

**UTICAJ STRATEGIJE UZORKOVANJA NA JEDNAČINU
REFERENTNE RAVNI MERENE NA KMM**

**THE EFFECT OF SAMPLING STRATEGY ON THE EQUATION OF A
REFERENCE PLANE MEASURED ON A CMM**

Branko Štrbac, M.Sc., Miodrag Hadžistević, prof.dr.
Fakultet tehničkih nauka
Novi Sad

Rok Klobučar, dr., Bojan Ačko, prof.dr.
Mašinski fakultet
Maribor

REZIME

Koordinatne merne mašine (KMM) uspešno mogu da izmere bilo koju geometrijsku specifikaciju naznačenu na tehničkoj dokumentaciji. Merenje se sprovodi tako da se sa površine objekta preko odgovarajućeg senzora uzorkuju koordinate tačaka (x, y, z). Zatim, u nezavisnoj softverskoj analizi, preko odgovarajućih algoritama primenjenih na podatke uzorkovanih tačaka određuje se merni rezultat. Na primeru greške ravnosti, u ovom radu će se ispitati kako izbor broja i položaja mernih tačaka u mernoj strategiji utiče na jednačinu referentne ravni i grešku ravnosti. Za određivanje greške ravnosti i jednačine referentne ravni korišćene su dve metode – najmanji kvadrati (LS) i minimalna zona (MZ).

Ključne riječi: koordinatna metrologija, greška ravnosti, strategija uzorkovanja

ABSTRACT

Coordinate measuring machines (CMMs) can successfully measure any geometric specification stated in technical documentation. Measurement is conducted by sampling coordinates of points (x, y, z) from the surface of an object by means of a specific sensor. Afterwards, the measurement result is determined in an independent software analysis, using specific algorithms applied to the data of the sampled points. Using the example of flatness error, the investigation in this paper will focus on how the choice of the number and the position of measuring points in the measurement strategy affects the equation of the reference plane and flatness error. Flatness error and the equation of the reference plane were determined using two methods - least squares (LS) and minimum zone (MZ) method.

Keywords: coordinate metrology, flatness error, sampling strategy

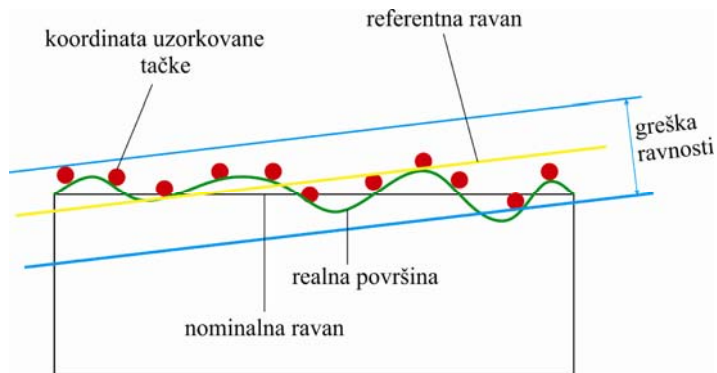
1. UVOD

Zbog sposobnosti inspekcije širokog spektra dimenzionalnih i geometrijskih tolerancija na radnim predmetima, koordinatne merne mašine (KMM) su u predhodne dve decenije dominantan merni instrumenti u proizvodnoj metrologiji. Fleksibilnost u obavljanju različitih mernih zadataka im je omogućena iz principa rada KMM koji se može podeliti u dve

nezavisne faze. Prva faza obuhvata uzorkovanje koordinata tačaka sa površine radnog predmeta preko sistema mernog senzora dok u drugoj fazi se primenjuju metode fitovanja sadržane u softverskoj podršci KMM za analizu koordinata uzorkovanih tačaka [1]. Uzorkovanje koordinata tačaka vrši se prema unapred definisanoj strategiji koja sadrži informacije o broju i položaju mernih tačaka na ispitivanom geometrijskom primitivu. Za potpunu digitalizaciju realne površine, uzorkovanje je potrebno izvršiti u beskonačnom broju mernih tačaka [2]. Međutim, ovaj uslov nije opravdan iz ekonomskih razloga te se uzorkovanje u praksi uglavnom vrši u znatno redukovanom broju tačaka. Izbor odgovarajućeg broja tačaka i njihovog položaja u mernoj strategiji predstavlja aktuelno istraživanje dugi niz godina i posebno je važno kada se ispituje greška oblika. Cilj je koristiti minimalan broj tačaka a dobiti maksimalno reprezentativne informacije iz populacije za datu specifikaciju. Nova generacija standarda geometrijske specifikacije proizvoda (GPS) je za diskrento uzorkovanje vršeno kontaktnim mernim senzorom uvela ograničenje za izbor i položaj broja tačaka prema Nyquist-ovim kriterijumu [3]. Međutim, poštovanje ovog kriterijuma je takođe ekonomski neprihvatljivo. Prema istraživanjima Colosima i ostalih strategije uzorkovanja za procenu grešaka oblika se mogu podeliti u tri kategorije: „slepa“ strategija uzorkovanja, adaptivna strategija uzorkovanja i strategija uzorkovanja zasnovana na proizvodnji [4]. U industrijskoj praksi najčešće se primenjuje „slepa“ strategija uzorkovanja. U ovoj strategiji položaj i broj tačaka se bira jednom za sve ispitivane površine bez obzira na njene specifične karakteristike. Tipični primeri ove strategije su uniformna, slučajna, stratifikovana, Hammersley i Harlton – Zaremba strategija [5]. Kod adaptivnih strategija uzorkovanje se započinje sa malom gustinom tačaka koje se obično uniformno raspoređuju. Zatim se na osnovu početnog uzorkovanja specifičnim algoritmima identifikuju kritične oblasti koje zahtevaju gušće uzorkovanje [6]. Strategije uzorkovanja zasnovane na „tragu“ proizvodnje se zasnivaju na karakteristikama određenog procesa proizvodnje na geometrijski primitiv [7]. Dosadašnja istraživanja su pokazala da izbor tačaka i njihov položaj snažno utiču na procenu greške oblika ali nema radova koji su analizirali kako strategija uzorkovanja utiče na parametre referentnog geometrijskog elementa. Za potrebe ovog istraživanja analizirano je odstupanje od ravnog oblika – ravnost.

2. PROCENA GREŠKE RAVNOSTI NA KMM

Kako operater verifikacije u većini slučajeva nije kompletno definisan na tehničkoj dokumentaciji, strategiju uzorkovanja proizvoljno usvaja operatera na bazi iskustvenih znanja. Uglavnom, izabrana strategija sadrži mali broj tačaka čiji je položaj slučajno odabran. Na bazi podataka koordinata uzorkovanih tačaka (x , y , z) preko izabranog algoritma fitovanja određuje se supstitutivna geometrija tj. referentna ravan.



Slika 1. Merenje greške ravnosti na KMM

Rastojanje dve ekstremno udaljene tačke od referentne ravni predstavlja grešku ravnosti, slika 1. Iz pomenutog razmatranja se može zaključiti da dominantan uticaj na grešku ravnosti ima broj uzorkovanih tačaka u interakciji sa izabranom metodom fitovanja [8,9].

2.1. Određivanje referentne ravni

Standardi propisuju dve metode za procenu greške ravnosti: metoda najmanjih kvadrata (LS) i metoda minimalne zone (MZ). LS metoda je superiornija u odnosu na MZ sa stanovišta jednostavnosti i vremena računanja. LS generalno precenjuje grešku oblika i samim tim može dovesti do odbacivanja dobrih delova dok MZ teži da potceni grešku oblika i veoma je osetljiva na pikove koji mogu, ako se ne primete, dovesti do loših rezultata. LS ne prati pažljivo standarde i ne može da garantuje da je rešenje minimalne zone specificirano u standardu. Primenom metode fitovanja dobiće se jednačina ravni zapisana u sledećem implicitnom obliku:

$$ax + by + cz + d = 0, \quad (1)$$

stim da će parametri koji figurišu u jednačini (1) biti različiti u zavisnost od same metode.



Slika 2. Softverska podrška za ocenu greške ravnosti i referentne ravni

Zahvaljujući svojoj analitičkoj formulaciji i mogućnosti da se implementira sa brzim algoritmima, metoda najmanjih kvadrata je kriterijum udruživanja koji se najčešće koristi u softverima KMM. LS pronalazi optimum kada je suma kvadrata reziduala minimalna. Međutim, standard ISO 1101:2011 uspostavlja minimalnu zonu kao preferiran kriterijum za ocenu tolerancije oblika [10]. Ali problem je taj što standardi ne definišu eksplicitno kako se određuje minimalna zona za određenu geometrijsku karakteristiku. MZ je adekvatniji i sa

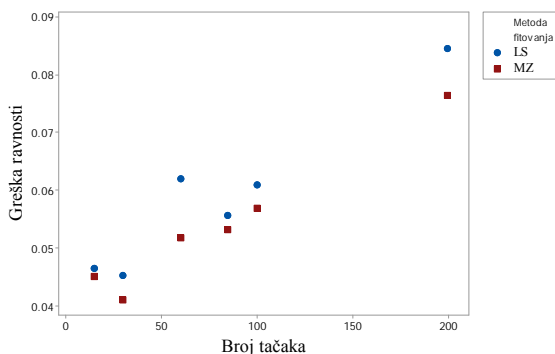
funkcionalnog aspekta jer fizičke smetnje i kontaktne površine su određene preko krajnjih tačaka na ravni. Postoji nekoliko pristupa za ocenu minimalne zone greške ravnosti [11-13] i u ovom radu je korišćen pristup rotacija oko jedne tačke [14].

Ova metodologija ocene greške ravnosti se bazira na osobinama referentne ravni koja predstavlja osnovu za procenu greške ravnosti. Iz analitičke geometrije je poznato da su tri koordinate normalnog vektora ravni jedini parametri koji utiču na vrednost greške ravnosti. Pri tom položaj stvarne ravni nije značajan iz razloga što njegove ortogonalne transformacije ne utiču na ravnost. To znači da u jednačini referentne ravni date preko (1) a , b i c predstavljaju koordinate vektora normale ravni a d je konstanta koja je definisana sa položajem ravni. Parametar d je beznačajan i nema uticaja na procenu greške ravnosti. Ovo navodi na zaključaj da ako se uzme bilo koja ravan sa specifičnim vektorom normale definisanim preko parametra a , b i c rezultat procene greške ravnosti će biti isti. Drugim rečima položaj ravni određen preko rotacije vektora normale i činjenice da tačka A pripada ravni, definisaće vrednost parametra d koji se koristi za izračunavanje ortogonalnih rastojanja od generisanih ravni i procenu greške ravnosti.

Za potrebe određivanja jednačine referentne ravni i greške ravnosti razvijeno je softversko rešenje u programskom paketu Matlab. Ulaz u softver predstavljaju koordinate uzorkovanih tačaka sa KMM. Na slici 2 je prikazana softverska podrška.

3. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Za potrebe ispitivanja uticaja broja tačaka na jednačinu referentne ravni vršeno je uzorkovanje ravne površine dobijene glodanjem. Površina 100×100 mm je uzorkovana u 15, 30, 60, 85, 100 i 200 slučajno raspoređenih mernih tačaka sa kontaktnim mernim senzorom i vrhom mernog pipka $r=0.5$ mm. Merenje je vršeno na KMM Carl Zeiss CONTURA g2 RDS ($MPE_E=1.9+L/330$ μm) u temperaturno kontrolisanoj laboratoriji. Na slici 3 su pokazan uticaj broja tačaka i metode fitovanja na grešku ravnosti. Sa slike se može uočiti da povećanjem broja tačaka u strategiji uzorkovanja skoro linearno raste greška ravnosti dok u svim slučajevima greška ocenjena MZ metodom je manja od one ocenjene LS metodom. Pretpostavka je da bi vrednost greške ravnosti rasla do nekog broja tačaka i nakon toga bi se ustalila. Ovo je dokazano u radu gde se izbor optimalnog broja tačaka vrši prema kvalitetu obrađene površine – R_a [9].



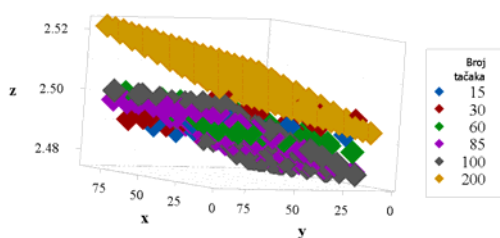
Slika 3. Uticaj broja tačaka i metode fitovanja na grešku ravnosti

Uticaj ova dva faktora na jednačinu ravni je takođe signifikantan i pokazan je u tabeli 1 i slikama 4a. i 4b. Iz analize položaja referentne ravni i ekstremnih tačaka može se zaključiti da ove tačke ne pripadaju istim oblastima na posmatranoj površini u zavisnosti od broja

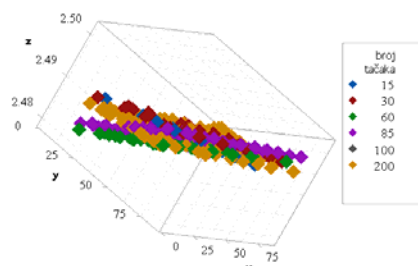
uzorkovanih tačaka. Ova tvrdnja je posebno izražena za slučaj procene LS metodom fitovanja.

Tabela 1. Jednačine referentnih ravni i greške ravnosti u zavisnosti od broja tačaka i metode fitovanja

Broj tačaka	Jednačina ravni MZ	Jednačina ravni LS	Greška ravnosti MZ	Greška ravnosti LS
15	$0.00012x - 0.0001y + z - 2.49202 = 0$	$-0.00008x + 0.00011y - z + 2.48903 = 0$	0.0452	0.04654
30	$0.00018x - 0.00011y + z - 2.4975 = 0$	$-0.000078x + 0.00015y - z + 2.4881 = 0$	0.0411	0.04539
60	$-0.00009x - 0.0001y + z - 2.4838 = 0$	$-0.00002x + 0.00022y - z + 2.4990 = 0$	0.0519	0.06209
85	$0.00001x - 0.00025y + z - 2.4772 = 0$	$0.00001x + 0.00018y - z + 2.480197 = 0$	0.0532	0.05567
100	$0.00003x - 0.00032y + z - 2.4761 = 0$	$-0.00011x + 0.00019y - z + 2.48637 = 0$	0.0569	0.06099
200	$-0.00018x - 0.0002y + z - 2.4905 = 0$	$0.00002x + 0.00013y - z + 2.48755 = 0$	0.0764	0.08455



Slika 4.a. Položaj MZ referentnih ravni



Slika 4.b. Položaj LS referentnih ravni

4. ZAKLJUČAK

Zahtev za proveru geometrijske specifikacije ravnost je čest slučaj u metrološkoj praksi. Provera usaglašenosti sa tolerancijom se uglavnom vrši na koordinatnoj mernoj mašini. Pri tom, izbor broja tačaka u mernoj strategiji i primena metode fitovanja će imati veliki uticaj na grešku ravnosti i na referentnu ravan. Odnos greške ravnosti procenjen sa malim brojem tačaka u odnosu na veliki broj tačaka je skoro duplo manji. Ovaj rad je ispitao kako dva pomenuta faktora utiču na parametre jednačine referentne ravni jer greška ravnosti zavisi od položaja referentne ravni u odnosu na koordinate uzorkovanih tačaka.

5. ZAHVALNICA

Rezultati prezentovani u ovom radu su realizovani u okviru bilateralnog projekta između Republike Srbije i Republike Slovenije „Procena nesigurnosti merenja na koordinatnim mernim mašinama i međulaboratorijsko poređenje“, broj: 43, finansiranog od strane Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije.

6. REFERENCE

- [1] Aggogeri, F., Barbato, G., Barini, E.M., Genta, G., Levi, R.: Measurement uncertainty assessment of Coordinate Measuring Machines by simulation and planned experimentation, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 4, 2011, pp. 51-56.
- [2] Raghunandan, R., Venkateswara Rao, P.: Selection of an optimum sample size for flatness error estimation while using coordinate measuring machine, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 47, 2007, pp 477-482.
- [3] ISO/TS 12781-2:2011: Geometrical product specifications (GPS) - Flatness - Part 2: Specification operators, ISO, Geneva, 2011.
- [4] Colosimo, B.M., Moroni, G., Petro, S.: A tolerance interval based criterion for optimizing discrete point sampling strategies, *Precision Engineering*, Vol. 34, 2010, pp. 745-754.
- [5] Kim, W.S., Raman, S.: On the selection of flatness measurement points in coordinate measuring machine inspection, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 40, 2000, pp. 427 – 443.
- [6] Badar, M.A., Raman, S., Pulat, P.S.: Intelligent search-based selection of sample points for straightness and flatness estimation, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. Vol. 125, 2003, pp. 263–271.
- [7] Colosimo, B.M., Gutierrez, M. E., Moroni, G., Petró, S. Statistical sampling strategies for geometric tolerance inspection by CMM, *Journal of Economic Dynamics and Control*, Vol. 23, 2008, pp. 109-121.
- [8] Hadžistević, M., Štrbac, B., Spasić – Jokić, V., Delić, M., Sekulić, M., Hodolič, J. Factors of estimating flatness error as a surface requirement of exploitation, *Metalurgija*, Vol. 54, 2015, pp. 239-242.
- [9] Raghunandan, R., Venkateswara Rao, P. Selection of sampling points for accurate evaluation of flatness error using coordinate measuring machine, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 202, 2008, pp. 240-245.
- [10] ISO/TS 12781-2:2011, „Geometrical product specifications (GPS) - Flatness - Part 2: Specification operators“, ISO, Geneva.
- [11] Calvo, R., Gomez, E., Domingo, R. Vectorial method of minimum zone tolerance for flatness, straightness, i their uncertainty estimation, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 15(1), 2014, pp. 31-44.
- [12] Cui, C., Li, B., Huang, F., Zhang, R. Genetic algorithm based form error evaluation, *Measurement Science and Technology*, Vol. 18 (7), 2007, pp. 1818-1822.
- [13] Kovvur, Y., Ramaswami, H., Anand, R. B., Anand, S. Minimum - zone form tolerance evaluation using particle swarm optimisation, *International Journal of Intelligent Systems Technologies and Applications*, Vol. 4 (1), 2008, pp. 79-96.
- [14] Radlovački, V., Hadžistević, M., Štrbac, B., Delić, M., Kamberović, B. Evaluating Minimum Zone Flatness Error Using New Method - Bundle of Plains Through One Point, *Precision Engineering*, Vol. 43, 2016, pp. 554–562.