

Izmera objektov kulturne dediščine z rotacijskim laserskim profilomerom

Urban PAVLOVČIČ, Matija JEZERŠEK, Aleš GORKIČ, Hubert KOSLER, Janez MOŽINA

Izvleček: Prispevek opisuje razvoj in uporabo rotacijskega laserskega profilomera, ki temelji na principu laserske triangulacije. Z uporabo dveh laserskih linijskih projektorjev omogoča izvajanje meritev v bližnjem in daljnem načinu. V njem je uporabljena kamera z vgrajenim programirljivim slikovnim procesorjem, ki bistveno razbremeni računalnik. Umeritev merilnika temelji na merjenju referenčne površine. Merilnik je bil razvit za potrebe 3D-izmere velikih teles, kakršni so tudi objekti kulturne dediščine. Predstavljen je primer izmere kipa Merkurja, katerega dimenzije znašajo 3,5 x 2 x 1,5 m. Izmerjen je bil z več kot 300 pogledov. Po ureditvi vseh delnih meritev, za kar je bilo uporabljeno programsko orodje Geomagic, je bila dosežena natančnost 1,2 mm.

Ključne besede: tridimenzionalno merjenje, 3D, profilometrija, digitalizacija površin, laserska triangulacija, kulturna dediščina, Geomagic, hitra kamera

■ 1 Uvod

Postopek digitalizacije površin ali tridimenzionalnega (3D) merjenja se vse pogosteje uporablja tudi za ohranjanje objektov kulturne dediščine. Razlogi za to so različni: kontroliranje rezultatov restavriranja ali izdelave replik. Zlasti pomemben pa je vidik enkratnosti teh predmetov, ki privlačijo znanstvenike in turiste s celega sveta. Da si takšne predmete moremo predstavljati, si jih je potrebno ogledati na mestu samem, za kar je običajno potrebno vzeti pot pod noge. V zadnjih letih pa se za potrebe

tako imenovanih navideznih muzejev, restavratorstva in znanosti vse več kipov poskuša čim bolj tridimenzionalno in barvno izmeriti [1]. S tem je prihranjen marsikateri liter goriva in tudi možnost poškodbe umetnine, saj je interaktivno ogledovanje možno na ustreznih spletnih straneh s poljubnega mesta. Eden večjih in bolj znanih del s tega področja je bil projekt Digitalni Michelangelo [1], pri katerem so merili znane Michelangelove kipe, med drugim tudi Davida. Seveda pa so bili izmerjeni tudi številni drugi objekti kulturne dediščine, kot so Areška Minerva [2], rimski Kolosej [3], tajvanski templji [4] in številni drugi. Tovrstni postopki se uporabljajo tudi v primeru, ko želijo izdelati spominke, ki bi bili po obliki čim bolj podobni izvorniku.

Obstaja več vrst merilnikov, ki omogočajo 3D-merjenje objektov kulturne dediščine. V splošnem jih delimo na dotične, pri katerih se s tipalom dotikamo površine, in na nedotične. V drugo skupino se uvrščajo tudi in predvsem optične

merilne metode, pri katerih merimo obliko na osnovi svetlobe, ki se odbije z merjenega telesa. V primeru uporabe okoliške svetlobe za osvetljevanje teles gre za pasivne metode. V to skupino se uvršča na primer stereometoda [5], kakršno pri svoji prostorski zaznavi uporabljamo tudi ljudje. V zadnjo kategorijo spadajo metode z aktivnim osvetljevanjem. Za te je značilno, da je merjeno telo osvetljeno z na nek način strukturiranim svetlobnim vzorcem in da se na podlagi zaznanega dela odbite svetlobe določi oblika telesa. Med te spada tudi optična triangulacija. Njeno uporabnost narekuje enostavna zgradba. Potrebna sta zgolj projektor strukturiranega svetlobnega vzorca, s katerim se osvetljuje površina merjenega telesa, in kamera. Ker kamera zaznava odbito svetlobo z drugega zornega kota, je oblika s kamero posnetega svetlobnega vzorca neposredno povezana z obliko merjenega telesa [6]. Triangulacijske metode se delijo glede na obliko svetlobnega vzorca, ki ga projektor projicira na telo, in sicer na točkovne, linijske in ploskovne

Urban Pavlovčič, študent, doc. dr. Matija Jezeršek, univ. dipl. inž., dr. Aleš Gorkič, univ. dipl. inž., vsi Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo; Hubert Kosler, univ. dipl. inž., Motoman-Robotec, d. o. o., Ribnica, prof. dr. Janez Možina, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

oblike svetlobnega vzorca je odvisno, kako hitro bo potekala meritev, s kakšno natančnostjo bo izmerjeno telo, kolikšen del telesa bo izmerjen in kako kompleksno površino je možno meriti. V primeru točkovnega osvetljevanja potrebujemo za izmero celotne površine telesa neko vrsto premičnega sistema, s katerim premerimo telo od točke do točke po vsej površini. Tudi pri linijskem osvetljevanju je potrebno zagotoviti relativno premikanje merjenca glede na merilnik. Prednost pred točkovnim merjenjem je v enostavnejši mehaniki, saj je potrebno zagotoviti premikanje zgolj v eni smeri, in sicer pravokotno na merjeni profil, s čimer se tudi čas merjenja bistveno skrajša.

V nadaljevanju je predstavljen rotacijski laserski profilomer (RLP), katerega bistvene lastnosti so linijsko osvetljevanje površine z dvema laserskima projektorjema, kjer je eden namenjen za bližnje, drugi pa za oddaljeno merjenje. Merilnik uporablja hitro kamero s sprotnim zaznavanjem profila, s čimer je računalnik močno razbremenjen. RLP je bil razvit za izvajanje natančnih meritev statičnih teles večjih dimenzij, med katere sodi tudi kip, kakršen je opisan v 4. poglavju »primer 3D-izmere kipa Merkurja«.

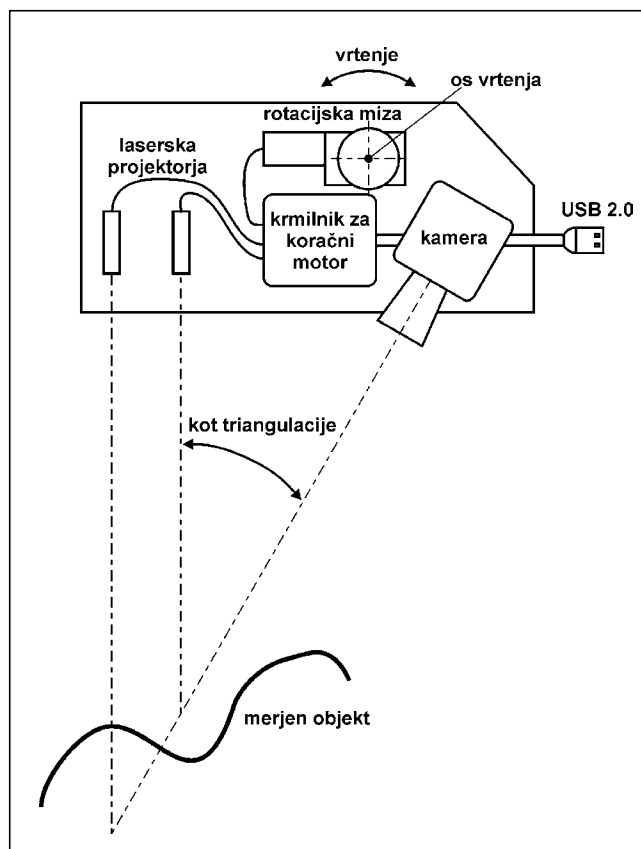
■ 2 Opis 3D-merilnega sistema

Rotacijski laserski profilomer temelji na principu laserske linijske triangulacije in rotacijskem premikanju merilnega modula. Laserski projektor projicira na merjeno površino svetlobno ravnino, ki jo pod kotom triangulacije opazuje kamera. Od reliefa površine je odvisna oblika konture, ki jo vidi kamera. Glede na mesto na senzorju, kamor se slika laserske črte preslika, izračunamo oddaljenost površine od merilnika [7, 8]. Da se izmeri celotna površina telesa, je potrebno zagotoviti relativno premikanje svetlobne ravnine glede na merjeni objekt. V RLP je v ta namen uporabljena rotacijska miza, ki vrta sklop kamere in laserskega projektorja (slika 1).

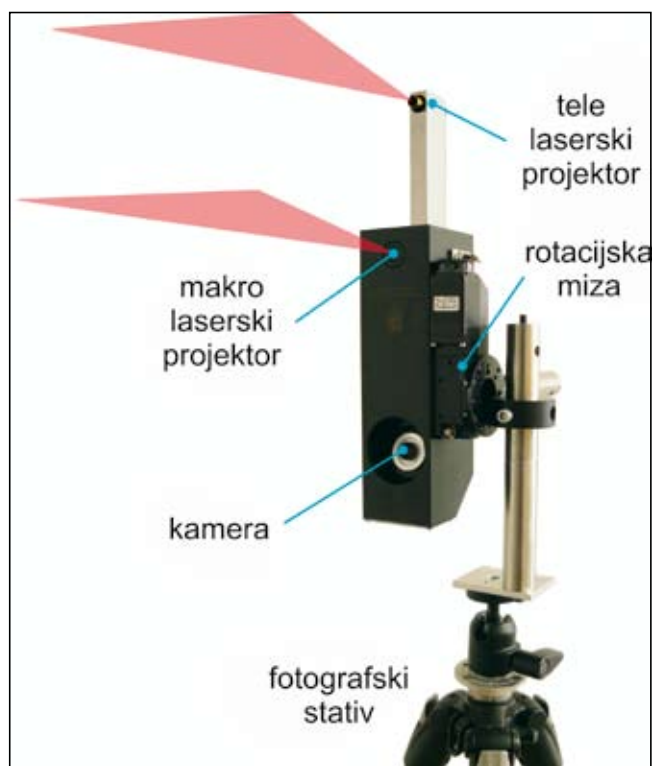
Kot smo omenili že v uvodu, sta v merilniku nameščena dva laserska projektorja, ki omogočata delovanje v dveh merilnih območjih: bližnje

(makro) in daljno (tele). Merilno območje je trapezne oblike in znaša za makro način 210 mm pri razdalji do objekta 330 mm ter 1330 mm pri razdalji 2300 mm. Ločljivost po širini znaša 0,3 mm pri najkrajši razdalji. Za tele način znaša merilno območje 350 mm pri razdalji 550 mm ter 1800 mm pri razdalji do objekta 3300 mm, ločljivost po širini pa znaša 0,45 mm pri najkrajši razdalji do objekta. Razdalja med kamero in projektorjem je 150 mm za makro in 274 mm za tele varianto. Kot triangulacije je v obeh primerih 15°. Senzorski del kamere je glede na optično os objektiv nagnjen tako, da je slika laserskega profila ostra po celotnem merilnem območju [9].

Da bi lahko bistveno povečali hitrost merjenja, je uporabljena kamera Optomotive Cameleon, ki omogoča lokalno procesiranje zajete slike [10]. Takšna kamera bistveno razbremeni komunikacijsko vodilo za prenos signala v računalnik ter zmanjša potrebno procesorsko moč računalnika. Tako sproščene zmogljivosti se uporabijo za hitrejšo generiranje 3D-modelov



Slika 1. Blokovna shema merilnika



Slika 2. Laserski rotacijski profilomer

iz zajetih izmerkov in druge s tem povezane naloge. Tovrsten pristop omogoča, da en računalnik sočasno sprejema podatke z več kamer, kar omogoča hitrejši zajem 3D-oblike

kompleksnih objektov, kakršen je na primer človeško telo.

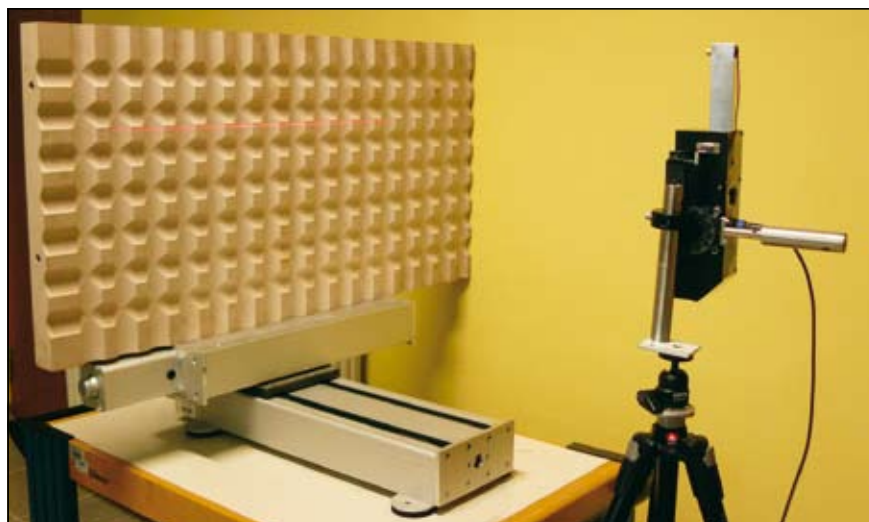
Za potrebe krmiljenja rotacijske mize je kameri prigraden še močnostni del za krmiljenje koračnega motorja. Ločljivost zasuka znaša 4,5 ločne minute, kar je doseženo z uporabo 1/8 mikro korakanja. Jedro, ki krmili motor sinhrono z zajemom slike, je vgrajeno v samo kamero, s čimer je zagotovljena nemotena sinhronizacija rotacije in zajema slike. Posledično je potrebno povezati merilnik z osebnim računalnikom preko enega samega USB-vmesnika.

Konstrukcija merilnika je zasnovana robustno (slika 2). Tako je ohišje, ki služi kot držalo za dva laserska projektorja ter kamero, monolitne sestave. S tem so minimizirane možnosti deformacije optične geometrije, ki bistveno vplivajo na točnost merilnika. Celotni merilni sestav je pritrjen na fotografski stativ, ki omogoča poljubno pozicioniranje merilnega pogleda na merjeni objekt.

■ 3 Umeritev

Postopek umeritve je sestavljen iz zajema referenčne geometrije in izračuna parametrov preslikave, kot so lega in orientacija kamere glede na globalni koordinatni sistem, lega in orientacija projektorja glede na kamerin koordinatni sistem ter notranje lastnosti kamere in projektorja, kot so goriščna dolžina objektiva, kotna porazdelitev vzorca strukturirane svetlobe ter popačitve objektiva in projektorja.

Nekatere rešitve umerjanja temeljijo na ločenem umerjanju najprej kamere in nato celote (sestav kamera-projektor), pri čemer se pri umerjanju kamere uporabljajo ravne plošče, na katerih so narisani različni vzorci, kot na primer šahovnica, mreža, križci, krožci itd., katerih robovi oziroma središča predstavljajo referenčne točke [11]. Druga skupina rešitev temelji na enovitem postopku umerjanja celotnega sistema [12]. Referenčna telesa imajo jasno izražene vrhove oziroma referenčne točke, ki jih je možno določiti tako v 3D-prostoru kakor



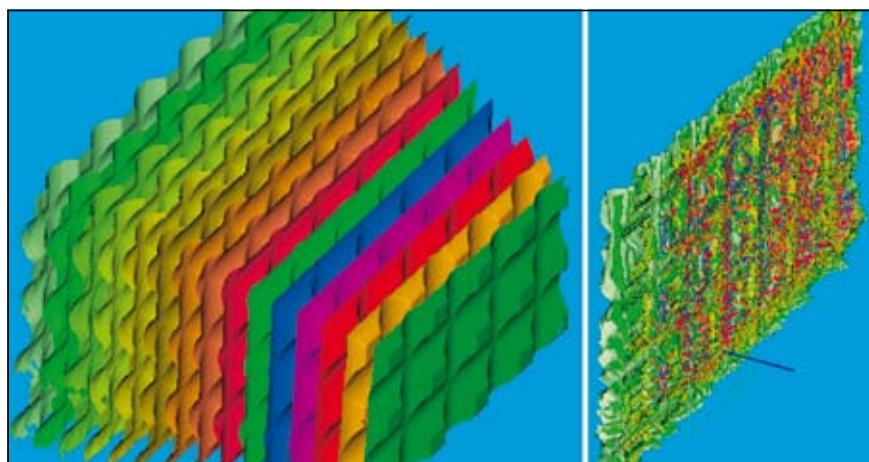
Slika 3. Umerjanje laserskega rotacijskega profilomera

tudi na 2D-sliki kamere. Skupna pomanjkljivost navedenih rešitev je predvsem v tem, da za določitev neznanih parametrov modela preslikave potrebujejo znane koordinate referenčnih točk.

V našem postopku se namesto referenčnih točk za izračun neznanih parametrov modela preslikave uporabi celotna površina referenčnega telesa, izmerjena na enak način kot v primeru merjenja poljubnega telesa. Parametri modela preslikave se izračunajo z optimizacijskim postopkom iskanja minimalnega odstopanja med izmerjeno ter dejansko površino referenčnega telesa. Vnaprej poznana geometrija merjene površine referenčnega telesa je takšna, da se ob vsakršni variaciji kateregakoli parametra modela preslikave spremeni

tudi odstopanje med izmerjeno ter dejansko površino. Prednost takšne rešitve je predvsem v enostavnejši izvedbi meritve, saj je postopek enovit in se uporabljajo enake nastavitve delovanja merilnika kakor med običajnim merjenjem.

Slika 3 prikazuje RLP med merjenjem referenčnega telesa. Referenčna površina telesa je periodično reliefna v dveh medsebojno pravokotnih smereh, oblika utorov je polkrožna. Orientacija baznih vektorjev globalnega koordinatnega sistema je takšna, da sta osi x in y vzporedni z vertikalnimi oziroma horizontalnimi utori. Pomična miza premika referenčno telo vzdolž z -osi koordinatnega sistema, s čimer je doseženo, da so upoštewane točke po celotni globlini merilnega območja.



Slika 4. Levo: izmerjene površine referenčnega telesa. Desno: 10-kratna povečava odstopkov izmerjenih površin po končanem izračunu parametrov preslikave.

Na *sliki 4* levo so prikazane izmerjene referenčne površine za primer umerjanja makro konfiguracije. Različna obarvanost površin prikazuje različno pozicijo površine vzdolž z-osi. Na desni strani slike 4 pa so prikazani odstopki izmerjenih točk. Standardna deviacija teh odstopkov znaša 0,2 mm. S slike je razvidno, da so odstopki enakomerno razporejeni po celotni površini, njihova amplituda pa je pretežno pod pragom šuma.

■ 4 Primer 3D-izmere kipa Merkurja

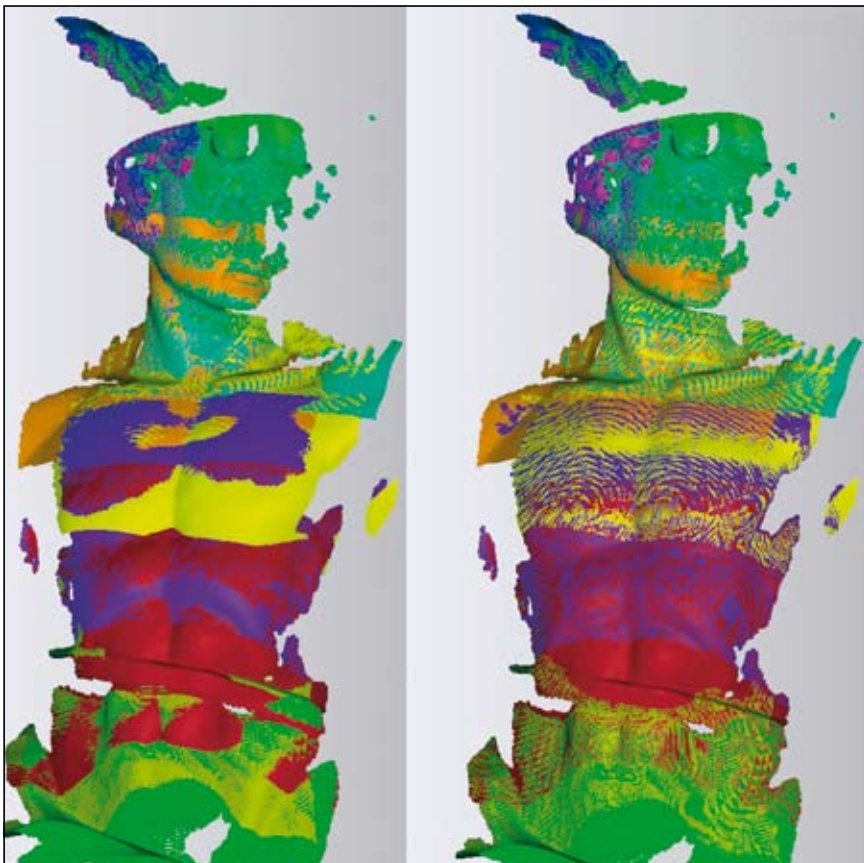
V nadaljevanju je prikazana uporaba rotacijskega laserskega profilomera na primeru kipa Merkurja, ki ga je bilo potrebno v celoti tridimenzionalno izmeriti. Sam kip stoji na vhodnem pročelju palače Urbanc (bivši Centromerkur). Merkur, rimski bog trgovine in zaščitnik trgovcev, se opira na balo blaga s kaducejem v desnici in z levico vabi mimoidoče k nakupovanju [13] (*slika 5*). Gabariti kipa znašajo 3,5 x 2 x 1,5 m (višina x širina x globina), njegov relief pa je precej razgiban, podobno kot Areška Miner-

va, medtem ko so Michaelangelovi kipi in tajvanski templji bolj razgibani, predvsem v detajlih, kot so lasje, ornamenti ipd. [1–4].

3D-izmera kipa je potekala v hali restavratorskega centra, kjer so izdelovali novo repliko. Zaradi velike višine je bilo potrebno uporabiti premični oder, s katerega pomočjo smo lahko izmerili vrhnje predele. Strategija izmere celotne oblike je narekovala merjenje delnih površin pri različnih višinah stojala in nagibnih kotih merilnika glede na vodoravnico.



Slika 5. Fotografija kipa Merkurja, stoječega na pročelju palače Urbanc [http://sl.wikipedia.org]



Slika 6. Sestav pred globalno registracijo (levo) in po njej (desno)

Na tak način je bil v prvih dveh dneh kip izmerjen s približno 300 različnih perspektiv. Po uvodnem pregledu meritev se je ugotovilo, da so nekateri deli kipa pomanjkljivo izmerjeni, zato so se tretji dan opravile meritve še manjkajočih pogledov. Tako je bilo skupno narejenih približno 350 delnih meritev. Celoten kip je bil izmerjen z okoli 16,5 milijona točk oziroma z okoli 32 milijoni trikotnikov!

Ker med postopkom zajema delnih meritev nismo beležili trenutnega položaja merilnika glede na skupni koordinatni sistem, je bilo po koncu merjenja potrebno izvesti medsebojno poravnavo (ang.: registration). To je bilo storjeno s pomočjo programskega orodja Geomagic [14]. Najprej so se poravnale meritve z istega pogleda (položaja stojala), ki so se nato sestavljale z že poravnanimi meritvami sosednjih pogledov. Poravnava dveh meritev je najprej izvedena ročno, tako da se izbere nabor istoležnih točk. Ko je določeno število meritev medsebojno ročno poravnanih, se izvede še globalna poravnava, ki natančno poravnava celotno množico



Slika 7. Postopek krpanja lukenj

meritev tako, da minimizira medsebojno odstopanje med vsemi meritvami (slika 6).

Opisani postopek poravnave se nato ponavlja, dokler ni sestavljena celotna zelena površina. Ker so se sestavljale meritve kipa človeškega telesa, se je zahtevnost precej spreminjala glede na to, kateri del se je sestavljal. Najenostavnejši je bil zaradi svoje reliefnosti obraz. Največje težave pa so bile pri sestavi leve roke, saj na njej ni izrazitih sprememb oblike površine. Ker pa se je to predvidelo že v fazi izvajanja meritev, se je na roko postavilo več polkrožnih točk iz sveže glin, ki so služile za orientacijo pri določanju istoležnih točk. V kasnejši fazi obdelave 3D-meritve so se ti »izrastki« izrezali, luknje pa zakrpale. Poravnave so se torej začele z več koncev, nato pa so se ti sestavi združevali. Zato se je še posebej pa-

zilo, da so bile posamezne poravnave opravljene čim bolj natančno. V nasprotnem primeru bi v nadaljnjem postopku prihajalo do prevelikih odstopanj. Da bi se temu izognili, se je pri obeh načinih poravnave vseskozi nadzorovala vrednost standardne deviacije. Ta je ob prvih sestavljanjih znašala okoli 0,30 mm, ob koncu pa je narasla na okoli 1,00 mm.

Kljub vsemu trudu pri izvajanju meritev pa so še vedno ostali neizmerjeni deli kipa, kot so npr. vrh glave (teme) in zavihki obleke z negativnimi koti. Na teh delih smo površino sklenili s pomočjo orodij programskega paketa, ki omogoča krpanje lukenj (slika 7). V nadaljevanju je sledilo redčenje točk na tak način, da se je gostota točk prilagodila ukrivljenosti površine. Tako je kip Merkurja popisan z 0,5 milijona točk oziroma 1 milijonom trikotni-

kov. Končni rezultat izmere je prikazan na sliki 8.

5 Zaključek

Za potrebe tridimenzionalnega merjenja objektov večjih dimenzij je bil razvit laserski rotacijski profilomer. Bistvene karakteristike merilnika so veliko merilno območje, ki je doseženo z uporabo dveh laserskih linijskih projektorjev. Za hitrejši zajem meritev je uporabljena kamera z vgrajenim programirljivim slikovnim procesorjem, ki bistveno razbremeni komunikacijsko vodilo in procesor računalnika. Prikazan je postopek umerjanja, ki temelji na izmeri referenčnega telesa znane geometrije. Nadalje je opisan primer uporabe merilnika na praktičnem primeru – neobaročnem kipu Merkurja z dimenzijami 3,5 x 2 x 1,5 m. Na primeru smo ugotovili, da sta merilnik in njegova umeritev dovolj natančna, da je meritve mogoče medsebojno poravnati in pri tem doseči medsebojno ujemanje delnih površin, ki je manjše od 1,2 milimetra. Če bi bila natančnost premajhna, poravnava ne bi bila mogoča. Za natančno poravnavo je nadalje potrebno izvajati meritve z medsebojnim prekrivanjem, ki mora biti vsaj 20-odstotno.

Za še hitrejše in enostavnejše 3D-izmere velikih objektov bo v prihodnje potrebno razviti merilnika s še večjim merilnim območjem, kar bo posledično pomenilo manjše število potrebnih meritev in krajši čas obdelave meritev.

Literatura

- [1] Levoy, M., Pulli, K., Curless, B., Rusinkiewicz, S., Koller, D., Pereira, L., Ginzton, M., Ander-



Slika 8. Končni rezultat 3D-izmere kipa Merkurja

- son, S., Davis, J., Ginsberg, J., Shade, J., Fulk, D., *The Digital Michelangelo Project: 3D scanning of large statues*, SIGGRAPH 2000 Proceedings (2000).
- [2] Fontana, R., Greco, M., Materazzi, M., Pampaloni, E., Pezzati, L., Rocchini, C., Scopigno, R., *Three-dimensional modelling of statues: the Minerva of Arezzo*, *Journal of Cultural Heritage* 3, 325–331 (2002).
- [3] Gaiani, M., Balzani, M., Uccelli, F., *Reshaping the coliseum in Rome*, *Computer Graphics Forum* 19 (3), 369–378 (2000).
- [4] Shih, N. J., Wang, H. J., Lin, C. Y., Liao, C. Y., *3D scan for the digital preservation of a historical temple in Taiwan*, *Advances in Engineering Software* 38, 501–512 (2007).
- [5] Cyganek, B., Siebert, J. P., *Introduction to 3d Computer Vision Techniques and Algorithms*, John Wiley & Sons (2009).
- [6] Jezeršek, M., *Laserski sistem za tridimenzionalno merjenje hitro spreminjajoče se oblike teles: doktorsko delo*, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, Doktorske disertacije, Ljubljana (2004).
- [7] Kramer, J., Seitz, P., Baltes, H., *Inexpensive range camera operating at video speed*, *Applied Optics*, 32(13), 2323–2330 (1993).
- [8] Perdan, B., Bračun, D., Diaci, J., Možina, J., *Online assessment of power transmission belt geometry by using laser triangulation and profile parameterisation*, *Int. j. adv. manuf.technol.* (2009).
- [9] Jacobson, R., Ray, S., Axford, N., Attridge, G. G., *The Manual of Photography*, Elsevier Science & Technology Books (2000).
- [10] Gorkič, A., Bračun, D., Diaci, J., *Razvoj kamere z vgrajenim programirljivim slikovnim procesorjem*, *Ventil*, 15(3), 246–252 (2009).
- [11] Zhang, G., Wei, Z., *A novel calibration approach to structured light 3D vision inspection*, *Optics & Laser Technology*, 34, 373–380 (2002).
- [12] Notni, G., Kuehmstedt, P., Schreiber, W., *Device for non-contact measurement of the surface of a three dimensional object*, United States Patent, US6055056 (2000).
- [13] Režek Kambič, M., *Smernice za restavriranje secesijske palače Urbanc*, *Zavod za varstvo kulturne dediščine Slovenije – OE Ljubljana* (2007).
- [14] Geomagic, *Geomagic Shape Studio 11 Interactive User Guide*, Geomagic Inc. (2009).

Three-dimensional scanning of objects of cultural heritage with a rotational laser profilometer

Abstract: The paper describes development and the use of the rotational laser profilometer, which bases on the principle of laser triangulation. By using two laser projectors, we gain possibility of measuring of close (macro) and distant (tele) objects. The measuring system uses a camera with built-in programmable image processor, which essentially saves the computer processing power and communication bandwidth. Calibration is based on measurement of the reference surface. Measuring system was developed to measure large object, like objects of cultural heritage. In the paper is presented an example of measuring the statue of the Mercury, witch's size is about 3.5 x 2 x 1.5 m. It was measured from 300 views. Partial measurements were arranged by using the Geomagic software. The achieved overall precision was 1.2 mm.

Keywords: three-dimensional scanning, 3D, profilometry, surface digitalization, laser triangulation, cultural heritage, Geomagic, smart camera



INTRONIKA
 Mednarodni strokovni sejem za profesionalno elektroniko
 International Trade Fair for professional electronic
26.-28.01.2011
 Celje, Slovenia, intronika@icm.si, www.intronika.si