



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

МОДЕЛИРАЊЕ И СИМУЛАЦИЈА МЕРНЕ ПУТАЊЕ У ПРОЦЕСНОЈ ИНСПЕКЦИЈИ НА НУММ

Резиме

У раду је представљено моделирање и симулација мерне путање у процесној инспекцији за случај мерења призматичних делова на нумерички управљаној мерној машини. Моделирање путање се састоји из развоја математичког модела за дистрибуцију мерних тачака и тачака међупозиције, дефинисања праваца приступа мерног сензора и принципа избегавања колизије при преласку мерног сензора са једног на други толеранцијски примитив. Симулација инспекције има за циљ визуелну проверу мерне путање са становишта колизије и на излазу даје мерни протокол и листу управљачких података, која између осталог садржи податке о координатама мерних тачака и тачака међупозиција. Предност овог приступа је у смањењу укупног времена мерења кроз смањење времена потребног за припрему мерења у процесној инспекцији метролошки комплексних призматичних делова.

Кључне речи: мерна путања, симулација, призматични делови, НУММ

1. УВОД

Планирање путање мерног сензора у процесној инспекцији на мерним машинама зависи геометријске и метролошке комплексности мерних делова. Геометријска комплексност се односи на распоред и величину мерних површина, њихове приступачности за мерни пипак итд. Метролошка комплексност се првенствено своди на облике и квалитет толеранција, који се појављују на једном мерном делу, као и њихов број. У координатној метрологији као што је мерење на мерним машинама, поменуте врсте комплексности се не могу одвојено посматрати већ интегрисано. Заједнички елемент у тој интеграцији је објекат додир или мерни примитив. Његов положај и оријентација су геометријске карактеристике, а облик толеранцијске зоне, вредности које ограничавају зону, референтни елемент итд. су толеранцијске карактеристике.

У раду је представљен један нови приступ моделирању мерне путање у процесној инспекцији дефинисањем објеката додир (мерних примитива) са геометријско-толеранцијског становишта. Геометријске информације објеката додир преузете су из IGES датотеке. Основа за њих је 3D CAD модел мерног дела. Интеграција геометријских и толеранцијских информација се одвија у бази знања датој у [1]. Уз помоћ ове интеграције дефинисане су релације између објеката мерења и толеранција мерних делова.

На основу дефинисане повезаности толеранција и геометрије делова, овај модел путање као излаз даје координате тачака са њиховим тачним редоследом за планирање путање. Поред датих мерних тачака дате су и тачке међупозиције кроз које пролази мерни пипак како не би дошло до колизије. Излаз може бити и тачно дефинисана секвенца инспекције примитива. Чињеница да се планирање инспекције призматичних делова на мерној машини врши из три међусобно ортогонална правца користи се за дефинисање праваца приступа мерног пипка. Поређењем ових праваца са правцима вектора нормала, могу се конфигурисати мерни пипци. Дакле, моделирање поред дистрибуције и принципа избегавања колизије, садржи и анализу приступачности мерног пипка свим примитивима

¹⁾ Др Славенко М. Стојадиновић, доцент, 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)

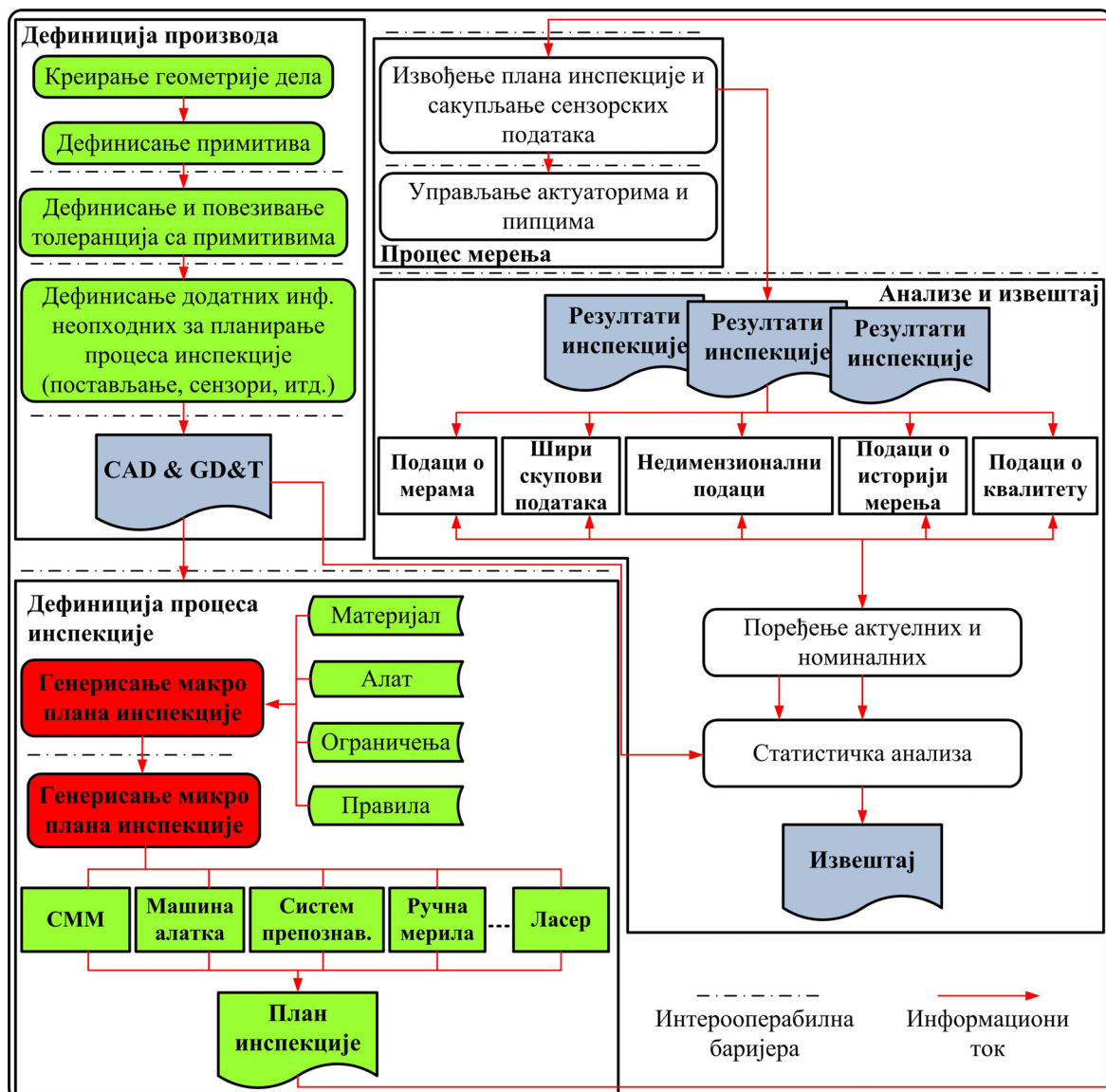
из којих се састоји мерни део.

Симулација путање има за циљ да да визуелну проверу колизије између мерног пипка и мерног предмета као и генерише на излазу мерни протокол и управљачку листу података за одређену мерну машину.

2. МОДЕЛИРАЊЕ МЕРНЕ ПУТАЊЕ

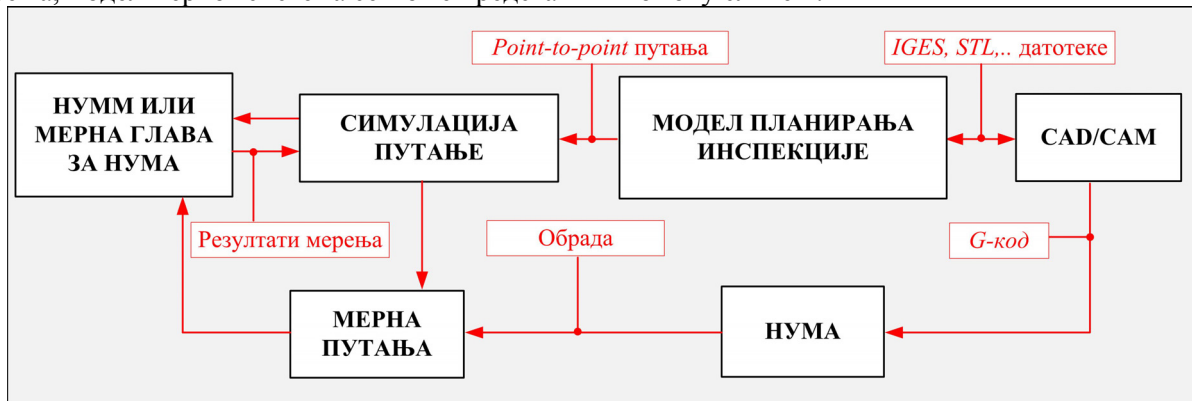
Као полазна основа за моделирање мерне путање може се искористити модел постојећег мерног система [7]. Како се у овом случају ради о једној грани метрологије названој координатна метрологија и мерењу призматичних делова на мерној машини, један такав систем је представљен на слици 1. Модел даје комплетан ток информација за планирање инспекције.

Моделирање мерне путање обухвата и дефинисање примитива за инспекцију, које је базирано на основним геометријским примитивима и њиховим параметрима. Геометријски примитиви обухваћени овим моделирањем су тачка, раван, круг, полусфера, цилиндар, купа, зарубљена купа и зарубљена полусфера [2-5]. Параметри примитива једнозначно одређују сваки примитив. Дефинисање параметара примитива је извршено тако да се у потпуности опише њихова геометрија као и то да ли је примитив пун или шупаљ. Дефинисање пуног и шупљег примитива се врши на основу вектора пуноће примитива, а који даје информацију да ли се инспекција датог примитива врши изнутра или споља. Дефинисани параметри примитива су основ за развој алгоритама као што су алгоритама за дистрибуцију мерних тачака, избегавање колизије и планирање путање где се поред њих користе и онтолошки дефинисане везе примитива и прописаних толеранција [1,6].



Слика 1. Информациони ток приликом планирања инспекције [7]

Простији модел мерног система на бази мерне машине може бити изведен из аналогије са основним моделом мерног система представљеног у [6]. Превођењем појмова из домена обраде на домен мерења, модел мерног система се може представити помоћу слике 2.



Слика 2. Модел мерне путање за процесну инспекцију

2.1. Математички модел за дистрибуцију мерних тачака и тачака међупозиције

Саставни део модела процесног планирања инспекције на мерним машинама је математички модел за дистрибуцију мерних тачака и тачака међупозиције. Његова примарна улога је у дефинисању веза између координатних система мерне машине, мерног дела и примитива, а секундарна дистрибуција тачака. За дефинисање дистрибуције мерних тачака за један примитив користи се Декартов КС O_F, X_F, Y_F, Z_F и поларно-цилиндарски КС O'_F, X'_F, Y'_F, Z'_F . Координате у Декартовом КС су обележене са $P_i(s_i, t_i, w_i)$, а у поларно-цилиндарском КС $P_i(s'_i, t'_i, w'_i)$.

Модел расподеле мерних тачака је базиран на *Hammersly* - овој секвенци [8], за израчунавање координата дуж две осе примитива:

$$s_i = \frac{i}{N} \text{ и,}$$

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

где је: $k = \log_2 N$, N – жељени број тачака, $i = 0, 1, 2, \dots, (N-1)$.

Модификовањем *Hammersly* – ове секвенце, изведена је расподела мерних тачака за основне геометријске примитиве који учествују у креирању толеранција призматичних делова. Обрасци за израчунавање координата тачака на примеру полусфере и цилиндра су следећи:

– полусфера:

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

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

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

где је: R [mm] - полупречник полусфере.

– цилиндар:

$$s_i = R \cos \left(-\frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{N} \cdot i \right)$$

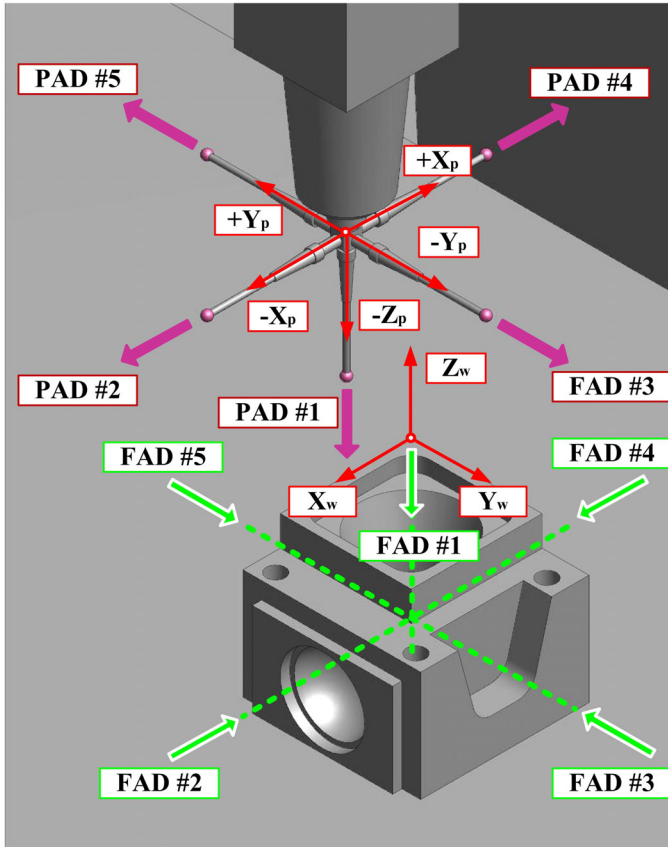
$$t_i = R \sin \left(-\frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{N} \cdot i \right)$$

$$w_i = \left(\sum_{j=0}^{k-1} \left(\left[\frac{i}{2^j} \right] \text{Mod} 2 \right) \cdot 2^{-(j+1)} \right) \cdot h \quad (3)$$

где је: $h[\text{mm}]$ - висина цилиндра.

2.2. Дефинисања правца приступа мерног сензора и избегавање колизије

Планирање инспекције призматичних делова на мерној машини у зависности од броја, позиције и оријентације мерних пипака постављених у мерни сензор се углавном врши из три међусобно ортогонална правца који одговарају Декартовом координатном систему. Ова предпоставка служи као основа за развој модела конфигурисања мерних пипака и постављања мерних делова при мерењу на мерним машинама. Из наведена три правца могу се извести шест могућих смерова приступа мерног пипка (PAD). С обзиром да је мерни део неопходно поставити на радни сто машине, један смер приступа мерног пипка се изоставља тако да преостаје пет: PAD #1, PAD #2, PAD #3, PAD #4, и PAD #5 (слика 3).



Слика 3. Правци приступа

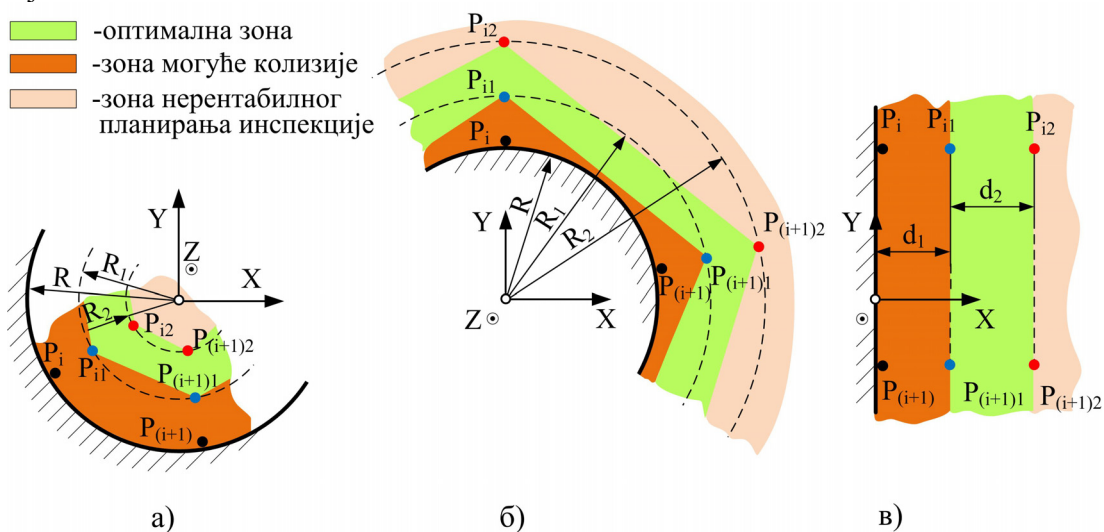
Сваки од ових смерова има смер који одговара неком од смерова координатног система мерне машине, и то: PAD #1 одговара смеру -Z, PAD #2 одговара смеру -X, PAD #3 одговара смеру -Y, PAD #4 одговара смеру +X, PAD #5 одговара смеру +Y.

Са становишта постављања дефинише се правац (FAD) као могући правац приступа примитиву. За њега важи да има исти правац као PAD али супротан смер.

На основу STL модела представљања геометрије призматичних дела, толеранција, координата последње тачке за инспекцију предходног примитива и координата прве тачке за инспекцију наредног примитива, развијен је принцип избегавања колизије.

Скупови тачака P_{i1} и P_{i2} су дефинисани за сваки од геометријских примитива у зависности од њихових параметара. У сврхе оптимизације ови скупови тачака разграничавају три зоне (слика 4) при инспекцији једног примитива на: 1) зону могуће колизије између мерног пипка и мерног дела, (2) оптималну зону и (3) зону нерентабилног планирања инспекције.

Скупови тачака P_{i1} и P_{i2} су дефинисани за сваки од геометријских примитива у зависности од њихових параметара. У сврхе оптимизације ови скупови тачака разграничавају три зоне (слика 4) при инспекцији једног примитива на: 1) зону могуће колизије између мерног пипка и мерног дела, (2) оптималну зону и (3) зону нерентабилног планирања инспекције.



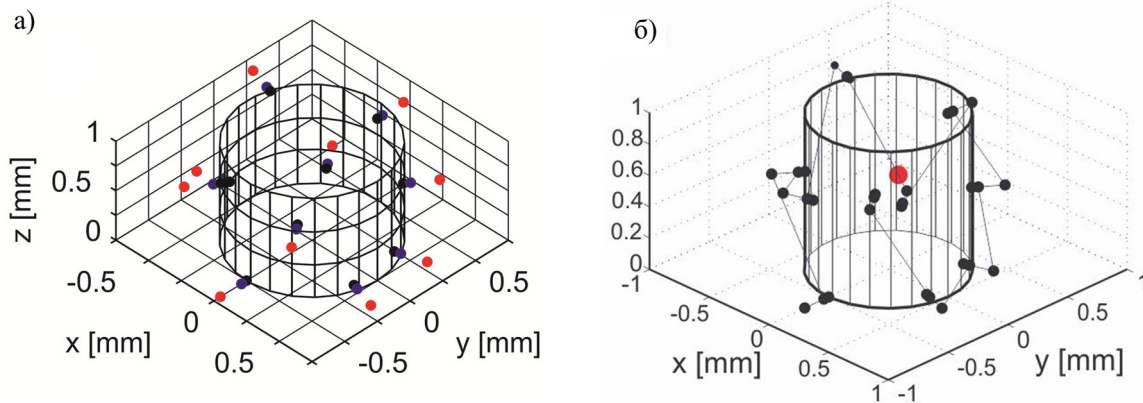
Слика 4. Зоне колизије: а) унутрашња цилиндричан површина, б) спољашња цилиндрична површина, в) равна површина

3. СИМУЛАЦИЈА МЕРНЕ ПУТАЊЕ

Симулација инспекције има за циљ визуелну проверу мерне путање са становишта колизије за дати радни предмет и његове задате толеранције. Базирана је на напред развијеном моделу планирања инспекције и на излазу даје мерни протокол и листу управљачких података, која између осталог садржи податке о координатама мерних тачака и тачака међупозиција. Симулација је развијена уз помоћ три алгорита представљених у [2,8], и то:

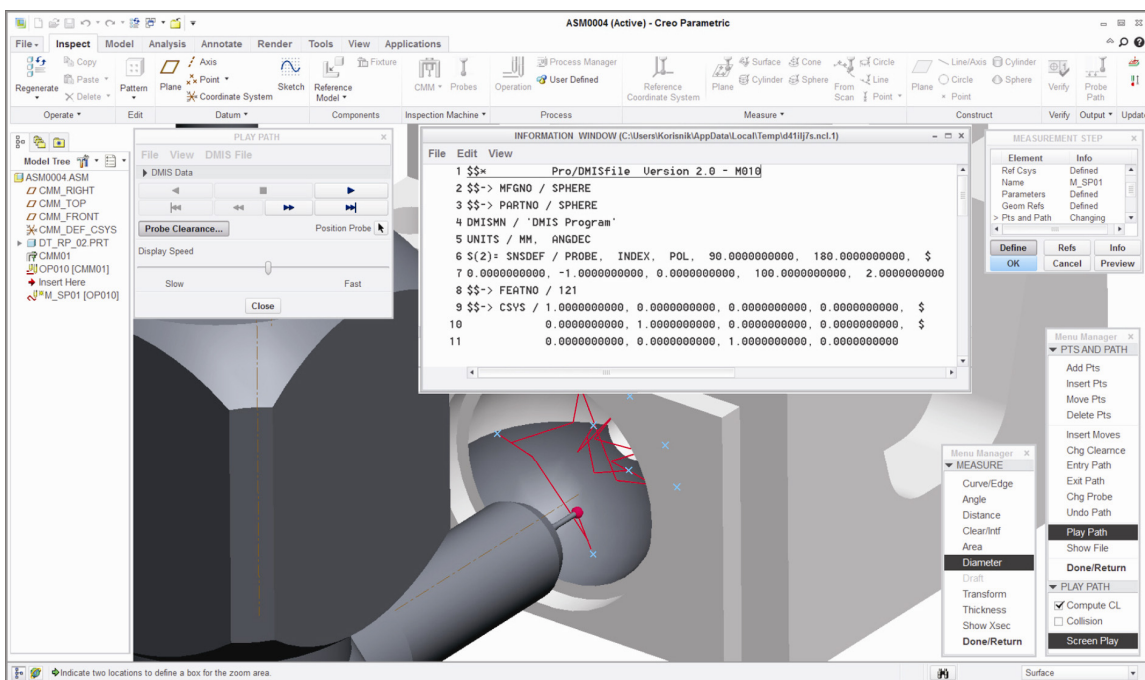
- алгоритама за дистрибуцију мерних тачака,
- алгоритама за избегавање колизије,
- алгоритама за планирање путање мерног сензора.

Симулација путање мерног сензора за случај инспекције цилиндра је показана на слици 5. Дата су дистрибуиране мерне тачке и тачке међупозиције као и мерна путања где црвени маркер тачке представља мерни пипак. Симулација је развијена у *MatLab* окружењу.



Слика 5. Мерна путања за случај инспекције спољашње цилиндричне површине: а) дистрибуиране мерне тачке и тачке међупозиције, б) мерна путања

Симулација путање је извршена и у софтверу *Pro/Engineer*, верзија *Wildfire 4.0* (*PTC Creo*). За симулацију путање у софтверу коришћен је *Manufacturing* модул и у оквиру њега *CMM* подмодул. Координатни систем мерног предмета при инспекцији у софтверу се поклапа са координатним системом мерног предмета при инспекцији на мерној машини. На слици 6 показана је путања при инспекцији пречника полусфере као и уводни део генерисане *CL* датотеке. *CL* датотеку генерише софтвер као излазни извештај који садржи податке о кретању мерног сензора.



Слика 6. Прозор инспекције у *Pro/ENGINEER*-у за зарубљену полусферу са *CL* фајлом

4. ЗАКЉУЧАК

Инспекција на мерним машинама 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.

Симулација инспекције има за циљ визуелну проверу мерне путање са становишта колизије и на излазу даје мерни протокол и листу управљачких података неопходну за покретање мерне машине и даљи ток мерног процеса. Предност овог приступа је у смањењу укупног времена мерења кроз смањење времена потребног за припрему мерења у процесној инспекцији метролошки комплексних призматичних делова.

Спроведена истраживања у овом раду дају један одговор на индустријске захтеве као што је одржавање сталног-захтеваног нивоа квалитета инспекције кроз моделирање и симулацију дела активности које обавља планер инспекције.

Ограничење развијеног приступа моделирања је примена само за призматичне делове, не и на делове са слободним површинама за инспекцију, јер је модел развијен само за основне геометријске примитиве из којих се састоје призматични делови.

5. ЛИТЕРАТУРА

- [1] 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.
- [2] Stojadinovic, S., Majstorovic, V., Durakbasa, N., Sibalija, T.: *Towards an intelligent approach for CMM inspection planning of prismatic parts*, Measurement, 92: 326-339, 2016,
- [3] Stojadinovic, S., Majstorovic, V., Durakbasa, N., Sibalija, T., *Ants Colony Optimization of the Measuring Path of Prismatic Parts on a CMM*, Metrology and Measurement Systems, 23/1:119-132, 2016.
- [4] Stojadinovic S., Majstorović V.: *Towards the Development of Feature – Based Ontology for Inspection Planning System on CMM*, Journal of Machine Engineering, Editorial Institution of the Wroclaw Board of Scientific Technical Societies Federation NOT, Wroclaw, Poland, 12/1:89-98, 2012.
- [5] Stojadinovic S., Majstorović, V.: *Metrological primitives in production metrology–ontological approach*, Proceedings of the 34th International Conference on Production Engineering, pp. 29-30, Nis, Serbia, 28– 30th September, 2011.
- [6] Стојадиновић С.: *Интелигентни концепт планирања инспекције призматичних делова на мерној машини*, Докторска дисертација, Машински факултет у Београду, 2016.
- [7] Zhao Y., Xu X., Kramer T., Proctor F., Horst . J.: *Dimensional metrology interoperability and standardization in manufacturing systems*, Computer Standards and Interfaces, 33/6:541–555, 2011.
- [8] 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.

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

MODELING AND SIMULATION OF MEASUREMENT PATH IN – PROCESS INSPECTION ON CMM

Abstract: *In this paper is presented modeling and simulation of measurement path in – process inspection in the case of measurement prismatic parts on CMM. The path modeling consist from the developing mathematical model for distribution of measurement points and nodal points, the defining of probe accessibility direction and collision avoidance principle when the measuring sensor moving from one to the other tolerance's feature. The purpose simulation of inspection is visually check from standpoint collision and generate the measuring protocol and program code at the output, which among other things, contains data about the coordinates of the measuring points and the nodal points. The advantage of this approach is reduction of the total measurement time by reducing the time required to the prepare measurements in in-process inspection of metrological complex prismatic parts.*

Key words: *measuring path, simulation, prismatic parts, CMM*