



## MATAVIMŲ REZULTATŲ, GAUTŲ MATUOJANT SUDĖTINGOS GEOMETRINĖS FORMOS DETALES 3D SKENERIAIS IR KOORDINATINE MATAVIMO MAŠINA, LYGINAMOJI ANALIZĖ

Žilvinas GRAIBUS<sup>1</sup>, Vadim MOKŠIN<sup>2</sup>

*Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva*  
*El. paštas: <sup>1</sup>zilvinas.graibus@stud.vgtu.lt; <sup>2</sup>vadim.moksin@vgtu.lt*

**Santrauka.** Straipsnyje lyginami dviejų detalių matmenų matavimų rezultatai, gauti skirtingomis matavimo sistemomis: koordinatine matavimo mašina (KMM), 3D lazeriniu skeneriu ir 3D fotometriniu skeneriu. Buvo matuojamos iškilais ir įgaubto paraboloidinio profilio detalės. Išanalizavus matavimo rezultatus gauta, kad KMM matavimo sistema gauti rezultatai pagal Stjudento  $t$  kriterijų ( $t$ -test) statistiškai reikšmingai ( $p < 0,001$ ) tikslesni už rezultatus, gautus 3D lazeriniu ir fotometriniu skeneriais. Taip pat nustatyta, kad rezultatai, gauti 3D lazerine skenavimo sistema, yra statistiškai reikšmingai tikslesni ( $p < 0,05$ ) už gautuosius 3D fotometriniu skenavimo sistema.

**Reikšminiai žodžiai:** KMM, fotometriniu skeneris, lazerinis skeneris, 3D modelis.

### Įvadas

Dėl didėjančių lūkesčių gaminių kokybei vis daugiau ieškoma našesnių ir tikslesnių būdų gaminių kontrolei užtikrinti. Pirmosios koordinatinės matavimo mašinos (KMM) buvo išrastos dar XX a. 5-ajame dešimtmetyje. Jų naudojimas labai išpopuliarėjo įvairiose pramonės šakose. KMM gali matuoti didelį kiekį ypač svarbių ir sudėtingų parametrų, dažnai tuo pačiu metu (Uekita, Takaya 2016). Tai padeda sumažinti matavimo trukmę, padidinti našumą ir greičiau identifikuoti apdirbimo paklaidas. Prieš du dešimtmečius atsirado lazerinės ir fotometrinės skenavimo sistemos, bet joms vystytis trukdė gana sudėtingas rezultatų apdorojimas, pateikimas ir skaitmeninimas. Dabartinės technologijos leidžia tai daryti našiau ir tiksliau. 3D (trijų matmenų) skenavimas sparčiai populiarėja dėl šių privalumų (ElMaraghy, Yang 2003): 1) didelis greitis; 2) didelė raiška; 3) nėra tiesioginio kontakto su paviršiumi; 4) atpažįstama matuojamo objekto spalva. Tai gali būti pritaikoma daugybėje sričių: archeologijoje, architektūroje, biomechanikoje ir kitose srityse, kuriose reikia objektus skaitmeninti. Metalų apdirbimo pramonėje šios sistemos dar nėra populiarios. Jų našumas yra didelis, bet ribotas matavimų tikslumas. Šiuo metu preciziniams matavimams atlikti dažniausiai naudojamos koordinatiniu matavimo principu veikiančios sistemos.

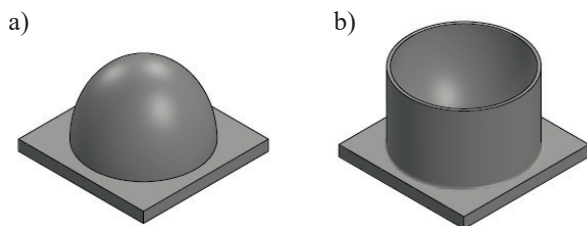
2014 m. buvo atlikti tyrimai (Gapinski *et al.* 2014), kurie leido palyginti koordinatinės matavimo mašinos, fotometriniu skenerio ir 3D tomografo sistemas. Tyrimui atlikti buvo pagamintas specialus aliuminio ruošinys, kuriame buvo išgręžtos 3, 4 ir 5 mm skersmens skylės bei mechaniškai apdirbtas išorinis sferinis paviršius, kurio skersmuo – 4 mm. Taip pat buvo išfrezuota išėma, o galiniai paviršiai apdirbti skirtingu kampu. Tyrimo metu gauta, kad KMM matavimų nuokrypiai yra 0,038 mm, fotometriniu skenerio nuokrypiai – 0,047 mm, o 3D tomografo – 0,046 mm. Šiame tyrime tiksliausiai buvo matuojama naudojant KMM, o 3D tomografo ir fotometriniu skenerio matavimų rezultatai yra panašūs. 2009 m. atlikto tyrimo metu (Cuypers *et al.* 2009) buvo analizuotas skirtingų matavimo metodų tikslumas, matuojant didelių matmenų (iki 100 m<sup>2</sup> ploto) bandinius. Tyrime buvo nagrinėta mobilioji KMM sistema ir skirtingų konfigūracijų optinis skeneris. Atlikus tyrimą (Cuypers *et al.* 2009) rasta, kad kiekviena sistema turi pranašumų ir trūkumų. Matuojant mobiliąja KMM matavimo sistema, svarbu atsižvelgti į užduoties reikalavimus, detales ir aplinkos sukeltus apribojimus. Taip pat buvo nustatyta, kad dėl skaitmeninės fotografijos ir fotogrametrijos pažangos 3D skenavimas tampa geresne KMM matavimo sistemų alternatyva. Matavimų trukmė, naudojant KMM sistemą, buvo šešios valandos, o, matuojant 3D skeneriu ir gaunant panašius pagal tikslumą rezultatus, matavimų trukmė buvo tik trys valandos.

2015 m. atlikto tyrimo metu (Galantucci *et al.* 2015) buvo išmatuoti sudėtingos geometrinės formos kūnai 3D tomografijos ir fotogrametrijos sistemomis. Pirmoji matavimo sistema yra tiksli, bet turi ryškų trūkumą, nes matavimams atlikti naudojami žalingi radioaktyvieji rentgeno spinduliai. Pagrindinis fotogrametrijos būdo trūkumas yra tas, kad jis negali būti taikomas didelių matmenų detalėms (didžiausieji matmenys – iki 30 mm). Atlikus tyrimą (Galantucci *et al.* 2015) gauta, kad tikslesni matavimai buvo atlikti fotogrametrijos metodu. Buvo gauta 0,001 mm vidutinio kvadratinio nuokrypio reikšmė, o matuojant 3D tomografu bandinius H3, H4, H5 vidutinis kvadratinis nuokrypis siekė 0,002 mm.

### Matavimo įranga ir matuojamos detalės

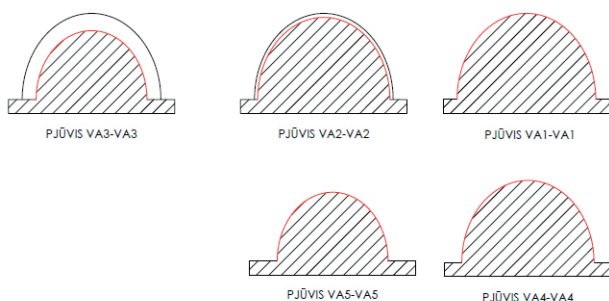
Matavimams atlikti buvo naudoti dviejų skirtingų paraboloidinių profilių (įgaubto ir iškilus) detalės (1 pav.). Jos buvo pagamintos iš aliuminio Al7075.

3D lazeriniam skenavimui atlikti buvo naudojama „Ametek“ firmos skenerio sistema „Creaform Metrascan 3D“ (MetraScan 3D 2016). Šią sistemą sudaro dviejų kamerų erdvės skeneris „C-Track 780“, nešiojamasis lazerinis skeneris „MetraScan 3D“ ir kontaktinis liestukas „Handyprobe 780“. Trimačiam optiniam skenavimui buvo naudojamas „Artec“ firmos fotometrinių skeneris „Space Spider“ (Space Spider booklet 2015). Koordinatiniame gaminių matavimui buvo naudojama „DEA“ firmos KMM „Global Silver Classic“ (DEA Global Silver 2015). Naudota



1 pav. Matuojamos detalės: a) iškilusio profilio detalė; b) įgaubto profilio detalė

Fig. 1. Measured parts: a) convex; b) concave

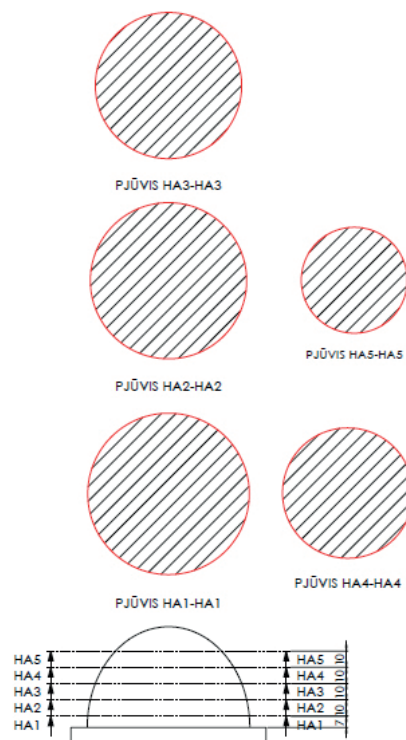


2 pav. Vertikaliųjų pjūvių išdėstymas iškilusio profilio detalėje  
Fig. 2. Arrangement of vertical sections on the convex part

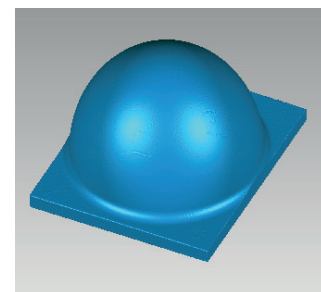
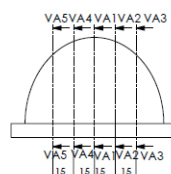
„Hexagon“ firmos matavimo liestuvas galvutė HH-T 5–50 (Probe heads 2015).

Detalės buvo suskirstytos 10 pjūvių – 5 vertikaliais ir 5 horizontaliais (2, 3 pav.). Pjūvis VA1 (VB1 įgaubto profilio detalėi) kerta paraboloidinį paviršių per vidurį, pjūviai VA2 ir VA4 yra nutolę 15 mm atstumu nuo VA1 pjūvio plokštumos, atitinkamai į dešinę ir į kairę (2 pav.). Pjūviai VA3 ir VA5 yra nutolę nuo VA1 30 mm atstumu, atitinkamai į dešinę ir į kairę (2 pav.). Aplink detalės profilį kiekviename pjūvyje buvo parenkami 32 taškai, kurie yra vienodai nutolę vienas nuo kito.

Pjūvis HA1 (HB1 įgaubto profilio detalėi) yra nutolęs nuo bazinės plokštumos 7 mm atstumu (3 pav.), HA2, HA3, HA4, HA5 atitinkamai yra nutolę nuo bazinės plokštumos 17 mm, 27 mm, 37 mm ir 47 mm atstumais (3 pav.).



3 pav. Horizontaliųjų pjūvių išdėstymas iškilusio profilio detalėje  
Fig. 3. Arrangement of horizontal sections on the convex part



4 pav. Skenuotos iškilusio profilio detalės 3D vaizdas  
Fig. 4. 3D view of the convex part

## Tyrimo metodika

Prieš atliekant matavimus 3D lazeriniu skeneriu, sistemai kalibruoti buvo naudojami sferos ir plokštumos etalonai. Etaloniškas paviršius buvo skenuojamas 3D lazeriniu skeneriu iki programinės įrangos signalo, kad sistema sukalibruota. Detalės buvo pagamintos iš aliuminio, kuris pasižymi geromis šviesos atspindėjimo savybėmis. Dėl to galėjo išsikraipyti skenavimo lazeriu rezultatai, todėl, prieš pradėdant skenuoti, detalė buvo nudažoma plonu sluoksniu. Aplink skenuojamą bandinį buvo pastatomi 3 taikikliai, kad lazerio sistema atpažintų erdvę. Skenuojant paviršių 3D lazeriniu skeneriu, lazerio sistema nuo detalės buvo laikoma 20–30 cm atstumu. Šis atstumas yra optimalus, kad skenavimo procedūra užtruktų trumpiausiai. Ant lazerio sistemos valdymo pulto yra įrengtos indikacinės lemputės, kuriomis galima nuolat kontroliuoti reikiamą atstumą tarp lazerio galvutės ir objekto. Detalė buvo skenuojama tol, kol matomame programos lange modelyje nebeliktų aklųjų zonų (4 pav.). Gautas 3D modelis buvo perkeliamas į programą „Geomagic 2014 CTR“. Ją naudojant modelis suskirstomas pjūviais, ir gauti pjūvio taškai lyginami su nominaliosiomis 3D modelio reikšmėmis. Kiekviename pjūvyje, kaip ir KMM atveju, matuojamos 32 taškų reikšmės ir nustatomi rezultatų nuokrypiai.

Norint atlikti matavimus 3D fotometriniu skeneriu, jam kalibruoti buvo naudotas plokštumos etalonas. Etalono paviršius buvo skenuojamas 3D fotometriniu skeneriu tol, kol programinė įranga sugeneruoja pranešimą, teigiantį, kad sistema sukalibruota. Sistemos matavimo tikslumui užtikrinti reikėjo padengti detalę antirefleksine danga. Juodu žymekliu ant bandinių profilių pažymimi taškai. Jie skirti tam, kad, atliekant skenavimą, neatsirastų aukščio ir gylio paklaidų. Skenuojant paviršių 3D fotometriniu skeneriu, jo sistema nuo bandinio buvo laikoma 15–25 cm atstumu. Šis atstumas užtikrina, kad skenavimo procedūra užtruktų trumpiausiai. Detalė skenuojama keturis kartus iš kiekvienos pusės tol, kol matomame programos lange modelyje neliktų aklųjų zonų. Naudojant „Geomagic Studio 2014“ programą, keturių dalių skenuoti paviršiai sujungiami į vieną, o nereikalingi, modeliui nepriklausantys taškai ištrinami. Gautas 3D modelis perkeliamas į programą „Geomagic 2014 CTR“, čia modelis suskirstomas pjūviais ir gauti pjūvio taškai lyginami su nominaliosiomis 3D modelio reikšmėmis. Kiekviename pjūvyje, kaip KMM ir 3D lazerinio skenavimo metu, matuojamos 32 taškų reikšmės ir jų nuokrypiai nuo nominaliojo matmens. Gauti rezultatai surašomi į lenteles ir apskaičiuojamos kiekvieno pjūvio vidutinio kvadratinio nuokrypio reikšmės. Gautos vidutinių standartinių nuokrypių reikšmės toliau buvo naudojamos rezultatams palyginti su kitų matavimo sistemų rezultatais.

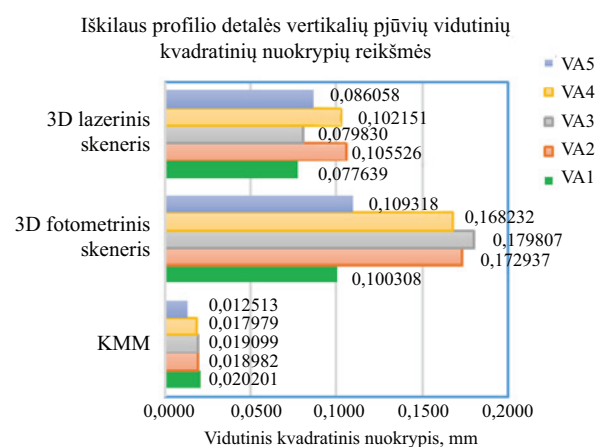
Prieš atliekant matavimus KMM, kalibruoti buvo naudojama etaloniškas sfera (de Aquino Silva, Burdekin 2002). Kontaktiniu liestuvu buvo matuojami 24 sferos taškai. Sukalibravus sistemą, detalės buvo matuojamos numatytuose 5 vertikaliuose ir 5 horizontaliuose pjūviuose. Kiekviename pjūvyje matuojami 32 taškai, vienodai nutolę vienas nuo kito. Naudojant programą PC-DMIS 2010 taškų koordinatės iš karto buvo lyginamos su nominaliosiomis 3D modelio koordinatėmis. Po matavimo ciklo matavimų rezultatai sugeneruojami ir pateikiama matavimų ataskaita. Gauti duomenys apie kiekvieno taško nuokrypius surašomi į lenteles. Gauti duomenys apdorojami ir apskaičiuojamas kiekvieno pjūvio vidutinis standartinis nuokrypis. Gautos vidutinių standartinių nuokrypių reikšmės toliau buvo naudojamos rezultatams palyginti su kitų matavimo sistemų rezultatais.

## Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

Tyrimų rezultatai pateikti 5–8 pav.

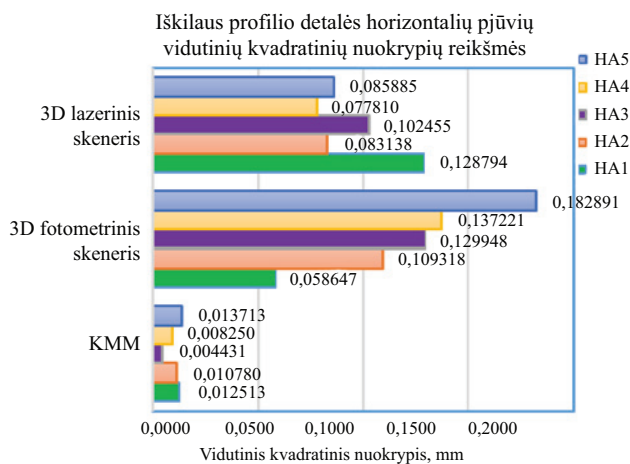
Iš 5 pav. matome, kad kiekviename vertikaliame pjūvyje mažiausios vidutinės kvadratinio nuokrypio reikšmės yra gautos matuojant koordinatine matavimo mašina. *Microsoft Excel 2013* programa buvo apskaičiuotas statistinis rezultatų reikšmingumas, kuriam nustatyti buvo naudotas Studento *t* kriterijus (*t*-test). Buvo gauta, kad statistiškai reikšmingai KMM matavimai yra tiksliausi ( $p < 0,001$ ). 3D lazerinio skenerio matavimo rezultatai yra statistiškai tikslesni nei 3D fotometriniu skenerio matavimo rezultatai ( $p < 0,05$ ).

Iš 6 pav. galima matyti, kad, matuojant iškilais profilio detalę horizontaliuose pjūviuose, tiksliausia matavimo sistema yra KMM ( $p < 0,001$ ).



5 pav. Iškilaus profilio detalės vertikalių pjūvių matavimų rezultatų vidutinių kvadratinų nuokrypių reikšmės

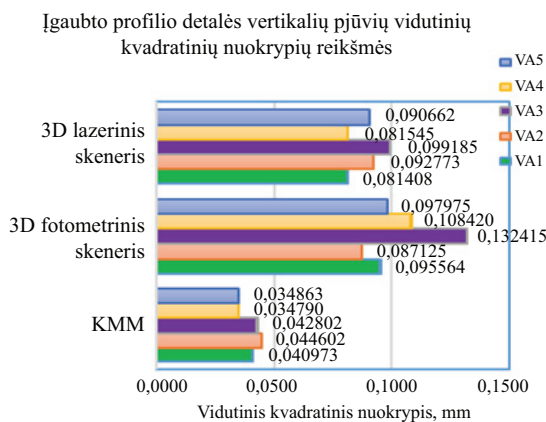
Fig. 5. Standard deviation values of measurement results obtained for vertical sections of convex part



6 pav. Iškilaus profilio detalės horizontalių pjūvių matavimo rezultatų vidutinių kvadratinų nuokrypių reikšmės

Fig. 6. Standard deviation values of measurement results obtained for horizontal sections of convex part

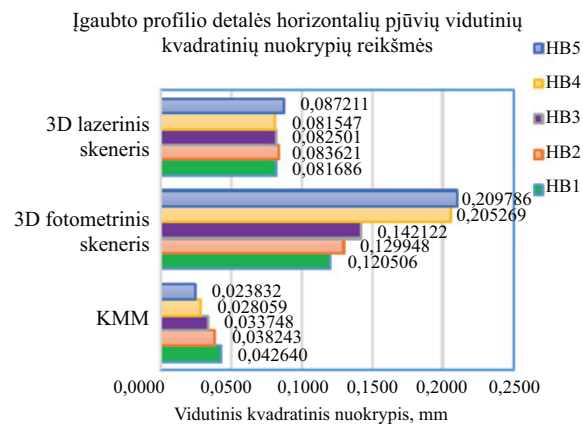
Iš 7 pav. matome, kad, matuojant įgaubto profilio detalę vertikaliuose pjūviuose, tiksliausia matavimo sistema yra taip pat KMM. Reikšmingumo įvertinimas patvirtino, kad statistiškai tiksliausi rezultatai gauti matuojant KMM ( $p < 0,001$ ). Tarp 3D lazerinio skenerio ir 3D fotometrinių skenerio matavimo sistemų statistiškai reikšmingų rezultatų nebuvo gauta ( $p > 0,05$ ).



7 pav. Įgaubto profilio detalės vertikalinių pjūvių matavimo rezultatų vidutinių kvadratinų nuokrypių reikšmės

Fig. 7. Standard deviation values of measurement results obtained for vertical sections of concave part

8 pav. pateiktos įgaubto profilio detalės matavimo rezultatų, gautų horizontaliuose pjūviuose, vidutinių kvadratinų nuokrypių reikšmės. Buvo gauta, kad statistiškai reikšmingai tiksliausi rezultatai gauti matuojant KMM ( $p < 0,001$ ). 3D lazerinio skenerio matavimo rezultatai yra statistiškai reikšmingai tikslesni nei 3D fotometrinių skenerio matavimo rezultatai ( $p < 0,001$ ).



8 pav. Įgaubto profilio detalės horizontalių pjūvių matavimo rezultatų vidutinių kvadratinų nuokrypių reikšmės

Fig. 8. Standard deviation values of measurement results obtained for horizontal sections of concave part

## Išvados

1. Tiksliausia matavimo sistema yra KMM. Matuojant iškilaus profilio detalę, visų matuotų taškų vidutinio kvadratinio nuokrypio reikšmė  $\sigma = 0,01347$ . Naudojant Stjudento  $t$  kriterijų ( $t$ -test) gauta, kad rezultatai gauti KMM statistiškai reikšmingai ( $p < 0,001$ ) tikslesni už gautus naudojant 3D lazerinį skenerį ir 3D fotometrinių skenerių.
2. Matuojant įgaubto paviršiaus detalę KMM sistema, visų taškų vidutinio kvadratinio nuokrypio reikšmė  $\sigma = 0,0351$ . Naudojant Stjudento  $t$  kriterijų gauta, kad KMM yra statistiškai reikšmingai ( $p < 0,001$ ) tikslesni rezultatai už gautus naudojant 3D lazerinį ir fotometrinių skenerius.
3. Matuojant tiek įgaubto, tiek iškilaus profilio detales gauta, kad 3D lazerinio skenerio sistema yra statistiškai reikšmingai ( $p < 0,05$ ) tikslesnė už 3D fotometrinių skenavimo sistemą. Atliekant matavimus lazeriniu skeneriu visų matuotų iškilaus profilio taškų vidutinis kvadratinis nuokrypis  $\sigma_{is} = 0,09341$ , įgaubto profilio detalės visų matuotų taškų  $\sigma_{ig} = 0,08793$ . Atitinkamai 3D fotometrinių skenerio sistemos vidutinių kvadratinų nuokrypių reikšmės yra  $\sigma_{is} = 0,13484$ ,  $\sigma_{ig} = 0,13174$ .
4. Pastebėta tendencija, kad, matuojant 3D fotometrinių skeneriu, didėjant detalės aukščiui mažėja matavimo tikslumas.

## Literatūra

- Cuypers, W.; Van Gestel, N.; Voet, A.; Kruth, J.-P.; Mingneau, J.; Bleys, P. 2009. Optical measurement techniques for mobile and large-scale dimensional metrology, *Optics and Lasers Engineering* 47(3-4): 292-300.  
<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2008.03.013>

- DEA Global Silver [interaktyvus]. 2015 [žiūrėta 2017 m. balandžio 27 d.]. Prieiga per internetą: <http://metrology.precizika.lt/uploads/Downloads/DEA%20GLOBAL%20Silver.pdf#page=1&zom=auto,-103,848>
- de Aquino Silva, J. B.; Burdekin, M. 2002. A modular space frame for assessing the performance of co-ordinate measuring machines (CMMs), *Precision Engineering* 26(1): 37–48. [https://doi.org/10.1016/S0141-6359\(01\)00096-4](https://doi.org/10.1016/S0141-6359(01)00096-4)
- ElMaraghy, H.; Yang, X. 2003. Computer – aided planing of laser scanning of complex geometries, *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 52(1): 411–414.
- Galantucci, L. M.; Pesce, M.; Lavecchia, F. 2015. A stereo photogrammetry scanning methodology, for precise and accurate 3D digitization of small parts with sub-millimeter sized features, *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 64(1): 507–510.
- Gapinski, B.; Wiczorowski, M.; Marciniak-Podsadna, L.; Dybala, B.; Ziolkowski, G. 2014. Comparison of different method of measurement geometry using CMM, optical scanner and computed tomography 3D, *Procedia Engineering* 69: 255–262. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.230>
- MetraScan 3D [interaktyvus]. 2016 [žiūrėta 2017 m. balandžio 17 d.]. Prieiga per internetą: [https://www.ems-usa.com/pdf/NEW\\_MetraSCAN3D\\_HandyPROBE\\_Leaflet\\_EN\\_EMEA\\_13042016.pdf](https://www.ems-usa.com/pdf/NEW_MetraSCAN3D_HandyPROBE_Leaflet_EN_EMEA_13042016.pdf)
- Probe heads [interaktyvus]. 2015 [žiūrėta 2017 m. balandžio 27 d.]. Prieiga per internetą: <http://metrology.precizika.lt/uploads/Downloads/Probe%20Heads.pdf>
- Space Spider booklet [interaktyvus]. 2015 [žiūrėta 2017 m. balandžio 17 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.artec3d.com/files/pdf/Space-Spider-Booklet-EURO.pdf>
- Uekita, M.; Takaya, Y. 2016. On-machine dimensional measurement of large parts by compensating for volumetric errors of machine tools, *Precision Engineering* 43: 200–210. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2015.07.009>

## A COMPARATIVE ANALYSIS OF MEASUREMENT RESULTS OBTAINED IN MEASURING PARTS HAVING COMPLEX GEOMETRIC SHAPES BY MEANS OF 3D SCANNERS AND CMM

Ž. Graibus, V. Mokšis

### Abstract

This study compares the dimension measurements results obtained for two parts that had convex and concave parabolic profiles. Three different measurement systems were employed for measurements: coordinate measuring machine (CMM), 3D laser and 3D photometric scanners. It was found using Student's  $t$  – test that results obtained by CMM measuring system are statistically significantly ( $p < 0.001$ ) more accurate than results obtained by means of 3D laser and 3D photometric scanners. It was also established that results obtained by means of 3D laser scanning system are statistically significantly more accurate ( $p < 0.05$ ) than those obtained by means of 3D photometric scanning system.

**Keywords:** CMM, photometric scanner, laser scanner, 3D model.