог знања оног ко планира инспекцију.

У последње три деценије планирање инспекције на *NUMM* се развијало кроз следеће прилазе: мануелни план, потом план генерисан *CAI* софтвером који се задржао до данас, затим план заснован на експертним системима и интелигентни концепт планирања инспекције. Заједнички елемент који је остао исти кроз све ове етапе развоја је објекат додир или објекат мерења. Према третирању објекта мерења разликују се три приступа: толеранцијски, геометријски и комбиновани.

Као што је познато, процес инспекције се састоји из неколико кључних елемената као што су планирање путање, избегавање колизије, анализа постављања дела, анализа приступачности, као и конфигурисање мерних пипака. Ниво развоја и имплементације до сада развијених метода генерисања плана инспекције дефинише заступљеност ових елемената у њему. Комплетан систем за планирање инспекције садржи све наведене елементе. У раду [1] заступљени су елементи као што су постављање дела и конфигурисање мерних пипака. У [2-6] дати су приступи за планирање путање. У [7] се разматрају решења за избегавање колизије, а у [8] анализа приступачности мерног сензора. Планирање инспекције се може разматрати и кроз поделу на локални и глобални план инспекције [9]. Пример екстракције геометријских информација из *CAD* модела и формирање улазних података дат је у [10].

У овом раду путања мерног сензора се упрошћава и посматра као скуп тачака који се састоји из три подскупа. Први подскуп су мерне тачке и оне се могу добити на основу геометријских информација о примитивима односно параметрима примитива. Други скуп су чворне тачке кроз које сензор прође при инспекцији једног геометријског примитива без колизије, а добијају се на основу координата

¹⁾ Др Славенко М. Стојадиновић, асистент, Универзитет у Београду, Машински факултет, Катедра за производно машинство, 011/3302-438 (sstojadinovic@mas.bg.ac.rs)

Проф. др Видосав Д. Мајсторовић, редовни професор, Универзитет у Београду, Машински факултет, Катедра за производно машинство, 011/3302-407 (vmajstorovic@mas.bg.ac.rs)

²⁾ Prof. Dr. Numan M. Durakbasa, Full professor, Vienna University of Technology, Institute for Production Engineering and Laser Technology (durakbasa@ift.tuwien.ac.at)

мерних тачака и анализе приступачности мерног сензора. Трећи скуп тачака омогућава путању без колизије при преласку сензора са једног на други примитив.

У овом раду је представљен нов модел планирања путање за инспекцију призматичних делова на мерној машини. Главна идеја представљеног модела је генерисање путање мерног пипка на основу CAD модела призматичног дела и његових (задатих) толеранција. Експериментални пример је обухватио расподелу десет мерних тачака, међутим метод дистрибуције дозвољава унос било ког броја мерних тачака, што зависи од типа и квалитета прописане (захтеване) толеранције. На основу дефинисане повезаности толеранција и геометрије као предходно објашњених процедура развијених метода и принципа, планирање путање мерног сензора као излаз даје *point-to-point* мерну путању за дати призматични део.

2. МОДЕЛ ПЛАНИРАЊА ПУТАЊЕ

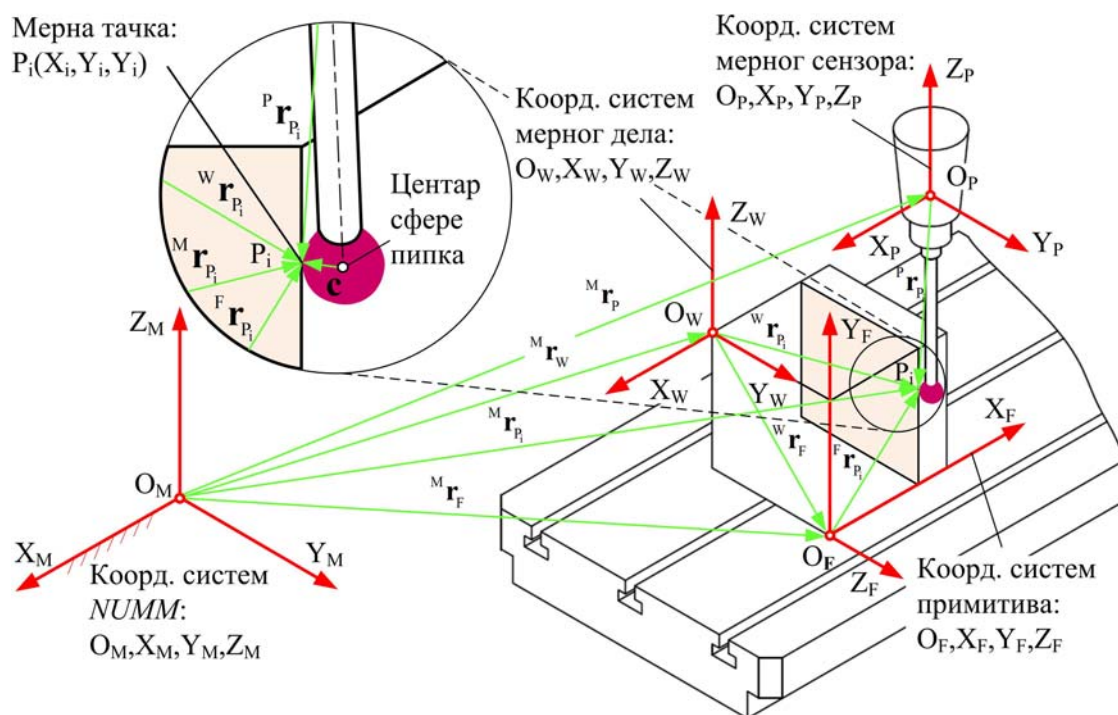
Модел планирања путање за инспекцију PD на NUMM се састоји из математичког модела, моделирања примитива за инспекцију, дистрибуцију мерних тачака, анализа приступачности мерног сензора и принципа избегавања колизије.

2.1. Математички модел

Математички модел планирања путање за инспекцију PD на NUMM је показан на слици 1. Његова основна улога је у дефинисању веза између координатних система мерне машине, мерног дела и примитива дела. Модел је базиран на једначини (1) којом се израчунава вектор положаја мерне тачке у координатном систему мерне машине:

$${}^M r_P = {}^M r_W + {}^W r_P + {}^F r_P = {}^M r_F + {}^F r_P \quad (1)$$

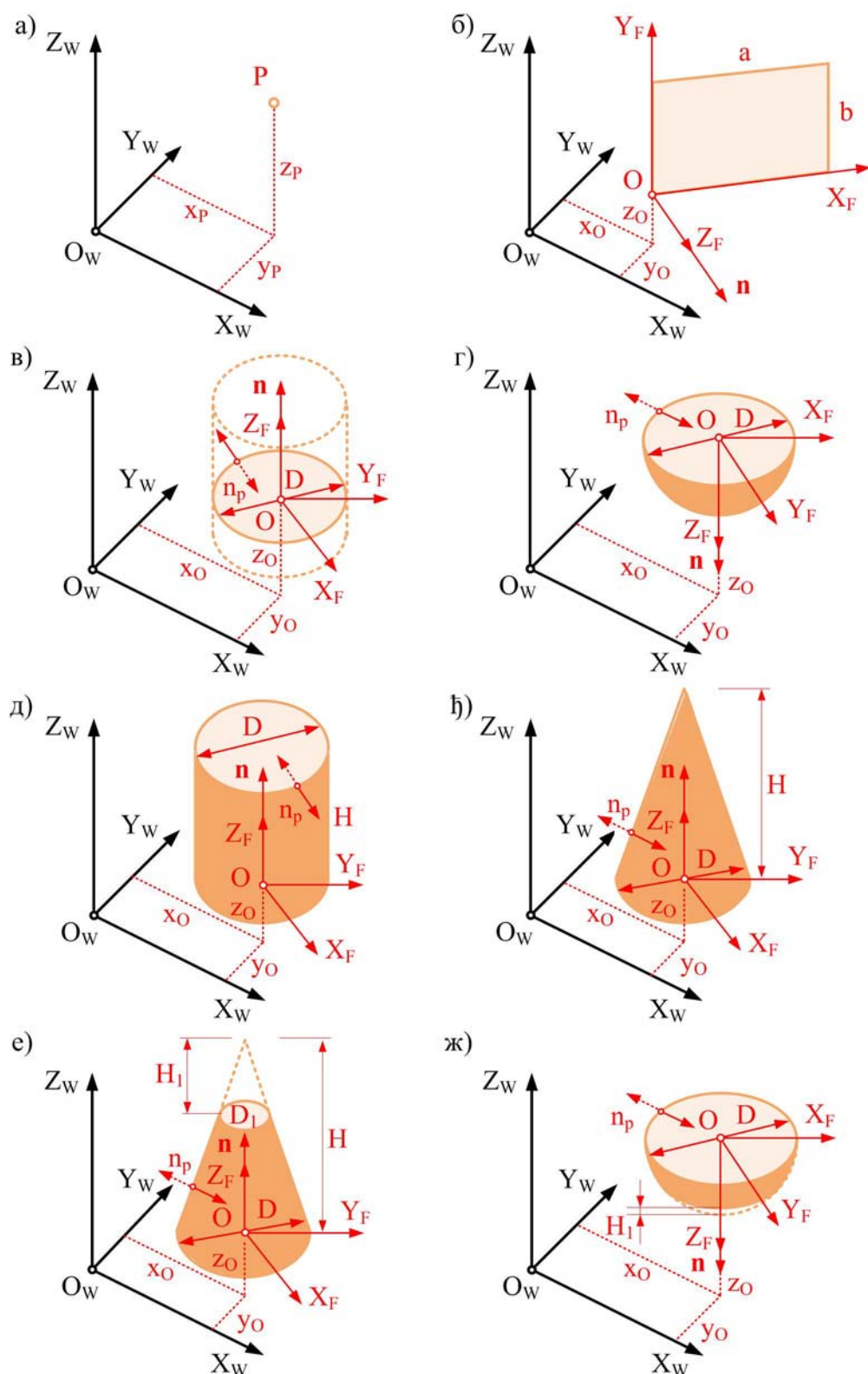
где је: ${}^M r_F$ - вектор положаја примитива у KS мерне машине, ${}^F r_P$ - вектор положаја мерне тачке у KS примитива.



Слика 1. Математички модел планирања инспекције PD на NUMM [12]

2.2. Моделирања примитива за инспекцију

Моделирање примитива за инспекцију је базирано на основним геометријским примитивима и њиховим параметрима који их једнозначно одређују. Геометријски примитиви обухваћени овим моделирањем су тачка, раван, круг, полусфера, цилиндар, купа, зарубљена купа и зарубљена полусфера (слика 2).



Слика 2. Базни геометријски примитиви и њихови параметри [12]: а) тачка; б) раван; в) круг; г) полусфера; д) цилиндар; њ) купа; е) зарубљена купа; ж) зарубљена полусфера

2.3. Дистрибуција мерних тачака

Модел дистрибуције мерних тачака је базиран на *Hemmersly* - овој секвенци [11], за израчунавање координата дуж две осе примитива. Модификовањем *Hemmersly* – ове секвенце изведена је дистрибуција мерних тачака за основне геометријске примитиве као што су раван, круг, полусфера, цилиндар, купа, зарубљена купа и зарубљена полусфера. Том приликом се користи Декартов *KS*

O_F, X_F, Y_F, Z_F и поларно-цилиндарски $KS O'_F, X'_F, Y'_F, Z'_F$. Координате у Декартовом KS су обележене са $P_i(s_i, t_i, w_i)$.

Обрасци за израчунавање координата мерних тачака за примитив полусфера су:

$$s_i = \sqrt{R^2 - \left(\left(\sum_{j=0}^{k-1} \left(\left[\frac{i}{2^j} \right] \text{Mod} 2 \right) \cdot 2^{-(j+1)} \right) \cdot R \right)^2} \cdot \cos \left(\frac{i}{N} \cdot 360^\circ \right) \quad (2)$$

$$t_i = \sqrt{R^2 - \left(\left(\sum_{j=0}^{k-1} \left(\left[\frac{i}{2^j} \right] \text{Mod} 2 \right) \cdot 2^{-(j+1)} \right) \cdot R \right)^2} \cdot \sin \left(\frac{i}{N} \cdot 360^\circ \right) \quad (3)$$

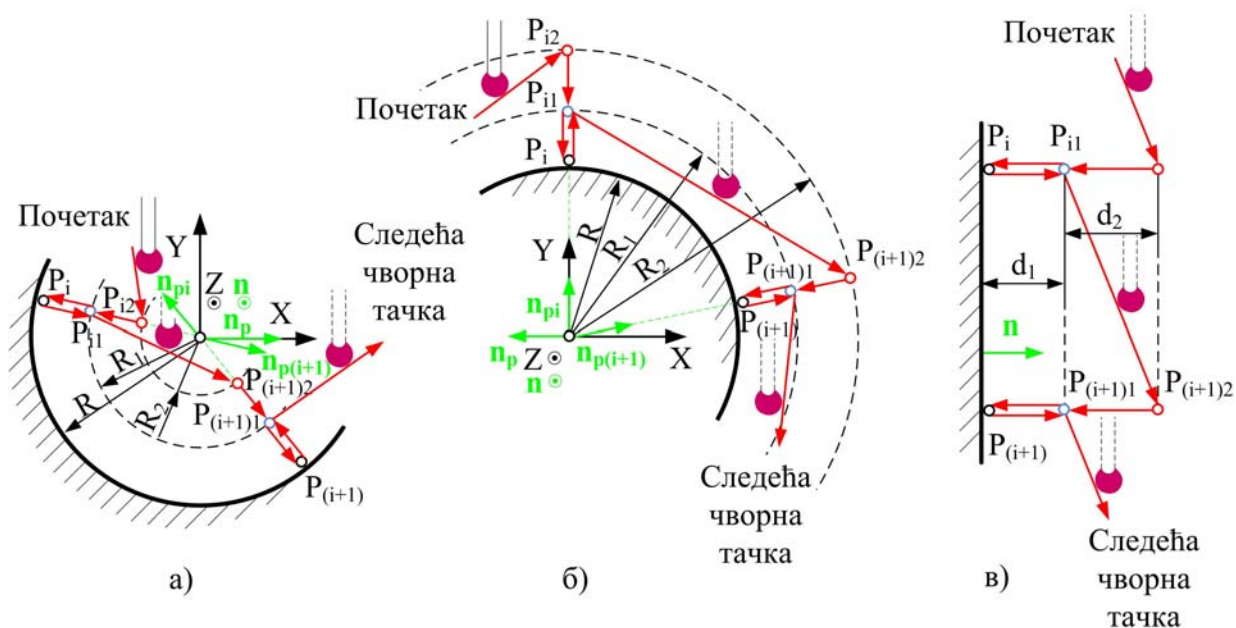
$$w_i = \left(\sum_{j=0}^{k-1} \left(\left[\frac{i}{2^j} \right] \text{Mod} 2 \right) \cdot 2^{-(j+1)} \right) \cdot R \quad (4)$$

где је: R [mm] - полупречник полусфере, N - број мерних тачака, $k = \log_2 N$ - константа, $\text{Mod} 2$ - математички оператор који представља остатак дељења са два.

2.4. Анализа приступачности мерног сензора

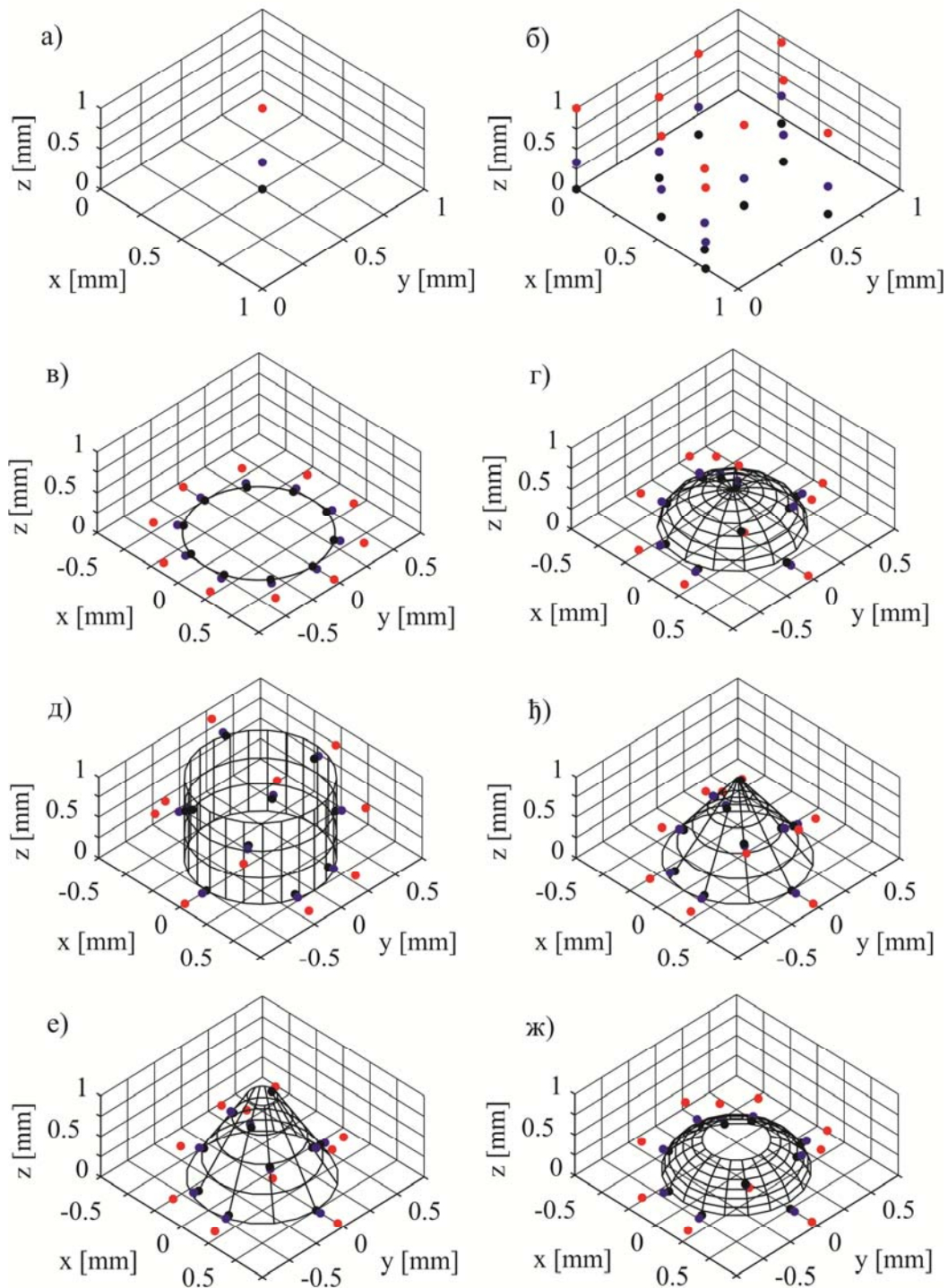
Да би се извршила инспекција једног примитива неопходно је спровести анализу приступачности мерног сензора односно одредити два нова скупа тачака. Први скуп тачака $P_{i1}(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1})$ представља тачке у којима се прелази из брзог у спори ход $NUMM$. Растојање које пипак пређе између i -те тачке, $P_{i1}(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1})$ и $P_i(x_i, y_i, z_i)$ је представљено са d_1 - пут спорог хода, а растојање између i -те тачке $P_{i2}(x_{i2}, y_{i2}, z_{i2})$ и $P_{i1}(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1})$ је d_2 - пут брзог хода. Овим приступом дефинисања скупова тачака и ходова избегава се колизија између примитива и мерног пипка.

Код инспекције PD уочавају се три карактеристична случаја за дефинисање скупова тачака $P_{i2}(x_{i2}, y_{i2}, z_{i2})$ и $P_{i1}(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1})$. Они су показани на слици 3.



Слика 3. Принцип генерисања тачака P_{i1} и P_{i2} на основу тачака P_i [12]: а) конкавна цилиндрична површина; б) конвексна цилиндрична површина; в) равна површина

Координате мерних тачака $P_i(x_i, y_i, z_i)$ обележене су црном бојом док су тачке $P_{i1}(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1})$, $P_{i2}(x_{i2}, y_{i2}, z_{i2})$, добијене на основу анализе приступачности сензора, обележене су плавом и црвеном бојом респективно и показане су на слици 4. Дистрибуција је изведена за број мерних тачака $N=10$ за основне геометријске примитиве као што су тачка, раван, круг, полусфера, цилиндар, купа, зарубљена купа, зарубљена полусфера.

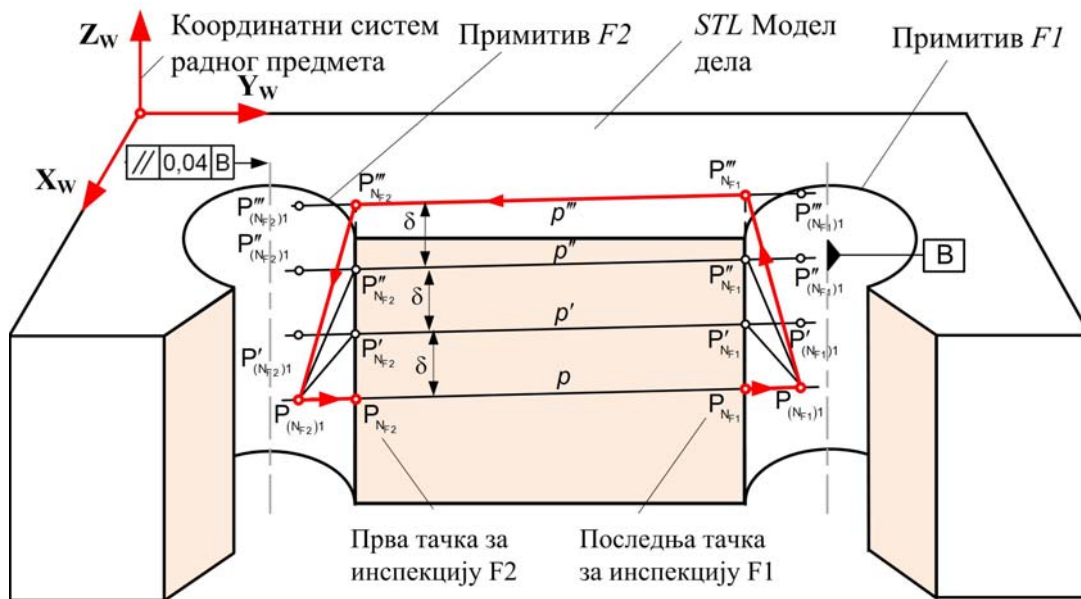


Слика 4. Дистрибуција тачака P_{i1} и P_{i2} на основу мерних тачака P_i за основне геометријске примитиве [12]

2.5. Избегавање колизије

На основу *STL* модела представљања геометрије *PD*, толеранција *PD*, координата последње тачке $P_{(N_{F1})}$ за инспекцију предходног примитива и координата прве тачке $P_{(N_{F2})}$ за инспекцију наредног примитива, на слици 5 представљен је принцип избегавања колизије. Учитавањем координата темена првог троугла T_1, T_2, T_3 формира се једначина равни кроз те три тачке. Истовремено се формира

једначина праве p кроз учитане тачке $P_{(NF_1)l}$ и $P_{(NF_2)l}$. Потом се проверава да ли постоји пресечна тачка P_j између формиране равни и праве и да ли она припада дужи $\overline{P_{(NF_1)l}P_{(NF_2)l}}$.



Слика 5. Принцип избегавања колизије

Уколико не постоји P_j или постоји али не припада дужи $\overline{P_{(NF_1)l}P_{(NF_2)l}}$ учитавају се темена следећег троугла. Ако постоји P_j и припада дужи проверава се да ли је пресечна тачка у делу површине равни која је ограничена троуглом. Даље се проверавају услови: $\alpha \leq \alpha_1$ и $\beta \leq \beta_1$ и $\gamma \leq \gamma_1$. Ако нису испуњена сва три наведена услова тачка не припада делу равни ограниченом троуглом. Тада се учитава нови троугао. Ако је испуњен услов то значи да се тачка налази у површини ограниченој троуглом ($P_j \in \Delta T_1 T_2 T_3$) и да је потребно извршити корекцију z – координата учитаних тачака по обрасцима: $z'_{P_{(NF_1)l}} = z_{P_{(NF_1)l}} + \delta$, $z'_{P_{(NF_2)l}} = z_{P_{(NF_2)l}} + \delta$, како не би дошло до колизије између PD и мерног сензора. После описане корекције формирати тачке $P'_{(NF_1)l}(x_{P_{(NF_1)l}}, y_{P_{(NF_1)l}}, z'_{P_{(NF_1)l}})$ и $P'_{(NF_2)l}(x_{P_{(NF_2)l}}, y_{P_{(NF_2)l}}, z'_{P_{(NF_2)l}})$ као и праву p' која их садржи. Проверити да ли постоји нова пресечна тачка P_j између p' и учитане равни. Ако постоји поновити предходно описани поступак провере да ли се налази на дужи и површини ограниченој троуглом. Ако не постоји кориговане тачке $P'_{(NF_1)l}$ и $P'_{(NF_2)l}$ усвојити као тачке у којима неће доћи до колизије при преласку са једног на други примитив при инспекцији једног облика толеранције.

За пример показан на слици 5, алгоритам три пута коригује z – координату и усваја тачке $P''_{(NF_1)l}$ и $P''_{(NF_2)l}$.

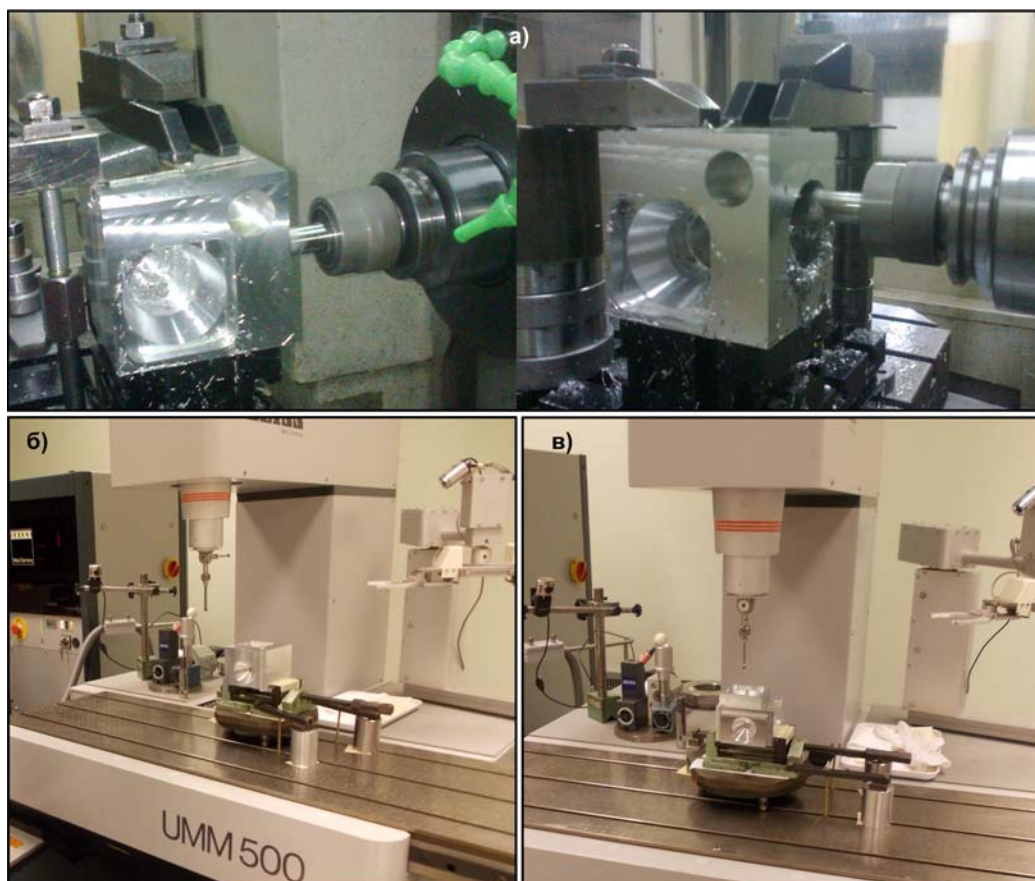
3. ЕКСПЕРИМЕНТ

Експеримент обухвата мерење два PD наменски произведена за ове потребе. Тестирање напред наведеног модела је најпре извршено на првом, геометријски и метролошки простијем делу датом на слици 6 (под а)). Овај део се састоји из свих геометријских примитива обухваћених моделом.

Након успешно спроведеног експеримента над првим PD извршено је тестирање модела над другим PD . У односу на први, други део проширен је новим облицима толеранција, који су тестирани. Експеримент је извршен на мерној машини ZEISS UMM 500 (слика 6 под б) и в)).

Резултати аутоматске инспекције два тест PD показују да су све толеранције дела у цртежом прописаним границама. Ово потврђује да је изложени модел један успешан приступ дефинисању интелигентног концепта планирања инспекције PD . Комплексна геометрија PD се мења скупом тачака чији редослед дефише путању сензора машине без колизије. Представљање путање мерног

сензора скупом тачака са дефинисаним редоследом оставља могућност њене оптимизације тј. смањења времена процеса мерења.



Слика 6. Експериментална инсталација за мерење два призматична мерна предмета а) обрада првог PD, б) инспекција првог PD, в) инспекција другог PD

У табели 1 дати су резултати мерења за оба PD. Као што се то може видети у табели мерење је поновљено пет пута и израчуната је стандардна девијација (одступање).

Табела 1 Тестирани облици толеранција и резултати мерења радних предмета

Део	РБ	Толеранција			Резултати мерења					
		Назив	Ознака	Вред. у mm	1.	2.	3.	4.	5.	Одступање у μm
#1	1	Равност	$\square 0,02$	0,02	0,0005	0,0004	0,0005	0,0005	0,0004	0,1
	2	Пречник	50	$\pm 0,1$	50,0851	50,0855	50,0852	50,0856	50,0855	0,2
	3	Управност	$\perp 0,03A$	0,03	0,0014	0,0024	0,0023	0,0022	0,0023	0,4
	4	Угао	Cone: 39°	$\pm 0,5$	39,2991	39,2991	39,2995	39,2982	39,2991	0,5
	5	Паралелност	$\parallel 0,04B$	0,04	0,035	0,0346	0,035	0,0348	0,035	0,2
#2	6	Растојање	70	$\pm 0,02$	70,0111	70,0111	70,0112	70,0111	70,0106	0,2
	7	Цилиндричност	$\text{cyl} 0,02$	0,02	0,0042	0,0043	0,0041	0,004	0,0041	0,1
	8	Коаксијалност	$\text{coax} 0,02D$	0,02	0,0068	0,008	0,008	0,0091	0,0092	1
	9	Кружност	$\text{circ} 0,03$	0,03	0,0094	0,0092	0,0092	0,0101	0,0096	0,4
	10	Позиција	$\text{pos} 0,75CB$	0,75	0,6471	0,6483	0,6416	0,6481	0,6424	3,2

4. ЗАКЉУЧАК

Спроведена истраживања у овом раду дају основ за даљи развој аутоматског планирања инспекције PD. То се посебно огледа у смањењу времена припреме мерења на основу аутоматског генерисања протокола мерења и остављеној могућности за оптимизацију путање мерног пипка тј. смањења времена мерења, као и аутоматском конфигурисању мерних пипака на основу анализе приступачности геометријским примитивима.

Резултати експеримента показују да је развијени модел један успешан приступ аутоматској инспекцији и добар основ за примену алата *AI* и развој интелигентног концепта планирања инспекције *PD* на *NUMM*.

Спроведена истраживања представљају један одговор на индустријске захтеве као што су висока геометријска варијантност, нешто бржи пласман производа на тржиште у циљу смањења укупног времена производње кроз смањења времена потребног за инспекцију, одржавање сталног-захтеваног нивоа квалитета инспекције кроз аутоматизацију активности које обавља планер инспекције.

Ограничење развијеног приступа је примена само за призматичне делове, не и на делове са слободним површинама за инспекцију, јер је модел планирања инспекције и модел оптимизације развијен само за основне геометријске примитиве.

Примена и корист од модела је јако изражена у случају инспекције геометријски комплексних *PD* делова са великим бројем толеранција у појединачној производњи.

5. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Hwang Y. C., Tsai Y. C., Chang A. C.: *Efficient inspection planning for coordinate measuring machines*, Int J Adv Manuf Technol, 23:732-742, 2004.
- [2] Gu P., Chan K.: *Generative Inspection Process and Probe Path Planning for Coordinate Measuring Machines*, Journal of Manufacturing Systems, 15/4:240-255, 1996.
- [3] Prieto, F., Redarce, T., Lepage, R., Boulanger, P.: *An Automated Inspection System*, Int J Adv Manuf Technol, Springer-Verlag London, 19:917-925, 2002.
- [4] Lin Y. J., Murugappan P.: *A new algorithm for determining a collision-free path for a CMM probe*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Elsevier Science Ltd., 39:1397-1408, 1999.
- [5] Stojadinovic, S., Majstorovic, V., Durakbasa, N.: *A feature – based path planning for inspection prismatic parts on CMM*, XXI IMEKO World Congress “Measurement in Research and Industry”, Proceedings, ISBN 978-80-01-05793-3, pp. 1551-1556, Prague, Czech Republic, August 30th - September 4th, 2015, Czech Technical University in Prague, Faculty of Electrical Engineering, Department of Measurement.
- [6] Flack, D.: *CMM measurement strategies*, ISSN 1368-6550, National Physical Laboratory Teddington, Middlesex, United Kingdom, TW11 0LW, 2001.
- [7] Lin, C.-Z., Chen, C.-C.: *Collision-free path planning for coordinate measurement machine probe*, International Journal of Production Research, Taylor & Francis Ltd., 39/9:1969-1992, 2001.
- [8] Lim, P.C., Menq, H. C.: *CMM feature accessibility path generation*, International Journal of Production Research, Taylor & Francis Ltd., 32/3:597-618, 1994.
- [9] Zhao F., Xu X., Xie Q. S.: *Computer – Aided Inspection Planning – The state of the art*, Computer in Industry, 60/7:453-466, 2009.
- [10] Majstorovic, D. V., Stojadinovic, M. S.: *Research and Development of Knowledge Base for Inspection Planning Prismatic Parts on CMM*, 11th International Symposium on Measurement and Quality Control, Cracow-Kielce, Poland, September 11-13, 2013.
- [11] Lee G., Mou J., Shen Y.: *Sampling strategy design for dimensional measurement of geometric features using coordinate measuring machine*, Int. J. Mach. Tools Manufact., Great Britain, 37/7:917-934, 1997.
- [12] Стојадиновић, М. С., *Интелигентни концепт планирања инспекције призматичних делова на мерној машини*, Докторска дисертација, Машински факултет у Београду, 2016.

Stojadinovic, M. S., Majstorovic, D. V., Durakbasa, M. Numan

A MODEL OF PATH PLANNING FOR INSPECTION PRISMATIC PARTS ON CMM

Abstract: *This paper presents a new model for probe path planning for CMM. The model consists from mathematical model, modeling primitives for inspection, distribution of measuring points, analysis of the probe accessibility and collision-free generation between probe and prismatic part. Needed geometrical information for path planning are taken from internal file of 3D CAD model of the prismatic part (IGES and STL), while input data about tolerance entries on the base already created knowledge base. The presented model is a new approach oriented towards definition of the intelligent concept inspection. Advantage of the model is in reduction the total measurement time by reducing the time needed for the preparation (planning) of the measurements due automated generation of probe path and its optimization.*

Key words: *measurement strategy, prismatic parts, CMM, path planning*