

3D DOKUMENTACIJA ARHEOLOŠKIH PREDMETOV

Seta ŠTUHEC
(Univerza v Ljubljani)

Uvod

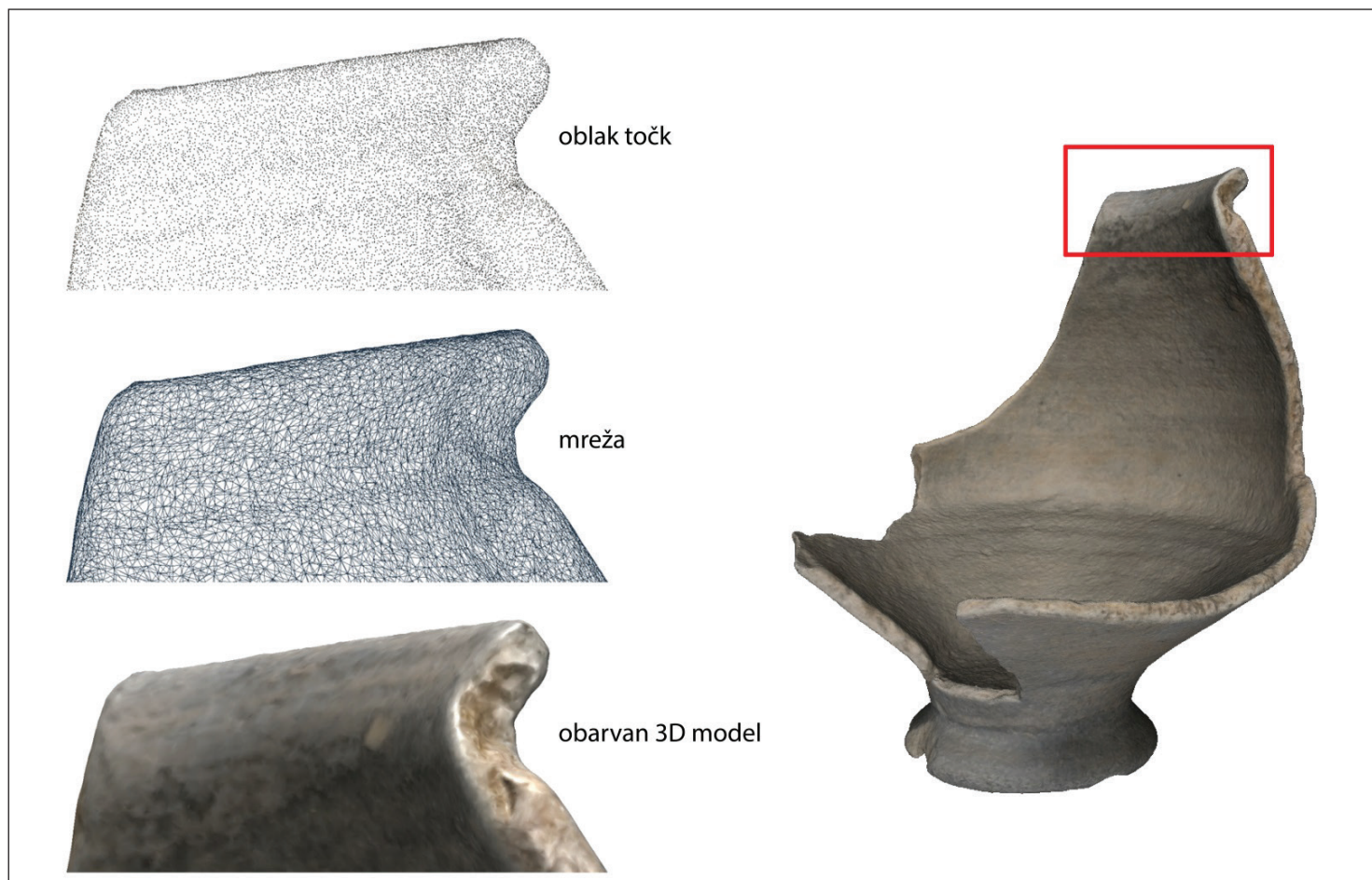
Arheološka praksa pozna več načinov dokumentiranja predmetov, od besedilno-opisnih do vizualnih. Predvsem slednji so nepogrešljiv del dokumentacije, predstavitve in tudi proučevanja arheoloških predmetov. Tradicionalnim tehnikam, risbi in fotografiji, se zaradi večje dostopnosti v zadnjem času vedno pogosteje pridružuje tudi zajemanje podatkov o predmetu v vseh treh geometričnih razsežnostih. Tehnološki razvoj ni omogočil le cenovne dostopnosti naprav in programske opreme, potrebne za tovrstno dokumentacijo, temveč so slednje postale tudi bolj prijazne do uporabe, saj ni potrebno poglobljeno računalniško in fotogrametrično znanje ni potrebno. V nadaljevanju bomo predstavili dva glavna načina tridimenzionalne (3D) digitalizacije predmetov in obravnavali njune prednosti in pomanjkljivosti v okviru dokumentiranja, predstavitve in raziskovanja predmetov.

3D digitalizacija predmetov

Poznamo več tehnik s pomočjo katerih lahko določen predmet, strukturo ali celotno pokrajino predstavimo v tridimenzionalnem virtualnem okolju tako, da jih definiramo z množico točk postavljenim v kartezijanskem koordinatnem sistemu (x, y, z) (Slika 1, Štuhec 2012, 46). Prva skupina so t. i. aktivne tehnike, ki 3D podatke zajemajo s pomočjo posebnih naprav, ki oddajajo različne žarke

(npr. laserske žarke in strukturirano svetlobo). Druga skupina so pasivne tehnike, ki podatke zajemajo v naravnem okolju brez dodatnih emisij (Pezzati, Fontana 2008). Ker 3D digitalizacija arheoloških predmetov zahteva visoko natančnost, vse tehnike zajema zanjo niso primerne. Od aktivnih tehnik, sta najprimernejši 3D lasersko skeniranje na podlagi triangulacije in skeniranje s strukturirano svetlobo. Najpripravnije pasivne tehnike pa omogočajo izdelavo 3D modelov iz zbira prekrivajočih se fotografij predmeta na podlagi fotogrametričnih postopkov in algoritmov računalniškega vida združenih v celosten programski paket (Štuhec 2012, 90).

3D skenerji, ki so primerni za izmero predmetov in manjših arhitekturnih elementov, se med seboj razlikujejo na podlagi delovanja, cene, resolucije, zajema teksture in premičnosti (statični ali ročni). Triangulacijski laserski skenerji oddajajo laser v obliki linijske ali točkovne projekcije, ki se po odboju od obravnavanega predmeta ujame v senzor skenerja. Programska oprema nato na podlagi trigonometrije simultano izračuna razdaljo med določeno točko na predmetu in skenerjem (Slika 2). Na drugi strani 3D skenerji, ki oddajajo strukturirano svetlobo (belo ali modro) temeljijo na izračunu deformacij v vzorcu svetlobe. Skener na predmet projicira serijo linearnih impulzov, ki glede na reliefne značilnosti predmeta spreminjajo svojo obliko (Abdel-Bary Ebrahim 2011, 17ss). Obe vrsti imata prednosti in pomanjkljivosti. Laserski žarek drsi po



Slika 1. Oblak, mreža in obarvan 3d model (Štuhec 2012, 46).

predmetu le enkrat, medtem ko skener na belo svetlobo isti predel predmeta osvetljuje večkrat, zaradi česar je slednji tudi bolj točen. Iz istega razloga bi lahko pričakovali, da je laserski skener hitrejši, vendar hitri procesorji skenerjem na belo svetlobo omogočajo zelo hiter zajem

podatkov (tudi do več kot milijon točk na sekundo) in so zato pogosto uporabljeni pri skeniranju, ko primerek težko ostane popolnoma pri miru (npr. skeniranje obrazov). Po drugi strani pa se laserski skenerji izkažejo za natančnejše in tudi hitrejše pri skeniranju majhnih detajlov

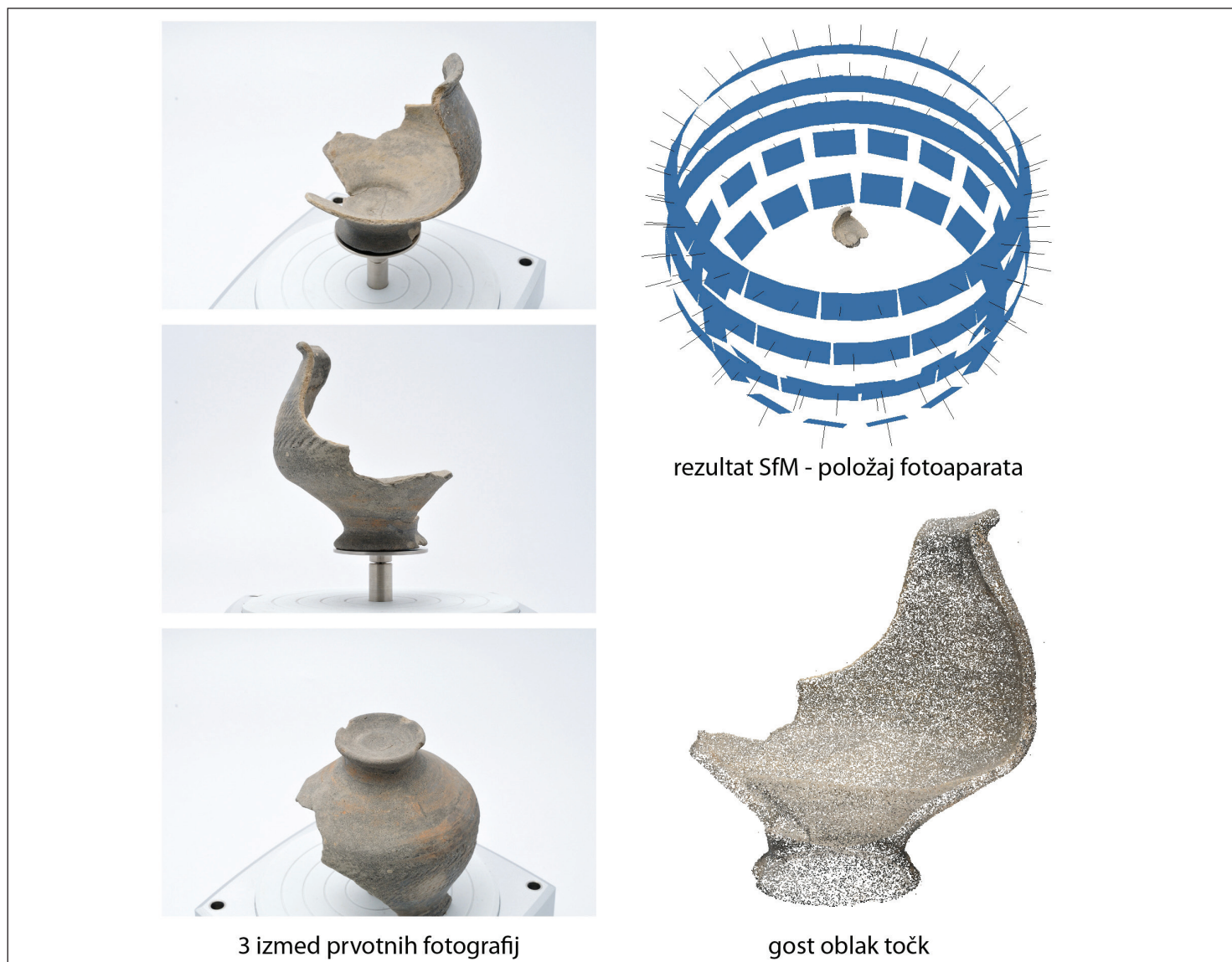
(kot so npr. razpoke in druge nadrobnosti na predmetu). Kljub težavam se laserski skenerji lažje spopadejo s skeniranjem svetlečih predmetov, medtem ko je to za skenerje na belo svetlobo skorajda nemogoče. Prav tako lahko z laserjem lažje skeniramo v okolju z neugodno osvetlitvijo, medtem ko so skenerji z belo svetlobo omejeni z jakostjo žarnice in stopnjo kontrasta projektorja, kar pa lahko oteži delo na prostem. Pri uporabi laserskih skenerjev je potrebna pazljivost, saj je laser lahko škodljiv za oči, medtem ko te nevarnosti pri skenerjih, ki delujejo na belo ali modro svetlobo ni, saj uporabljena svetloba ni tako intenzivna (Khan 2011). Na podoben način delujejo tudi igralne konzole namenjene zaznavanju gibanja kot je Microsoftov Kinect za Xbox360, le da te namesto strukturirane svetlobe oddajajo infrardeče pulze. Tovrstne naprave zato prav tako omogočajo izdelavo 3D modelov (Bachfeld et al. 2012, 89). Za arheologe so zanimive predvsem zaradi cenovne dostopnosti, a za enkrat ta način še ni dovolj na-



Slika 2. Model figurice iz Muzeja grada Lošinja.

tančen, da bi bil primeren za arheološko dokumentacijo artefaktov. Cenovni okvir 3D skenerjev je sicer zelo širok, od sto tisoč evrov za visoko resolucijske skenerje do nekaj sto evrov za opremo, ki jo lahko sami sestavimo v 3D skener (npr. DAVID skener). Od cene je navadno odvisna tudi resolucijska zmogljivost in možnost zajema teksture. Nekateri skenerji namreč posnamejo tudi fotografije in jih projicirajo na 3D model. V kolikor skener ne vsebuje kamere, lahko fotografije posnamemo sami in jih na model projiciramo naknadno.

Tudi sicer je treba upoštevati, da se izdelava 3D modela ne konča pri skeniranju, temveč je potrebna še naknadna obdelava podatkov, ki je namenjena optimizaciji 3D modela oz. poravnavi in spajanju posameznih skenov, zapolnjevanju morebitnih lukenj, odstranjevanju šuma ipd. Za takšno optimizacijo pa je navadno potrebna dodatna programska oprema, ki se ponovno giba med odprtokodnimi in prosto dostopnimi ter plačljivimi možnostmi. Z izračunom 3D podatkov iz zbira prekrivajočih se fotografij se ukvarjata dve znanstveni vedi, fotogrametrija in računalniški vid. Z razvojem digitalnega zapisa je postalo mogoče združevanje in prenos algoritmov in konceptov med obema vedama. Računalniški programi lahko na ta način danes prepoznajo, povežejo in preoblikujejo značilnosti slike v trirazsežnostne elemente v objektnem prostoru (Cooper, Robson 2001, 9). Da lahko program izračuna 3D koordinate iz zbira fotografij, potrebuje natančne podatke o zunanji (položaj in orientacija fotoaparata) in notranji (notranja geometrija fotoaparata v času osvetlitve; goriščna razdalja, distorzija objektiva...) orientaciji fotoaparata. Prednost programov, ki temeljijo na konceptih računalniškega vida se kaže predvsem v avtomatičnem izračunu teh parametrov (algoritem se imenuje



Slika 3. Izdelava 3D modela iz prekrivajočih se fotografij (Štuhec 2012, 53).

oblika iz gibanja, angl. *Structure from Motion*, SfM), ki močno olajšajo delo na terenu in naknadno obdelavo, saj fotoaparata ni potrebno predhodno kalibrirati (Hartley, Zisserman 2008, xiii). SfM algoritem temelji na primerjavi določenih točk, ki so značilne za neko sliko. Vsako točko program opiše tako, da lahko na podlagi opisa poišče ujemajoče se točke na preostalih fotografijah. Na podlagi tega program določi določi relativno projekcijsko geometrijo (t. j. zunanji in notranji parametri fotoaparata) in tvori redek oblak točk (Verhoeven et al. 2012).

Za izračun gostejšega oblaka točk se uporablja algoritem Multi-View Stereo (MVS), ki je nato povezan v mnogokotniško mrežo oz. 3D model (Robertson, Cipolla 2009) (Slika 3, Štuhec 2012, 53). Ker je temelj izračunov primerjava značilnosti teksture na sliki, vsi predmeti niso primerni za uporabo te tehnike. To so npr. enobarvni predmeti z enolično teksturo in tudi svetleči predmeti (kovinski, stekleni), saj vidno odsevajo svetlobo, ki se venomer spreminja. Najboljši rezultat je tako mogoč pri predmetih z ostrimi barvnimi mejami (Fellner et al. 2011, 98) in tudi s pravilno posnetimi fotografijami. Do nedavnega je veljalo, da morajo biti fotografije posnete vsakokrat iz druge lokacije, da bi zagotovile pravičen izračun zunanjih parametrov. Najnovejše objave pa predlagajo fotografiranje poleg standardnih slik (t. j. kot 90 stopinj v horizontalni in vertikalni smeri na predmet iz različnih položajev) tudi konvergentno slikanje. To pomeni, da je priporočljivo posneti več slik iz istega položaja, da dosežemo efekt panoramske fotografije (Wenzel et al. 2013; Nocerino et al. 2014). Posnete fotografije se morajo prekrivati v vsaj 60%, vendar 80% prekrivanje navadno prinese boljše rezultate. Ker tako lahko rekonstruiramo le tiste dele predmeta, ki so vidni na vsaj treh slikah, je pomembno, da jih posnamemo iz čim več možnih položajev.

Izdelavi 3D modelov iz zbira fotografij je namenjenih več računalniških programov in internetnih storitev. Njihova uporaba ne zahteva poglobljenega predznanja, kljub temu pa se je potrebno zavedati principov delovanja in s tem njihovih prednosti in omejitev. Najpreprostejše za uporabo so internetne storitve kot je npr. ARC3D (Tingdahl et al. 2012), ki od uporabnika zahtevajo le naložitve slik, vse ostalo poteka avtomatično. Tak postopek je sicer zelo preprost za uporabo, vendar ne omogoča veliko manevrskega prostora za izpopolnjevanje postopka (število in poravnava slik, natančnost ipd.). Poleg prosto dostopnih storitev so na internetu na voljo tudi plačljive, ki navadno omogočajo večjo fleksibilnost. Poleg storitev so dostopni tudi programski paketi (prosto dostopni in plačljivi), ki omogočajo največji nadzor nad celotnim procesom in končnim rezultatom. Rezultat nekaterih storitev in programov je v nekaterih primerih le oblak točk, drugi programi ponujajo možnost izdelave mnogokotniške mreže in teksture, tretji omogočajo tudi georeferenciranje in dodatno optimizacijo končnega izdelka (zapolnjevanje lukenj, odstranjevanje šuma ipd.). V kolikor tako dobljeni 3D modeli niso georeferencirani, moramo tudi metrične podatke vnesti naknadno. V arheologiji najpogosteje uporabljen program za takšno izdelavo 3D modelov je Photoscan iz ruskega podjetja Agisoft (npr. De Reu et al. 2013) (Tabela 1, Štuhec 2012, 92).

Diskusija

3D digitalizacija je gotovo najcelovitejši način dokumentiranja arheoloških predmetov, saj vsebuje ne le geometrične, temveč tudi teksturne značilnosti predmeta. Izbira postopkov in naprav zajema in obdelave podatkov pogojuje natančnost in kvaliteto 3D modela. Tehnike

lahko izbiramo glede na vrsto predmeta (material, velikost ipd.), namen izdelave, potrebno hitrost in finančna sredstva. Za izdelavo 3D modelov enobarvnih predmetov bomo tako raje uporabili 3D skeniranje kot fotogrametrične postopke. Bleščečih predmetov ni lahko digitalizirati z nobeno metodo, zato se na površino nanašajo tanke plasti prahu ali pa se jih v celoti prebarva, vendar pa ta postopek za večino arheoloških predmetov ni primeren. Trenutno tudi še ni pravih rešitev za 3D digitalizacijo steklenih predmetov, ne da bi jih pri tem poškodovali z barvanjem. Po drugi strani se 3D digitalizacija na podlagi fotografij odreže bolje v izdelavi texture, saj se fotoaparati vgrajeni v skenerje ne morejo primerjati z ročnimi. Natančna tekstura je pomembna predvsem takrat, kadar je 3D model namenjen predstavitvi predmeta. Fotografije so na 3D model lahko nanesene tudi naknadno, vendar ta postopek ni povsem natančen, hkrati pa zahteva več obdelovalnega časa in znanja. Tudi sicer izdelava 3D modelov s pomočjo skeniranja zahteva nekoliko več znanja za obdelavo podatkov, saj so SfM in MVS postopki bolj avtomatizirani. Slednji se v idealnih razmerah (programska oprema, zmogljivost strojne opreme in znanje uporabnika) po natančnosti lahko kosajo s 3D skenerji srednjega cenovnega ranga, hkrati pa so cenovno bolj ugodni. Njihova pomanjkljivost pa je čas, saj je za izračun podrobnega 3D modela potrebnih več ur, lahko tudi dni (odvisno od števila in kvalitete fotografij ter zmogljivosti strojne opreme).

V kolikor sta oprema, postopek in naknadna obdelava podatkov korektna, je proučevanje 3D modela skoraj takšno, kot da bi imeli artefakt pred sabo, le otipati ga ne moremo. Jasno je, da 3D model ne more nadomestiti fizičnega predmeta, vendar pa omogoča proučevanja predmeta na drugačen način, kot ga nudi fizični predmet.

Dobljene 3D modele lahko obravnavamo kot digitalne nadomestke pravih predmetov, ki ne služijo le dokumentiranju, temveč tudi analizam, predstavitev in posredovanju arheoloških predmetov. S pomočjo izgradnje internetnih 3D baz podatkov postanejo predmeti dostopni širši množici raziskovalcev in tudi javnosti. Tako si lahko ogledamo predmete, ki bi se sicer skrivali v depojih muzejev, bili od nas preveč oddaljeni ali pa tako krhki, da bi jih s fizičnim stikom poškodovali. Na ta način lahko lažje manipuliramo tudi z zelo velikimi ali zelo majhnimi predmeti, izdelamo pa lahko tudi manjše ali večje replike. 3D modeli artefaktov so tako uporabni v samih muzejih kot tudi za izgradnjo virtualnih muzejev in hkrati pa lahko služijo kot podlaga za virtualne rekonstrukcije preteklosti.

3D modeli artefaktov pa niso uporabni samo na področju ilustracije in dokumentacije, temveč služijo tudi znanstvenim raziskovanjem. Mnoga orodja namreč omogočajo podarjanje reliefnih značilnosti modela (primarno sta to spreminjanje osvetlitve in barve, obstaja pa tudi več drugih algoritmov, npr. (Kolomenkin et al. 2011). Raziskovalci se jih poslužujejo za poskuse izračuna klasifikacijskih parametrov (Grosman et al. 2008; van der Maaten et al. 2006), računalniško sestavljanje manjših ali večjih ujemajočih se delcev (Koller et al. 2006) in drugo. 3D model je tako nepogrešljivo orodje ne le za dokumentacije, temveč tudi za interpretacijo arheoloških predmetov. V zaključenem poteku arheološkega dela se risba, fotografija in 3D model lahko dopolnjujejo. Ne nazadnje je pri fotogrametričnem postopku izdelave 3D modela osnova prav digitalna fotografija. Ta je lahko tudi naknadno projicirana na 3D model, saj lahko nudi veliko boljšo teksturo, kot jo dajo 3D skenerji. Fotografije, uporabljene za izdelavo samega 3D modela ali le njegove texture, so lahko poleg pod navadno (vidni spekter),

Ime	Vrsta	Produkt	Spletno mesto (dostopno 16. 10. 2012)
ARC3D	Brezplačna internetna storitev	Mnogokotniška mreža (angl. <i>polygon mesh</i>)	http://www.arc3d.be/
3Defining	Brezplačna internetna storitev	Mnogokotniška mreža	http://www.3defining.com/
CMP SfM Web Service	Brezplačna internetna storitev	Mnogokotniška mreža	http://ptak.felk.cvut.cz/sfmservice/
123D Catch	Brezplačna internetna storitev	Mnogokotniška mreža	http://www.123dapp.com/
My 3D scanner	Brezplačna internetna storitev	Mnogokotniška mreža	http://www.my3dscanner.com/
PHOV	Plačljiva internetna storitev	Mnogokotniška mreža	http://www.phov.eu
PhotoSynth	Brezplačna internetna storitev	(redek) oblak točk	http://photosynth.net/
PhotoSynth Toolkit	Brezplačen program	Oblak točk	http://www.visual-experiments.com
3DF Samantha	Brezplačen program	(redek) oblak točk	http://www.3dflow.net
VisualSfM	Brezplačen program	Oblak točk	http://www.cs.washington.edu/homes/ccwu/vsfm
Bundler	Brezplačen program	Oblak točk	http://phototour.cs.washington.edu/bundler/
PhotoModeler	Plačljiv program	Mnogokotniška mreža	http://www.photomodeler.com/
Photoscan	Plačljiv program	Mnogokotniška mreža	http://www.agisoft.ru/products/photoscan/
Acute3D	Plačljiv program	Mnogokotniška mreža	http://www.acute3d.com/

Tabela 1. Pregled najbolj razširjenih programov za 3D modeliranje.

posnete tudi pod ultravijolično ali infrardečo svetlobo (Dietz et al. 2011). Vse podatke, ki nam jih nudita fotografija in 3D model, lahko nato strnemo v natančnejšo risbo (bodisi na papirju bodisi digitalno s pomočjo računalniških aplikacij), ki tako zopet predstavlja novo interpretacijo arheološkega artefakta.

Zaključek

Z razvojem tehnologije je postala 3D digitalizacija cenovno dostopna ter hkrati tudi enostavnejša za uporabo, kar je povzročilo velik porast uporabe teh tehnik tudi za potrebe arheološke dokumentacije tako predmetov kot

tudi arheoloških izkopavanj, arhitekture in pokrajin. Ker pa je tovrstno dokumentiranje še v začetnih fazah razvoja in prilagoditve potrebam arheološke metodologije, obstaja precej velik prostor za izboljšave. V prvi vrsti se pojavljajo vprašanja, ki pestijo digitalno komponento 3D dokumentacije. Med množico različnih formatov za zapis 3D modela se pojavlja vprašanje katerega izbrati, da bo prepoznaven čim večjemu številu programov in se bo ohranil tudi za naslednje generacije. Prav tako je njegov prikaz možen le v digitalni obliki preko računalnika, kar onemogoča tiskano objavo. Na drugi strani postopki v okviru arheološke metodologije še niso standardizirani in vpeljeni v vsakdanji arheološki delovni tok, prav tako še niso postavljeni standardi kvalitete 3D modelov. Le z razrešitvijo zgornjih vprašanj ter večanjem dostopnosti in poznavanja 3D digitalizacije, bomo lahko tudi v arheologiji bolje izkoristili njen potencial.

BIBLIOGRAFIJA

ABDEL-BARY EBRAHIM, M. (2011), 3D laser scanners: history, applications, and future. Review article. Assiut, <http://www.scribd.com/doc/78617189/3D-Laser-Scanner-Article-Review>.

BACHFELD D., KÖNIG P. and ZOTA V. (2012), Kopieren in 3D. Räumlich scannen mit Digitalkamera, Kinect oder Laser-Scanner. *c't magazin für computer technik* 11, 2012, 86–91.

COOPER M. A. R. and ROBSON S. (2001), Theory of close range photogrammetry. In: *Close range photogrammetry and machine vision*, (Ed: K. B. Atkinson). [New ed.] Caithness, Whittles 2001, 9–51.

DE REU J., Plets G., VERHOEVEN G., DE SMEDT Ph., BATS M., CHERRETTÉ B. et al. (2013), Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological heritage. *Journal of Archaeological Science* 40 (2), 2013, 1108–1121.

DIETZ C., CATANZARITI G. and JIMENO A. (2011), Infrared Reflectography Using 3D Laser Scanning. *E-conservation magazine* 18, 2011, 32–42, <http://www.e-conservationonline.com/content/view/982>

FELLNER D. W., HAVEMANN, S., BECKMANN, Ph. and PAN, X. (2011), Practical 3D Reconstruction of Cultural Heritage Artefacts from Photographs – Potentials and Issues. *Virtual Archaeology Review* 2 (4), pp. 95–103.

GROSMAN L., SMIKT O. and SMILANSKY U. (2008), On the application of 3-D scanning technology for the documentation and typology of lithic artifacts. *Journal of Archaeological Science* 35 (12), p2008, 3101–3110.

HARTLEY R. and ZISSERMAN A. (2008), *Multiple view geometry in computer vision*. 2nd ed., 5th printing. Cambridge, Cambridge University Press 2008..

KHAN N. (2011), 3D Scanners: Laser versus White Light, <http://blog.3d3solutions.com/bid/78439/3D-Scanners-Laser-versus-White-Light>.

KOLLER D., TRIMBLE J., NAJBBERG T., GELFAND N. and LEVOY M. (2006), Fragments of the city: Stanford's Digital Forma Urbis Romae Project. *J. Roman Archaeol. Suppl.* 61, 2003, 237–252.

KOLOMENKIN M., SHIMSHONI I. and TAL A. (2011), Prominent Field for Shape Processing and Analysis of Archaeological Artifacts. *International Journal of Computer Vision* 94 (1), 2011, 89–100.

NOCERINO E., MENNA F. and REMONDINO F. (2014), Accuracy of typical photogrammetric networks in cultural heritage 3D modeling projects. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XL-5, 2014, 465–472.

PEZZATI L. and FONTANA R. (2008), *3D Scanning of Artworks. In: Handbook of the use of lasers in conservation and conservation science* (Eds: M. Schreiner, M. Strlič, R. Salimbeni). Brussels, COST office, <http://alpha1.infim.ro/cost/pagini/handbook/>.

ROBERTSON D. P. and CIPOLLA R. (2009), Structure from Motion. In: *Practical image processing and computer vision* (Ed. Margaret Varga). New York, John Wiley & Sons 2009..

ŠTUHEC S. (2012), Dvoipoldimenzionalno in tridimenzionalno upodabljanje artefaktov. *Arheo* 29, 2012, 87–98.

ŠTUHEC S. (2012), *Dvoipolrazsežnostno (2,5D) in trirazsežnostno (3D) upodabljanje artefaktov*. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta, Oddelek za Arheologijo 2012.

TINGDAHL D., VERGAUWEN M. and van GOOL L. (2012), ARC3D: A Public Web Service That Turns Photos into 3D Models. In: *Digital Imaging for Cultural Heritage Preservation* (Eds: F. Stanco, S. Battiato, G. Gallo). Analysis, Restoration, and Reconstruction of Ancient Artworks. Boca Raton: CRC Press (Digital Imaging and Computer Vision Series), 2012, 101–125.

VAN DER MAATEN L., BOON P., LANGE G., PAIJMANS H. and POSTMA E. (2006), Computer vision and machine learning for archaeology. *Proceedings of the CAA 2006*, 2006, 112–130.

VERHOEVEN G., DONEUS M., BRIESE Ch. and VERMEULEN F. (2012), Mapping by matching: a computer vision-based approach to fast and accurate georeferencing of archaeological aerial photographs. *Journal of Archaeological Science* 39 (7), 2012, 2060–2070.

WENZEL K., ROTHERMEL M., FRITSCH D. and HAALA N. (2013), Image acquisition and model selection for multi-view stereo. *3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures*. 5th ISPRS International Workshop. Trento, Italy, 25–26 February. 3D-ARCH 2013, 251–258.