

DvoipoldimenZIONALNO in tridimenZIONALNO upodabljanje artefaktov

2.5D and 3D Visualizations of Artefacts

© Seta Štuhec
seta.stuhec@gmail.com

Izvleček: V članku s pomočjo nekaj konkretnih primerov obravnavamo najpomembnejše tehnike in možnosti za aktiven prikaz arheoloških artefaktov. V primerjavi s statičnimi metodami, kot sta risba in fotografija, se v času hitrega tehnološkega napredka odpirajo nove možnosti upodobitev v treh dimenzijah. Poleg tridimenzijskih prikazov, ki služijo tako na področju dokumentacije, raziskav in prezentacije arheoloških artefaktov, so nam na voljo tudi tehnike, ki v dvodimenzijski prikaz vpeljejo (vsaj) vtis tretje dimenzije. Za lažjo predstavbo jih bomo za potrebe tega članka imenovali dvoipoldimenzijske upodobitve.

Glavne besede: upodobitev artefaktov, računalniški vid, 3D skeniranje, virtualni ogled predmeta, polinomska preslikava teksture, računalniško upodabljanje pretvarjanja odbojnosti na podlagi slikovnega gradiva

Uvod

Upodabljanje arheoloških artefaktov je komunikacijsko orodje, ki je razumljivo vsakomur in omogoča popolnejše in tudi drugačno dožemanje predmetov, kot ga nudi besedilni opis. Zato je nepogrešljiv del dokumentacije, predstavitve in proučevanja arheoloških ostalin. Na voljo imamo različne metode upodabljanja arheoloških predmetov: od risb, fotografij do v zadnjem času vedno bolj dostopne računalniške upodobitve predmetov v treh dimenzijah. S tehnološkim razvojem slednja ni postala dostopnejša le v cenovnem smislu, ampak je postala do uporabnika bolj prijazna tudi raba naprav in ustrezne programske opreme za zajemanje in obdelavo 3D podatkov. S tem je dobilo 3D upodabljanje svoje mesto tudi v arheologiji. Arheologi ga uporabljamo vse bolj in bolj, saj ponuja nove možnosti tako na področju dokumentacije, upodabljanja in prikazovanja predmetov kot tudi v raziskovalni dejavnosti (Stanco et al. 2011). Predstavili bomo glavna načina 3D digitalizacije predmetov: izdelava 3D modela na podlagi fotografij in 3D skeniranje.

Problema, kako prikazati tretjo dimenzijo objekta, strokovnjaki ne rešujejo le s pomočjo 3D digitalizacije, temveč razvijajo nove tehnike, ki dajejo vtis tridimenzijske predstavitve. Te tehnike lahko s pridom uporabimo tudi za upodobitev arheoloških artefaktov. Osnova za tovrstne prikaze je slikovno gradivo, ki omogoča vpogled v tretjo dimenzijo, če ga obdelamo z določenimi postopki. Za lažjo predstavbo jih bomo zato imenovali dvoipoldimenzijske tehnike, v nadaljevanju pa bomo v tem

Abstract: The article presents a small selection of specific examples illustrating the main techniques that enable an active digital visualization of archaeological artefacts. The static visualization methods, such as drawing and photography, have lately been joined by the new possibilities for visualization in more than two dimensions brought about by the rapid technological development. Besides the three-dimensional (3D) visualizations that are used to document, investigate and present archaeological artefacts, special techniques conveying (at least) the impression of the third dimension are also available. For the sake of clarity, the latter will be termed 2.5D techniques in this article.

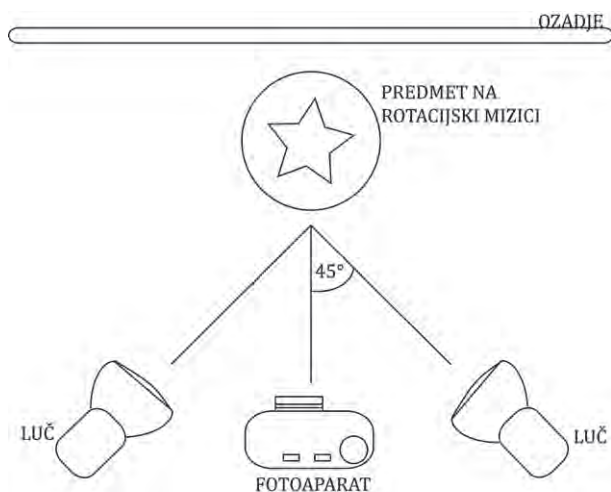
Key words: visualization of artefacts, computer vision, 3D scanning, object movie, polynomial texture mapping, reflectance transformation imaging

sklopu natančneje predstavili virtualni ogled predmeta (angl. *object movie*) in računalniško upodabljanje pretvarjanja odbojnosti na podlagi slikovnega gradiva (angl. *reflectance transformation imaging*, krajše RTI) s pomočjo polinomskih teksturnih preslikav (angl. *polynomial texture mapping*, krajše PTM).

DvoipoldimenZIONALNO upodabljanje artefaktov

Virtualni ogled predmeta

Virtualni ogled predmeta je neke vrste interaktivni film, ki prikazuje predmet iz vseh smeri, a ne vsebuje nobenih geometričnih podatkov o predmetu. Sestavljen je iz množice fotografij predmeta, ki so v krogu pripete druga ob drugo. Gre za neke vrste preobrnjeno panoramsko sliko. Pri pravi panorami so slike postavljene druga ob drugi v ravni liniji, fotografije pa posnamemo ob vsakem krožnem premiku fotoaparata in tako zaobjamemo opazovani objekt ali pokrajino. Kadar pa izdelujemo virtualni ogled predmeta, ravnamo prav nasprotno: posnamemo množico fotografij z istega mesta in ob vsakem posnetku zavrtimo obravnavani predmet okoli osi s pomočjo ročne ali avtomatične rotacijske mizice. Končni rezultat je interaktivni film, v katerem lahko predmet prosto vrtimo okoli osi, kar daje vtis tridimenzijskega. Če poleg predmeta fotografiramo tudi merilo (ločeno od rotacijske mizice), lahko pridobimo enake merske podatke o predmetu, kot jih vsebuje običajna fotografija.



Slika 1. Priprava za zajem podatkov za virtualni ogled predmeta.

Figure 1. Object movie data capture setup.

Izdelavi virtualnega ogleda predmeta je namenjenih več programov. Nekateri, kot sta npr. *Shoogleit* (Splet 1) in skupek panoramskih orodij *PanoTools* (Splet 2; Splet 3), so prosto dostopni na internetu. Med plačljivo programsko opremo za izdelavo virtualnega ogleda predmeta so najpogostejše uporabljeni:

Object2VR (Splet 4)

QuickTime VR Authoring Studio (Splet 5)

Modelweaver (Splet 6)

Virtualni ogled predmeta omogoča interaktivni prikaz artefakta okoli njegove osi (lahko tudi v več plasteh). Tehnika je hitro izvedljiva ter cenovno ugodna, poleg tega za izvajanje ne potrebujemo posebnega dodatnega znanja in opreme (oz. je ta cenovno dostopna). Ker je osnova virtualnega ogleda digitalna fotografija, vsebuje ta način upodabljanja vsaj toliko podatkov o predmetu kot sama fotografija. Prednost virtualnega ogleda predmeta pred običajno fotografijo je, da lahko s pomočjo te tehnike prikazemo predmet iz vseh smeri. V nasprotju s 3D tehnikami upodabljanja pa je virtualni ogled predmeta namenjen predvsem predstavitvi predmeta, ne pa tudi znanstvenim raziskovanju, saj ne zajema geometrijskih podatkov o predmetu na takšen način, kot jih „pravi“ 3D modeli. Takšno upodabljanje v primerjavi z navadno fotografijo in 3D upodobitvami torej ne nudi novih spoznanj, lahko pa prispeva k boljši predstavitvi predmeta.

Primer

Na sliki 2 je prikaz kamenega orodja¹, dokumentiran s tehniko virtualni ogled predmeta, narejenega s programom *Object2VR*. Končni rezultat programa je mogoče izvoziti v HTML5 (slika 2), Flash in QuickTime VR formatu, datoteki pa lahko dodamo nekaj osnovnih podatkov o predmetu (najdišče, datacija, opis ipd.) in izdelavi upodobitve (datum, avtor ipd.). Format QuickTime VR zapiše datoteko v obliki filma, medtem ko formata Flash in HTML5 omogočata interaktivno premikanje in približevanje predmeta, ki ga lahko vrtimo okoli osi. Omenjena formata sta namenjena tudi objavi na spletu.

KAMENO ORODJE



Description	kameno orodje z najdišča Evergem v Belgiji
Author	Seta Štuhec
Date/Time	januar 2012
Copyright	Seta Štuhec, pixel2data

Slika 2. Prikaz kamenega orodja s tehniko virtualni ogled predmeta.

Figure 2. Lithic tool presented by means of an object movie.

¹ Predmet je za raziskavo posodil Pietr Laloo (Gate, Belgija).

Vsi tipi predmetov za izdelavo virtualnega ogleda predmeta niso primerni, oziroma glede na vloženo delo ne omogočajo zadovoljivega rezultata. Takšen primer so npr. ploski predmeti brez stojišča, kot so novci in obeski, ki zahtevajo posebno pritrditev na podlago (pritrditev, npr. plastelin, ne sme prekrivati predmeta), da lahko posnamemo ustrezne fotografije.

RTI / PTM

V arheologiji se pogosto srečujemo s predmeti, na katerih prepoznamo določene reliefne značilnosti, kot so npr. različni napisi, vrezani okras ipd., ki pa jih zaradi procesov staranja ne moremo več natančno razbrati. Najpreprostejša in najbolj očitna rešitev je opazovanje tovrstnega predmeta pod različnimi koti osvetlitve in opazovanje nastalih senc. Leta 2000 je Tom Malzbender s sodelavci iz laboratorijev Hewlett Packard razvil tehniko, ki omogoča računalniško upodabljanje predmeta, ki ga lahko interaktivno osvetljujemo iz vseh smeri (Malzbender et al. 2001). Pod okriljem računalniške grafike in obdelave slik so bili vzpostavljeni mehanizmi, ki lahko na podlagi slikovnega digitalnega gradiva, posnetega pod spremenljivo osvetlitvijo, izračunajo vrednost svetlobnega odboja predmeta za katerokoli smer osvetlitve za vsak piksel posebej. Te tehnike zato imenujemo računalniško upodabljanje pretvarjanja odbojnosti (angl. *reflectance transformation imaging*, krajše RTI), rezultat pa je posebne vrste slika, ki vsebuje informacije o odboju svetlobe predmeta glede na položaj vira osvetlitve. Nova slika je sestavljena iz množice fotografij obravnavanega predmeta, ki smo ga ob vsakem fotografiranju osvetlili z drugega položaja. Prvi in tudi najpogostejše uporabljen algoritem, ki omogoča tovrstno predstavitev objekta, je Malzbender poimenoval polinomska preslikava teksture (angl. *polynomial texture mapping*, krajše PTM). Medtem ko navadne slike za vsak piksel posebej shranjujejo le barvno vrednost (RGB), shranjuje PTM slika za vsak piksel posebej kanal svetlobne intenzivnosti, izračunan na podlagi kvadratnega polinoma. Spremenljivko v izračunu predstavlja položaj vira svetlobe, kar pomeni, da končni rezultat prikazuje spremembe v barvni vrednosti vsakega piksla posebej, glede na položaj vira svetlobe (Mudge et al. 2008).

Na podlagi podatkov o odboju svetlobe pridobimo tudi podatke o površinskih normalah predmeta. Takšna nor-

mala je vektor, ki je pravokoten na tangentno ravnino površine v dani točki. Če je površina ravna ploskev, je normala navadna pravokotnica na dotično površino. V našem primeru jo program izračuna na podlagi odboja svetlobe – normala je opazna tam, kjer je odboj popoln (tj. bleščeča površina). Podatki o normalah površine predmeta pa vodijo iz druge v tretjo dimenzijo, saj pomenijo geometrične lastnosti predmeta. Na ta način pridobljene podatke lahko s pomočjo mehanizmov za izboljšanje kontrasta, kot sta spektralna ojačitev (angl. *spectral enhancement*) in razpršena zrnatost (angl. *diffuse grain*), uporabimo za spreminjanje fotometričnih lastnosti površine, medtem ko se geometrične lastnosti na podlagi vektorskih normal ohranjajo (Malzbender et al. 2006). Takšne aplikacije tako omogočajo vzpostavitev kar najboljših pogojev za razbiranje slabše opaznih reliefnih značilnosti.

Od začetkov v laboratorijih Hewlett Packard so prednosti teh tehnik hitro prepoznali tudi na drugih inštitucijah in jih začeli razvijati naprej. Med vodilne na tem področju spada kalifornijsko društvo Cultural Heritage Imaging, kjer so med drugim izdelali svojo programsko opremo, namenjeno izdelavi in ogledu RTI slik (*RTI builder* in *RTI viewer*), ki je skupaj s praktičnimi navodili za izdelavo dostopna na njihovi spletni strani² (Splet 8). Pomembna razvojna centra sta tudi Univerza v Southamptonu (Splet 9) in Univerza v Leuvnu.

Primer

Za upodobitev s pomočjo RTI tehnik so najprimernejši ploski predmeti z drobnim, slabo vidnim reliefom, kot so epigrafski napisi, vrezani okras ipd. V razbiranju tovrstnih reliefnih površin se RTI tehnika lahko kosa s 3D modeli; ne le, da je cenejša in pogosto hitrejša kot 3D skeniranje ali fotogrametrija ter računalniški vid, v določenih primerih lahko „vidi“ več kot omenjeni tehniki. Slednji namreč zajame le površino, ki je vidna neposredno³, kar pa ne zadostuje, če preučujemo manjše, nepravilne, konveksne vreze in vtise (Hameeuw 2011, 165).

2 Prav tako je na spletnih straneh Hewlett Packard laboratorijev prosto dostopna prva programska oprema (PTM builder in PTM viewer) (Splet 7).

3 Da lahko 3D skener zajame 3D podatke neke točke na predmetu, mora biti točka izpostavljena tako, da jo laser oz. strukturirana svetloba lahko dosežeta ter da je vidna tudi senzorju, ki odbite emisije ujame (Wallace 2005, 91). Prav tako lahko fotografija zajame le podatke, ki so vidni neposredno.



Slika 3. Zgornji del slike prikazuje navaden fotografski posnetek medaljona, spodnji del pa medaljon, prikazan s pomočjo RTI spektralne ojačitve.

Figure 3. The upper part of the image presents an ordinary photograph of a medallion, whereas the lower part of the image depicts the medallion after applying the RTI spectral enhancement.

Slika 3 prikazuje bronast, močno korodiran novoveški medaljon z najdišča Clairefontaine v Belgiji.⁴ Na zgornjem delu slike je navaden fotografski posnetek, na spodnjem pa prikaz, ki je s pomočjo RTI aplikacije spektralno ojačan. PTM datoteka medaljona je bila izdelana s pomočjo programa LP tracker (*PTM builder*) iz skupno 120 posnetkov.

3D digitalizacija

Metod za zajem 3D podatkov je več, rezultat vsake pa je navadno t. i. oblak točk, ki ga predstavlja množica točk, definiranih v kartezijskem koordinatnem sistemu (x , y , z) znotraj tridimenzionalnega programskega okolja. Tehnike zajema podatkov delimo na aktivne in pasivne; aktivne so tiste, ki 3D podatke zajemajo z oddajanjem žarkov (npr. različnih laserskih žarkov ali strukturirane svetlobe), pasivne metode pa jih zajemajo v naravnem okolju brez dodatnega sevanja ali drugih emisij (Pezzati, Fontana 2008). 3D digitalizacija arheoloških predmetov zahteva visoko natančnost (navadno višjo kot milimetrsko), zato vse tehnike zajema 3D podatkov zanjo niso primerne. Med aktivnimi tehnikami (skeniranje) sta najustreznejši laserska triangulacija ter skeniranje s strukturirano svetlobo, med pasivnimi pa tehnike, ki 3D modele izdelajo na podlagi fotografij, tj. fotogrametrija bližnjega dosega (stereo obdelava) in tehnike računalniškega vida (struktura iz gibanja, stereo ujemanje idr.).

Fotogrametrija in računalniški vid

S tridimenzionalno rekonstrukcijo objektov iz fotografij se ukvarjata dve znanstveni področji, fotogrametrija in računalniški vid.

Fotogrametrija je veda o pridobivanju informacij o legi, velikosti in obliki objektov na podlagi meritev in analiz fotografij. Uporabo fotogrametričnih tehnik na objektih, ki ne presegajo velikosti okoli 100 metrov, s fotoaparatom, nameščenim nedaleč od njih, imenujemo fotogrametrija bližnjega dosega (angl. *close range photogrammetry*) (Cooper, Robson 2001, 9). Začetki fotogrametričnih analiz so znani že iz sredine 19. stoletja. Največji napredek je veda doživela v 90-ih letih prejšnjega stoletja, ko je nanjo močno vplival digitalni zapis podatkov (Fryer 2001, 3). Posledico naraščanja uporabe digitalnega zapisa predstavlja prenos algoritmov in konceptov računalniškega vida v fotogrametrične postopke (Cooper, Robson 2001, 9). Na ta način lahko danes računalniški programi avtomatično prepoznajo, povežejo in preoblikujejo značilnosti slike v tridimenzionalne elemente v objektu prostoru. (Cooper, Robson 2001, 9).

Računalniški vid se je začel razvijati v začetku 70-ih let 20. stoletja v okviru robotike in umetne inteligence z visoko zastavljenim ciljem: dati računalniku „človeški“ vid. Tako se je začelo razvijati novo področje računalništva, ki poskuša predmetom povrniti tretjo dimenzijo

⁴ Predmet je za raziskavo posodil Davy Herremans (Univerza v Gentu, Oddelek za Arheologijo).

iz zbira dvodimenzionalnih slik (Quan 2010, 1). S pomočjo algoritmov računalniškega vida lahko na podlagi primerjave najmanj dveh slik (brez katerih koli drugih informacij) izračunamo 3D lego točk, ki predstavljajo ujemanja na slikah, ter 3D lego fotoaparata, s katerim so bile slike posnete. Značilnost algoritmov računalniškega vida v primerjavi s fotogrametričnimi je, da niso kalibrirani (Hartley et al. 2008, xiii). To pomeni, da za uspešno izdelavo 3D modela ne potrebujemo podatkov o parametrih notranje orientacije fotoaparata (goriščna razdalja, distorzija objektiva in koordinate glavne točke), prav tako ni treba poznati lege in orientacije samega fotoaparata v času fotografiranja. Postopek, imenovan struktura iz gibanja (angl. *structure from motion*), namreč omogoča izračun relativne (rezultat ni georeferenciran) projekcijske geometrije in s tem tudi izdelavo oblaka točk. Takšen oblak točk je redkejši, ker postopek izdelave poteka po principu iskanja podobnih znakov na fotografijah. Končni, gostejši oblak točk dobimo kot rezultat stereo ujemanja za vsak piksel posebej. Ker gre navadno za večje število primerjanih fotografij, tehniko imenujemo *dense multi-view stereo* (Robertson, Cipolla 2009). Najslabši možni primer za uporabo teh tehnik bi bil torej bel zid. Ker imajo na belem zidu vsi piksli enako barvno vrednost, primerjave ne bi bile mogoče. Za takšno obdelavo podatkov so neugodni tudi svetleči predmeti (npr. kovinski in tudi stekleni), saj se blesk ves čas spreminja. Najboljši rezultat lahko dosežemo na predelih z ostrimi barvnimi mejami (Fellner et al. 2011, 98). K večji uspešnosti izdelave 3D modelov in njihovi točnosti pripomorejo tudi ustrezno posnete fotografije.

Omenjene tehnike računalniškega vida olajšajo izdelavo 3D modelov. Ker zahtevajo manj podatkov, so primerni za 3D rekonstrukcijo objektov iz skoraj vsakega digitalnega slikovnega materiala. Ob tem pa moramo opozoriti, da takšen način pridobivanja 3D podatkov ni tako točen, kot je uporaba le fotogrametričnih tehnik, pri katerih je glavno vodilo prav točna izmera objektov na podlagi fotografij. Kljub temu pa se računalniški vid hitro razvija in postaja vse točnejši ter skupaj s fotogrametričnimi postopki predstavlja pomembno metodo za izdelavo 3D modelov resničnih predmetov (Remondino 2011, 1111).

K vedno širši uporabi tovrstnih tehnik prispeva tudi dostopnejša programska oprema. Na internetu so na voljo brezplačne (pa tudi plačljive) storitve, ki na podlagi naloženih fotografij izdelajo 3D model. Ena izmed takšnih brezplačnih storitev je ARC3D, ki jo je vzpostavila Univerza v Leuvnu, da bi strokovnjakom omogočila upo-

dobitev ostalin kulturne dediščine v treh dimenzijah (več o storitvi in napotki za uporabo v Tingdahl et al. 2011). Prednost ARC3D in drugih podobnih storitev predstavlja enostavnost uporabe, saj ne potrebujemo predhodnega znanja. S pomočjo nekaterih drugih storitev in programov (glej Tabela 1) se postopek izdelave 3D modela nekoliko podaljša, vendar omogoča večji nadzor nad celotnim procesom. Ne glede na to, ali je končni produkt storitve ali programske opreme mnogokotniška mreža t. i. mesh, je treba takšen model navadno tudi dodatno optimizirati (zapolnjevanje morebitnih lukenj, odstranjevanje šuma in koničastih ploskev ipd.). Nekatera programska oprema za izdelavo 3D modelov na podlagi fotografij, kot je npr. *Photoscan*, nudi tudi osnovno obdelavo podatkov, vendar navadno 3D modeli zahtevajo dodatno optimizacijo s pomočjo temu namenjene programske opreme, kot so npr. odprtokodni *MeshLab*, *Geomagic*, *Polyworks* idr. Pri naknadni obdelavi 3D modelov, narejenih na podlagi tehnik računalniškega vida, pa ne smemo pozabiti na vnos metričnih podatkov o predmetu. Ker takšni 3D modeli ne vsebujejo podatkov o velikosti, moramo vsaj eno meritev (število meritev je odvisno od programa) vstaviti ročno. Program nato izračuna in prenese metrične podatke na celoten 3D model.

Primer

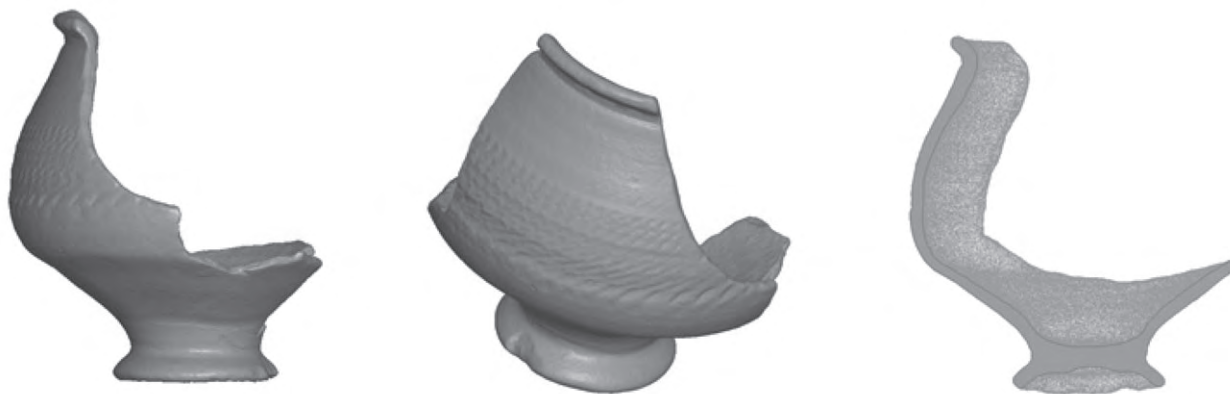
Primer na sliki 4 prikazuje 3D model keramične posodice⁵, ki je bil v programu *Photoscan* izdelan na podlagi 52 fotografij. Prednost te tehnike se kaže predvsem v optimalnem videzu teksture, ki ga s 3D skenerjem ne moremo doseči. Za izboljšanje izgleda teksture ima vedno več 3D skenerjev vgrajene vedno boljše fotoaparate za zajem podatkov o teksturi. Kljub temu se tako pridobljeni teksturni podatki ne morejo primerjati s fotografijami, ki smo jih posneli v studiu (Quan 2010, 1). Poleg simultane projekcije fotografij na 3D model je s pomočjo ustrezne programske opreme moč slike naknadno dodati. Če pa je pomembna visoka geometrijska in metrična natančnost za potrebe nadaljnjih raziskav, se v idealnih razmerah bolje izkaže 3D skeniranje. Tudi s fotogrametrijo / računalniškim vidom je možno doseči precej visoko resolucijo, a je čas obdelave podatkov veliko daljši (več ur). Boljša računalniška oprema (hitrejši procesorji in grafična kartica ter dovolj notranjega spomina) lahko proces sicer skrajša, a ne tako drastično, da bi se lahko meril s 3D skeniranjem. Če želimo izdelati optimalen 3D model danega predmeta, je navadno najboljša rešitev kombinacija obeh tehnik.

5 Predmet je za raziskavo posodil Pietr Laloo (Gate, Belgija).

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/sfm-service/
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	(redk) oblak točk	http://photosynth.net/
PhotoSynth Toolkit	Brezplačen program	Oblak točk	http://www.visual-experiments.com
3DF Samantha	Brezplačen program za netržno uporabo	(redk) 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 nekaterih internetnih storitev in programov za izdelavo 3D modelov na podlagi fotografij.

Table 1. Overview of some of the image-based 3D modelling internet services and software.



Slika 4. 3D model keramične posodice izdelan na podlagi fotografij.

Figure 4. Image-based 3D model of a ceramic vessel.

3D skeniranje

Za tridimenzionalno skeniranje manjših delov arhitekturnih objektov in predmetov se navadno uporablja optično 3D skeniranje bližnjega dosega (tj. skeniranje na razdalji, ki je manjša od enega metra). Za tovrstno skeniranje je na voljo več vrst skenerjev:

Triangulacijski laserski 3D skenerji. Takšne naprave oddajajo laser v obliki linijske ali točkovne projekcije, s katerim skenirajo objekt. Laserski žarek se od površine skeniranega objekta odbije na senzor. Sistem nato s pomočjo trigonometrične triangulacije natančno izračuna razdaljo med napravo in skeniranim objektom (Abdel – Bary Ebrahim 2011, 17).

3D skenerji, ki oddajajo strukturirano (belo ali modro) svetlobo. Tudi ti skenerji delujejo s pomočjo izračunov, ki temeljijo na trigonometrični triangulaciji, a namesto laserskega žarka oddajajo serijo linearnih vzorcev. Sistem prepozna deformacije na vzorcu, ki nastanejo zaradi reliefnih značilnosti skeniranega predmeta in na podlagi sprememb na vzorcu izračunajo 3D koordinate skeniranega predmeta (Abdel – Bary Ebrahim 2011, 20).

Napravi Kinect in Xtion, ki ju v zadnjem času vedno pogosteje uporabljajo kot nizkocenovno rešitev za zajem 3D podatkov. Kinect je Microsoftova igralna konzola kompleta Xbox 360 in je bila tako kot Asusov Xtion izdelana z namenom zaznavanja gibanja. Takšna naprava deluje podobno kot 3D skenerji, ki oddajajo strukturirano svetlobo, le da namesto te oddaja vzorec infrardečih točk, ki se nato odbijejo v senzor. S pomočjo referenčnega vzorca naprava preračuna spremembe, nastale zaradi lastnosti skeniranega objekta tako, da lahko iz podatkov dobimo 3D model (Bachfeld et al. 2012, 89). Trenutno takšen način za digitalizacijo manjših artefaktov še ni dovolj natančen, a več raziskovalnih projektov se ukvarja z njegovo optimizacijo in prilagoditvijo na potrebe arheologije in drugih panog, ki utegnejo koristiti prednosti takšnega zajema 3D podatkov (glej tudi: Palmer 2011; Splet 10; Splet 11; Splet 12; Splet 13).

Na tržišču je na voljo več skenerjev z omenjenima načina delovanja. Med seboj se razlikujejo glede na:

- ceno – cene skenerjev se danes gibljejo med nekaj sto evri za opremo, s pomočjo katere sami sestavimo 3D skener (npr. DAVID skener, Splet 14), do več kot sto tisoč evrov za visokoresolucijske skenerje (za seznam glej Splet 15);
- točnost – do 0,002 mm;
- zajem teksture – nekateri skenerji poleg geometrijskih podatkov istočasno zajemajo tudi podatke o teksturi, v

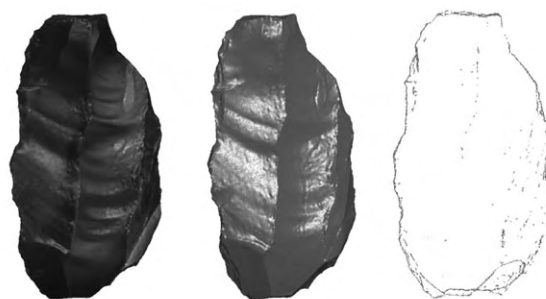
nasprotnem primeru lahko teksturo naknadno projiciramo na 3D model iz zbira posebej posnetih fotografij;

- premičnost naprave;
- statični (med procesom skeniranja so nepremični, navadno delujejo skupaj z avtomatično rotacijsko mizico, na katero postavimo predmet), npr. *NextEngine* (Splet 16);
- ročni (naprava je premična, kar pomeni, da jo uporabnik sam usmerja na predele, ki jih želi skenirati), npr. *Artec Eva TM* (Splet 17).

Postopek izdelave 3D modelov s pomočjo katerihkoli 3D skenerjev pa je lahko nekoliko bolj kompleksen, kot izdelava s pomočjo fotogrametrije / računalniškega vida, saj glavnina dela sloni na obdelavi zajetih 3D podatkov. Rezultat skeniranja z omenjenimi 3D skenerji je oblak točk, ki pa ga pripadajoča programska oprema navadno že sproti oblije v poligonalno mrežo. Takšen 3D model je treba še dodatno optimizirati s poravnavanjem in spajanjem posameznih skenov, zapolnjevanjem morebitnih lukenj ter odstranjevanjem šuma in koničastih ploskev. Skupaj s 3D skenerjem je navadno na voljo tudi pripadajoča programska oprema, ki je potrebna za skeniranje in hkrati omogoča tudi osnovno obdelavo podatkov. Za optimizacijo je navadno potrebna dodatna programska oprema, kot je *MeshLab* (Splet 18) med odprtokodnimi ter *GeoMagic* (Splet 19), *RapidForm* (Splet 20), *PolyWorks* (Splet 21) in drugi med plačljivimi možnostmi.

Primer

Spodnji primer (slika 5) prikazuje 3D model kamenega orodja⁶. Podatki so bili zajeti s pomočjo 3D laserskega



Slika 5. 3D model kamenega orodja izdelan z NextEngine 3D laserskim skenerjem.

Figure 5. 3D model of a lithic tool created with a NextEngine 3D laser scanner.

6 Predmet je za raziskavo posodil Pietr Laloo (Gate, Belgija).

skenerja Next Engine (160000 točk/inč²) in obdelani v programih *ScanStudio HD* in *MeshLab*. Izdelava 3D modela istega predmeta s tehnikami računalniškega vida ni uspela. Ker je tekstura predmeta precej enolična, različna programska oprema (*Photoscan*, *VisualSfM* ipd.) ni uspela rekonstruirati položaja fotoaparata in poiskati skupnih točk na fotografijah.

Sklep

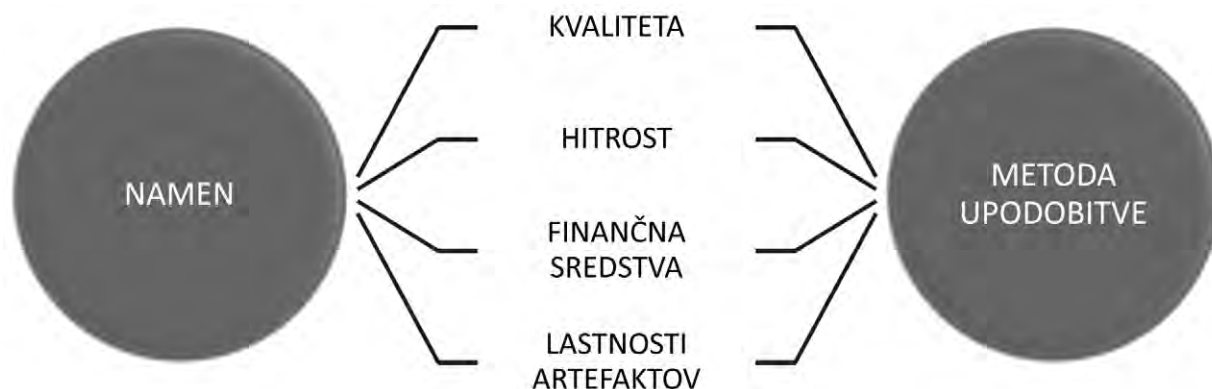
Kaj nam v primerjavi z običajnimi tehnikami upodabljanja artefaktov, kot sta risba in fotografija, prinašajo obravnavane metode, predvsem 3D digitaliziranje? Najbolj očitna razlika je seveda v prikazu dimenzije – tako pri risbi kot fotografiji gre za projekcijo tridimenzionalnega predmeta na dvodimenzionalno površino. Reliefne značilnosti predmeta morajo biti tako projicirane na ravnino, pri čemer se lahko nekatere informacije izgubijo oz. popačijo. Digitalni 3D model predmeta pa je njegova virtualna kopija. To pomeni, da 3D model ni le vizualni prikaz nekega predmeta, ampak ga lahko pojmujeemo kot njegov digitalni nadomestek, saj 3D tehnologija omogoča zajem tako teksturnih kot tudi geometrijskih podatkov o predmetu. Natančnost in točnost 3D modela je odvisna od metode zajema in obdelave podatkov ter zmožnosti naprav in programske opreme. V kolikor sta oprema in sam postopek 3D digitalizacije artefaktov korektna, je proučevanje 3D modela skoraj takšno, kot da bi imeli artefakt pred sabo, le otipati ga ne moremo. To seveda ne pomeni, da bi 3D model lahko nadomestil fizični predmet, je pa 3D digitaliziranje zagotovo tehnika upodabljanja, ki vsebuje kar največ podatkov in hkrati omogoča proučevanja predmeta na drugačen način, kot ga nudi fizični predmet (več o tem v: Fischer et al. 2008, Karasik et al. 2008, Li et al. 2010).

Digitaliziranje predmetov v treh dimenzijah je zato uporabno tako na področju ilustracije, kot tudi za potrebe znanstvenih raziskovanj. 3D model sam po sebi torej ni interpretacija predmeta (tako kot to lahko rečemo za risbo⁷), temveč je nepogrešljivo orodje za interpretacijo. Tehnologija zagotavlja precejšnjo objektivnost tehnike, vendar lahko tako kot pri fotografiji pride do odstopanj pri obdelavi podatkov. K večji objektivnosti pripomore transparentnost podatkov o izdelavi 3D modela (zajem podatkov in naknadna obdelava).

7 Risar iz predmeta lahko izlušči bistvene elemente in načeloma nariše in poudari, kar se mu zdi pomembno, ostale informacije pa zanemara. Risbe, nastale izpod rok izkušenega risarja, so lahko zato bolj izpovedne kot npr. fotografija, vendar jih zaradi subjektivnosti, ki spremlja izdelavo, lahko obravnavamo kot interpretacijo.

Digitalni nadomestki služijo analizam, beleženju, hranjenju, predstavljanju, občudovanju in posredovanju arheoloških artefaktov. S pomočjo internetnih baz podatkov (npr. *3D Kulturdatenbank Carnuntum*, Splet 22) so predmeti dostopni širši množici tako znanstvenikov kot laikov. Artefakti, ki se nahajajo v depojih muzejev, krhki predmeti in takšni, ki so od nas preveč oddaljeni, da bi si jih lahko ogledali, so kot 3D modeli na dosegu roke (npr. *Virtual Museum Iraq*, Splet 23). 3D modeli lahko poleg vizualne predstavitve tudi olajšajo proučevanje predmetov. Z njihovo pomočjo lahko veliko lažje ravnamo z zelo majhnimi, velikimi ali težkimi predmeti, meritve na predmetu opravimo veliko hitreje in natančneje, hkrati pa zaščitimo pravi predmet, še posebej, če je ta zelo občutljiv na zunanje vplive. Poleg tega lahko na ta način dokumentiramo predmete in situ in za proučevanje izdelamo repliko. Te so uporabne tudi v muzejih, kjer so lahko na voljo obiskovalcem, da si predmet natančno ogledajo. Posebno muzejsko izkušnjo nudijo tudi sami 3D modeli v okviru interaktivnih predstavitev in poučnih animacij. Vzpostavitev virtualnih muzejev pa omogoča združevanje predmetov iz istega konteksta, ki so sicer hranjeni v različnih krajih.

3D model ni statičen, tako kot sta risba in fotografija, saj z njim lahko upravljamo, si ga ogledujemo iz različnih kotov ter spreminjamo osvetlitev in teksturo. Kako dobro je relief viden, ni odvisno od osvetlitve predmeta v času zajema podatkov, saj lahko virtualno osvetlitev vedno znova nastavimo. Prav tako kot risba lahko tudi 3D model izvzame teksturo, ki moti jasen pogled na geometrijske lastnosti predmeta. Teksturo lahko odstranimo ali pa jo zamenjamo s takšno, ki omogoča boljše berljivost predmeta in s pomočjo računalniške grafike te reliefne značilnosti tudi strojno izrišemo. Pomemben element dokumentacije je tudi izmera dimenzij arheoloških artefaktov. Ta je lahko s pomočjo 3D tehnologije (predvsem 3D skeniranja) natančnejša, kot jo lahko dosežemo na risbi, fotografiji pa tudi neposredno na fizičnem predmetu. Na splošno gledano lahko rečemo, da 3D model dokumentira in prikaže arheološke artefakte na bolj celovit način kot risba in fotografija. V zaključenem poteku arheološkega dela se risba, fotografija in 3D model (pa tudi obravnavane 2,5D upodobitve) lahko dopolnjujejo. Navsezadnje je pri fotogrametričnem postopku izdelave 3D modela osnova prav digitalna fotografija. Ta je lahko tudi naknadno preslikana na 3D model, saj lahko nudi veliko boljše teksturo, kot jo dajo 3D skenerji. Fotografije, uporabljene za izdelavo samega 3D modela ali le njegove teksture, so lahko poleg navadnih (vidni spekter) posnete



tudi pod ultravijolično ali infrardečo svetlobo⁸. Vse podatke, ki nam jih nudita fotografija in 3D model, lahko nato strnemo v natančnejšo risbo (bodisi na papirju ali digitalno s pomočjo računalniških aplikacij), ki tako zopet predstavlja novo interpretacijo arheološkega artefakta.

Tudi 3D digitalizacija ima pomanjkljivosti. Predmeti z enolično teksturo tako npr. niso primerni za digitalizacijo s pomočjo računalniškega vida, saj programska oprema zaradi prevelike podobnosti ne more ustrezno prepoznati ujemajočih se točk na fotografijah. Poleg predmetov z enolično teksturo je izdelava 3D modelov s pomočjo računalniškega vida, pa tudi 3D skeniranja, otežena pri svetlečih predmetih. Na senzorje 3D skenerjev se tako poleg skenerjevih žarkov ujamejo tudi „nepravi“ odboji s površine, kar povzroči šum na 3D modelu. Spreminjajoči blesk na predmetu prav tako zelo oteži prepoznavanje ujemajočih se točk, ki je ključnega pomena za fotogrametrične tehnike. V obratnem inženirstvu problem svetlečih predmetov rešujejo z barvanjem predmeta, nanašanjem prahu in celo laka za lase. V primeru arheoloških predmetov takšne rešitve ne pridejo v poštev, za hitro ilustracijo tovrstnih predmetov pa bi morda rešitev lahko iskali v virtualnem ogledu predmeta. Poleg tovrstnih pomanjkljivosti se pojavlja tudi vprašanje, katerega izmed množice različnih formatov za zapis 3D modela izbrati, da bo prepoznaven čim večjemu številu programov in se bo ohranil tudi za naslednje generacije (več o tem v: Koller et al. 2009). Prav tako je njegov prikaz možen le v digitalni obliki na računalniku, kar onemogoča tiskano objavo. Ker ti problemi zadevajo celoten digitalni svet oz. vsaj 3D računalniško grafiko, se jim na tem mestu ne bomo natančneje posvečali.

Težko je določiti, katera izmed obravnavanih tehnik upodabljanja artefaktov je „boljša“. Ker ima vsaka svoje

prednosti in pomanjkljivosti, je pogosto najboljša rešitev prav kombinacija različnih tehnik. O uspešnosti in kvaliteti končnega rezultata pa odločajo tudi drugi dejavniki, kot je npr. izbira strojne in programske opreme. Tehnološki razvoj danes omogoča veliko izbiro programske in strojne opreme na področju fotografije, fotogrametrije, računalniškega vida, 3D skeniranja, vzvratnega inženirstva itd., ki se močno razlikujejo po kakovosti in ceni. Oprema vpliva tudi na čas zajema podatkov; računalnik z boljšimi specifikacijami hitreje preračuna kompleksne naloge. Poleg omenjenih dejavnikov, ki so pogojeni predvsem s finančnimi sredstvi, na kakovost in hitrost izdelave 3D modelov vpliva tudi subjektivni dejavnik, tj. sam izdelovalec. Izkušnje izdelovalca narekujejo izbiro aplikacij in parametrov za obdelavo podatkov ter prav tako vplivajo na hitrost priprave na zajem (npr. priprava studia in postavitve pravilne osvetlitve) in obdelavo podatkov.

Katero vrsto upodobitve bomo uporabili, je odvisno od različnih dejavnikov, predvsem pa od namena upodobitve ter finančnih sredstev, ki so nam na voljo. Pri izbiri tehnike ter pripadajoče strojne in programske opreme velja upoštevati tudi lastnosti artefaktov, kot so npr. velikost, material, stopnja detajliranosti ipd.

Na uporabo 3D digitaliziranja (in tudi 2,5D upodobitev) v večjem obsegu močno vpliva tudi dostopnost tehnologije. Z razvojem postaja ta cenovno dostopnejša, hkrati pa tudi enostavnejša za uporabo. Nižanje cen, poenostavljanje in avtomatizacija postopkov tako povečujeta uporabo tehnik 3D upodabljanja. Nove možnosti se odpirajo v kombiniranju različnih tehnik, predvsem pa v sodelovanju med arheologi in specialisti za računalniški vid, grafiko ipd. Vsekakor pa morajo novo tehnologijo najprej sprejeti sami raziskovalci in drugi delavci s področja kulturne dediščine.

⁸ Primer združevanja različnih tehnik na Splet 24.

2.5D and 3D Visualizations of Artefacts

(Summary)

The most commonly used techniques to depict archaeological artefacts are drawing and photography. They both project a three-dimensional object on a two-dimensional plane, thereby risking a distortion and a loss of information on the depicted object. Apart from those, there are also techniques that help in presenting objects with an impression of the third dimension. Because it is only an impression, they are termed 2.5D techniques in this article. One of these is called the object movie, the purpose of which is a quick presentation of an artefact. The object movie is built up of a set of photographs forming an interactive film. Photographs are taken from a steady position, while the object, placed on a rotating table, is moved on its axis for each snapshot. The main advantages of this technique are simplicity of making and use, as well as an effective visualization of the kinds of objects (e.g. of glass, shiny objects) that other techniques fail to present satisfactorily.

Another 2.5D technique is reflectance transformation imaging (RTI), which is particularly effective in visualizing small objects, structures and paintings. Its advantage is most obvious when visualizing objects with a surface of shallow, changing relief. RTI is created from a set of photographs, depicting the same scene, which is illuminated from a different position for each snapshot. The result is an image that enables interactive movement of the light source and consequently, using the shadows, a detailed inspection of relief features on the object surface. To create these kinds of presentations, the algorithm known as polynomial texture mapping (PTM) is most commonly used. Exploiting the specular highlight information, it is possible to calculate the surface normals of an object and obtain 3D data, through which certain applications enable retention of geometric properties, while altering the photometric ones in order to achieve the best visibility of the object surface.

Besides 2.5D techniques, it is also possible to virtually recreate an artefact. The two main techniques used to create 3D models are passive photogrammetry / computer vision and active 3D scanning. The basis for photogrammetry and computer vision is digital photography. By using photogrammetric techniques, it is possible to extract 3D points from two or more photographs. Internal as well as external camera parameters can be calculated by using the concepts of computer vision, i.e. structure from motion, therefore preliminary camera calibration is not necessary. Automated calculation of camera positions and other parameters quickens and eases data capture as well as data processing procedure. Creating a 3D model using a 3D scanner, on the other hand, is not as straightforward. The result of 3D scanning is a set of point cloud scans that requires additional processing such as meshing, scan

alignment and merging, hole filling, noise reduction etc. Among the numerous 3D scanning devices, triangulation 3D laser scanners and structured light 3D scanners are best fitted for 3D digitalization of small objects, thought lately Microsoft's Kinect (originally made for Xbox 360 gaming system), Asus's Xtion motion sensing software development solution and Leap3D from Leap Motion in their modified forms promise a new, low-cost solution for 3D data capture.

Both photogrammetry / computer vision and 3D scanning have their advantages and disadvantages. The quality of the final 3D model depends on hardware and software, artefact properties and skills of the model maker. Certain artefacts (e.g. those made of glass) are not suited for 3D digitization with any of the above-mentioned techniques without a preliminary treatment (e.g. colouring). Shiny objects also present a considerable difficulty for these visualization techniques, and especially photogrammetry / computer vision hits a snag when it comes to an artefact with unvaried texture. It is difficult to determine which of the techniques is „better“, because utility depends on intention with which the 3D model was built (ideally, photogrammetry / computer vision produces better texture data and is thus more suitable for artefact presentation, whereas 3D scanning normally gives a more accurate and precise result). The best solution for an overall appearance is therefore a combination of both techniques.

Why do we need 3D models of artefacts? There are many answers to this question, but the main reasons are:

- effective transmission of the knowledge about an artefact;
- credible documentation of the present state of an artefact;
- examination of certain characteristics of an artefact that could otherwise not be studied; or a simplification of the examination procedure; a 3D model is therefore not only an appealing addition, but also an interpretative tool.

2.5D and especially 3D visualizations are increasingly applied in the field of cultural heritage. The use of 3D digitalization techniques (as well as 2.5D visualizations) is largely determined by the availability of the technology. Recent technological development caused 3D visualization techniques to become ever more cost efficient and intuitive. Lower prices and user friendly equipment help to increase its usage. New technologies, combination of different practices and collaboration with computer scientists are promising an exciting future for visualization techniques. Having said that, it is of primary importance that the new technology first be acknowledged by cultural heritage workers.

Literatura

- ABDEL - BARY EBRAHIM, M. 2011, 3D laser scanners. History, applications, and future. Review article: <http://www.scribd.com/doc/78617189/3D-Laser-Scanner-Article-Review> (dostop 4. 11. 2012).
- BACHFELD, D., P. KÖNIG, P. ZOTA 2012, Kopieren in 3D. Räumlich scannen mit Digitalkamera, Kinect oder Laser-Scanner. – *c't Magazin für Computer Technik* 11, 86–91.
- COOPER, M. A. R. in S. ROBSON 2001, Theory of close range photogrammetry. – V: K. B. Atkinson (ur.) 2001, *Close range photogrammetry and machine vision*, 9–51.
- FELLNER, D. W., S. HAVEMANN, P. BECKMANN, X. PAN 2011, Practical 3D Reconstruction of Cultural Heritage Artefacts from Photographs - Potentials and Issues. – *Virtual Archaeology Review* 4 (2), 95–103
- FISCHER, B., A. DAKOURI - HILD (ur.) 2008, *Beyond Illustration. 2D and 3D digital technologies as tools for discovery in archaeology*. – BAR International Series 1805, Oxford.
- FRYER, J. G. 2001, Introduction. – V: K. B. Atkinson (ur.) 2001, *Close range photogrammetry and machine vision*, 1–9.
- HAMEEUW, H., G. WILLEMS 2011, New visualization techniques for cuneiform texts and sealings. – *Akkadika* 132 (2), 163–178.
- HARTLEY, R., A. ZISSERMAN 2008, *Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge.
- KARASIK, A., U. SMILANSKY 2008, 3D scanning technology as a standard archaeological tool for pottery analysis: practice and theory. – *Journal of Archaeological Science* 35, 1148–1168.
- KOLLER, D., B. FISCHER, G. HUMPHREYS 2009, Research challenges for digital archives of 3D cultural heritage models. – *ACM Journal on Computing and Cultural Heritage* 2 (3): <http://doi.acm.org/10.1145/1658346.1658347> (dostop 4. 11. 2012).
- LI, R., T. LUO, H. ZHA 2010, 3D Digitization and its applications in cultural heritage. – V: D. Hutchison, T. Kanade, J. Kittler, J. M. Kleinberg, A. Kobsa, F. Mattern (ur.) 2010, *Digital heritage. Third International Euro-Mediterranean Conference, EuroMed 2010*, Lemessos, Cyprus, November 8–13, 2010. Berlin.
- MALZBENDER, T., D. GELB, H. WOLTERS 2001 Polynomial Texture Maps. – *SIGGRAPH '01: Proceedings of the 28th annual conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*: <http://www.hpl.hp.com/research/ptm/papers/ptm.pdf> (dostop 18. 10. 2012).
- MALZBENDER, T., B. WILBURN, D. GELB, B. AMBRISCO 2006, Surface Enhancement Using Real-time Photometric Stereo and Reflectance Transformation: http://www.hpl.hp.com/personal/Tom_Malzbender/papers/egrw2006.pdf (dostop 18. 10. 2012).
- MUDGE, M., T. MALZBENDER, A. CHALMERS, R. SCOPIGNO, J. DAVIS, O. WANG 2008, Image-Based Empirical Information Acquisition, Scientific Reliability, and Long-Term Digital Preservation for the Natural Sciences and Cultural Heritage. – V: M. Roussou, J. Leigh (ur.) 2008, *EUROGRAPHICS 2008*, 14.–18. 4. 2008, Crete, Greece: http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL_COPIES/MUDGE/EG-mudge-tutorial-notes-final.pdf (dostop 18. 10. 2012).
- PEZZATI, L., R. FONTANA 2008, *Handbook on the use of lasers in conservation and conservation science*: <http://www.optimet.com/publications/cnr-inoia-3d-scanning-of-artworks.pdf> (dostop 18. 10. 2012).
- REMONDINO, F. 2011, Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning. – *Remote Sensing* 3 (6), 1104–1138.
- ROBERTSON, D. P., CIPOLLA, R. 2009, Structure from motion. – V: Varga, M. (ur.) 2009, *Practica. Image Processing and Computer Vision*. – New York, John Wiley and Sons Ltd.
- QUAN, L. 2010, *Image-based modelling*. New York.
- STANCO, F., S. BATTIATO, G. GALLO (ur.) 2011, *Digital imaging for cultural heritage preservation. Analysis, restoration, and reconstruction of ancient artworks*, Boca Raton.
- TINGDAHL, D., M. VERGAUWEN, L. van GOOL 2011, ARC3D. A public web service that turns photos into 3D models. – V: F. Stanco, S. Battiato, G. Gallo (ur.) 2011, *Digital imaging for cultural heritage preservation. Analysis, restoration, and reconstruction of ancient artworks*, Boca Raton, 101–125.
- WALLACE, A. M. 2005, Three-Dimensional Laser Imaging in an Archaeological Context. – V: A. K. Bowman, M. Brady (ur.) 2005, *Images and Artefacts of the Ancient World*, Oxford, 89–98.

Spletni viri

Splet 1 / Web 1: <http://www.shoogleit.com/>
(dostop 18. 10. 2012)

Splet 2 / Web 2: <http://wiki.panotools.org/>
(dostop 18. 10. 2012)

Splet 3 / Web 3: <http://panotools.sourceforge.net/>
(dostop 18. 10. 2012)

Splet 4 / Web 4: <http://gardengnomesoftware.com/object2vr.php> (dostop 18. 10. 2012)

Splet 5 / Web 5: <http://www.vrtoolbox.com/>
(dostop 18. 10. 2012)

Splet 6 / Web 5: <http://www.easypano.com/>
(dostop 18. 10. 2012)

Splet 7 / Web 7: <http://www.hpl.hp.com/research/ptm/downloads/download.html> (dostop 18. 10. 2012)

Splet 8 / Web 8: <http://culturalheritageimaging.org/>
(dostop 18. 10. 2012)

Splet 9 / Web 9: http://www.southampton.ac.uk/archaeology/acrg/acrg_research_DEDEFI.html
(dostop 18. 10. 2012)

Splet 10 / Web 10: <http://reconstructme.net/>
(dostop 18. 10. 2012)

Splet 11 / Web 11: <http://itseez.com/>
(dostop 18. 10. 2012)

Splet 12 / Web 12: <http://www.pointclouds.org/news/kinectfusion-open-source.html> (dostop 18. 10. 2012)

Splet 13 / Web 13: http://arena.openni.org/OpenNI-Arena/Applications/ViewApp.aspx?app_id=426
(dostop 18. 10. 2012)

Splet 14 / Web 14: <http://www.david-laserscanner.com/>
(dostop 18. 10. 2012)

Splet 15 / Web 15: <http://www.3dprinter.net/directory/3d-scanners-3d-scanning-software> (dostop 18. 10. 2012)

Splet 16 / Web 16: <http://www.nextengine.com>
(dostop 18. 10. 2012)

Splet 17 / Web 17: http://www.artec3d.com/3d_scanners/artec-eva (dostop 18. 10. 2012)

Splet 18 / Web 18: <http://meshlab.sourceforge.net/>
(dostop 18. 10. 2012)

Splet 19 / Web 19: <http://www.geomagic.com/>
(dostop 18. 10. 2012)

Splet 20 / Web 20: <http://www.rapidform.com/>
(dostop 18. 10. 2012)

Splet 21 / Web 21: <http://www.innovmetric.com>
(dostop 18. 10. 2012)

Splet 22 / Web 22: www.carnuntum-db.at
(dostop 5. 11. 2012)

Splet 23 / Web 23: <http://www.virtualmuseumiraq.cnr.it/homeENG.htm> (dostop 5. 11. 2012)

Splet 24 / Web 24: <http://e-conservationonline.com/content/view/982> (dostop 18. 10. 2012).
