

UVAJANJE 3D TEHNOLOGIJ PRI VARSTVU KULTURNE DEDIŠČINE

Žiga Stopinšek ^a, Gregor Berginc ^b, Miran Eric ^c, Franc Solina ^a

^a Laboratorij za računalniški vid
Fakulteta za računalništvo in informatiko, Univerza v Ljubljani
E-pošta: ziga@stopinsek.eu
URL: <http://lrv.fri.uni-lj.si>

^b Tretja dimenzija d.o.o, XLAB d.o.o.
E-pošta: gregor.berginc@3dimenzija.si
URL: <http://www.3dimenzija.si>

^c Zavod za varstvo kulturne dediščine Slovenije
E-pošta: miran.eric@guest.arnes.si
URL: <http://www.zvkds.si>

POVZETEK: *Pocenitev tridimenzionalnih merilnikov in napredek tehnik snemanja in zajemanja podatkov omogočata njihovo uporabo na različnih področjih. Nova strojna in programska orodja, ki omogočajo široko računalniško podprto tridimenzionalno dokumentiranje, so še posebej pomembna tudi pri varstvu kulturne dediščine. Različne metode zajemanja podatkov, bodisi z merilniki, bodisi z fotogrametričnimi ovrednotenji množic slikovnega gradiva, je sedaj mogoče 3D dokumentirati tako posamezne predmete kot tudi prostor, v katerem živimo. V zadnjih letih postaja tridimenzionalna dokumentacija zaradi dostopnosti do strojnih orodij nepogrešljivo orodje tudi v sodobnem varstvu kulturne dediščine. Žal pa je za namensko uporabo pri analizi, standardizaciji, dokumentiranju, arhiviranju in interpretaciji tridimenzionalne dokumentirane kulturne dediščine na razpolago zelo malo programskih orodij.*

1. UVOD

Zavest o pomenu raznovrstne in bogate kulturne dediščine v svetu in še zlasti v Evropi, skokovit tehnološki napredek v informacijskih tehnologijah, ki nam omogoča digitalizacijo te dediščine, ter potreba po javni dostopnosti do dediščine, je skrbnike dediščine prepričalo o nujnosti ustvarjanja digitalnega arhiva in vzpostavitve dostopnosti do dediščine prek spletnega omrežja. Del te skupne dediščine je tudi arheološka dediščina, katere najpomembnejši del procesa razumevanja je celovito, natančno in čim bolj popolno dokumentiranje [1, 3, 4]. Tovrstna dediščina je zaradi naravnih erozijskih

procesov kot tudi namernega ali nenamernega uničevanja minljiva in izginja. Javna dostopnost do arheološke kulturne dediščine, še zlasti tiste v prostoru (pokrajine, območja bivanja, naselbine, kompleksnejše arhitekturne in druge strukture), je zelo omejena ali pa celo nedostopna (podvodna dediščina). Zato je naloga arheologov in strokovnjakov na področju varstva kulturne dediščine sistematično pripraviti dobro dokumentarno gradivo.

Analogne oblike dokumentiranja najdišč in predmetov (risana gradiva) imajo vrsto nezanemarljivih pomanjkljivosti, kakršne so lahko človeška površnost in subjektivne interpretacije v postopku sistematičnega ustvarjanja dokumentarnega gradiva. Zaradi zmogljivosti in dostopnosti do informacijskih tehnologij se je v sodobni arheologiji povečala in razširila izraba digitalnih naprav in programskih orodij za ustvarjanje dobrega dokumentarnega gradiva, hkrati pa so se povečale možnosti za pripravo dobrega interpretacijskega gradiva.

V ta nabor sodijo tudi aktivni 3D merilniki in najsodobnejša programska orodja za 3D analizo in 3D interpretacijo nizov fotografskega gradiva.

Večplastno 3D gradivo nadomešča pomanjkljivosti analognega gradiva in postaja pomemben del arheološkega dokumentarnega gradiva [7]. Dobro pripravljene dokumentarne 3D modeli postajajo pomembna podlaga za interpretativno raziskovalno delo. Sodoben razvoj programskih orodij že omogoča računalniško segmentiranje 3D modelov in analitično ter sintetično razumevanje elementov arheološke dediščine. Vid je za človeka najpomembnejši čut za zaznavanje svetlobnih dražljajev in s tem razumevanje prostora v katerem se giba. Slika, ki jo ustvarijo možgani, sekundarno pa jo človek ustvarja na različne podlage, je najlažje razumljiva oblika sporazumevanja, vsled tega pa je tudi razumevanje in predstava o arheološkem dokumentarnem gradivu najlažja z ogledom 3D modela.

Kljub temu da so v arheologiji že v uporabi metodologije zajemanja 3D podatkov, tudi aktivni 3D merilniki ter posodobljene stereofotogrametrične analize za potrebe ustvarjanja 3D modelov, pa postopki ustvarjanja 3D dokumentarnega gradiva, naprave, formati modelov ter programska orodja še niso standardizirani.

V nadaljevanju bomo predstavili nekatere postopke in oblike globinskega zajemanja podatkov na kopnem ter ocenili prednosti in slabosti teh oblik. Teste smo opravili s pripravo dokumentarnega gradiva notranjskega plovila *drevaka*, ki smo ga posneli z aktivnim 3D merilnikom. V nadaljevanju smo preverili tudi uporabnost razpoložljivih oblik dokumentiranja v podvodni arheologiji. V ta namen smo sodelovali pri dokumentiranju rimskega tovornega plovila v Sinji Gorici. V zadnjem delu bomo preverili še pomen 3D modelov v arheologiji in opisali nekatere možne rešitve pri standardizaciji in programski opreми.

2. 3D DOKUMENTACIJA NA KOPNEM

Na podlagi testnih snemanj smo ugotovili, da je uporaba aktivnih 3D merilnikov primerna predvsem za predmete in območja, ki jih želimo natančno dokumentirati.

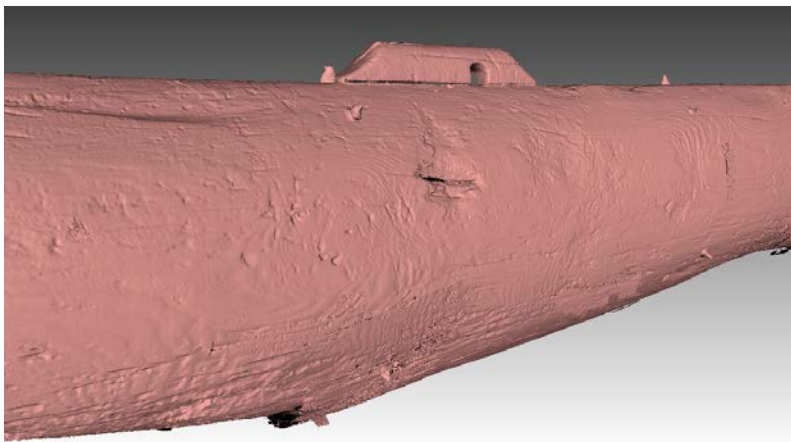
Danes je na razpolago množica različnih vrst merilnikov. Za uporabo v arheologiji so zanimivi predvsem laserski merilniki, ki delujejo na podlagi triangulacije (LMT) in merilniki s strukturirano svetlobo (MSS) [6]. Merilniki TOF (Time-Of-Flight) so primernejši za snemanje prostora in obsežnejših najdišč.

Za dokumentiranje arheoloških najdišč je pomembna mobilnost, ustrezna natančnost, terenska prilagodljivost (močna svetloba, oblačno vreme, deževje), prostorski pogoji (gradbišče, obala, jame), hitrost snemanja, sprotni nadzor nad zajetimi podatki, zajem tekstur ter cenovna ugodnost.

LMT in MSS zagotavljajo visoko natančnost in hitrost zajemanja podatkov. Slednje je predpogoj za sočasen nadzor nad zajetimi podatki. Oboji imajo težave z gladkimi, ravnimi in bleščečimi površinami ter s površinami, ki svetlobo močno vpijajo. Za večja arheološka območja in arhitekturo so primernejši LMT, MSS, ki imajo goriščno razdaljo običajno le okoli enega metra, pa so primernejši za manjša območja, dele najdišč in predmete. MSS za zajem podatka uporabljajo belo svetlobo, vsled česar so občutljivi na močno svetlobo iz okolice. Pri LMT je potrebno poskrbeti za varnost, saj so laserski žarki nevarni za oči. Na tržišču je danes dostopna množica cenovno dostopnih merilnikov (ArtecGroup, DAVID, NextEngine, Microsoft in drugi).

3D modele je mogoče ustvarjati tudi s pasivnimi metodami, predvsem fotogrametrijo. V arheologiji je zelo uporabna zaradi natančnosti, hitrosti zajemanja 3D podatkovnih slojev za večja območja in cenovne dostopnosti, vendar zahteva veliko procesorske moči pri obdelavi fotografij. Zaradi naštetega je fotogrametrija dobra zamenjava za drage merilnike TOF.

2.1 Primer: snemanje in modeliranje drevaka



Slika 1: Del 3D modela drevaka. Na sliki se vidijo napake, ki so rezultat težav pri snemanju dolgih enakomernih površin. Podrobnosti na plovilu so zajete z zadovoljivo natančnostjo.

Drevak, v svoji zbirki ga hrani tehniški muzej Slovenije v Bistri, je tipična notranjska jezerska ladja [7] dolga 5,5 m in široka do 1 m. Predstavlja primer večjega in zahtevnega predmeta za snemanje. Snemanje je trajalo 6 ur z 48 zajemi podatkov ter težavami zaradi velikosti in močnega opoldanskega sonca. Snemanje je bilo izvedeno z MSS Artec MHT, ki zajema tudi teksturo površin snemanih predmetov. Podatki so bili procesirani v aplikaciji Artec Studio 8, ki omogoča združevanje, urejanje, registracijo 3D modelov, poenostavljanje, polnjenje lukenj in odstranjevanje šuma. Zaradi velikega števila in skupne velikosti zajemov (okoli 30 GB) v glavnem pomnilniku je registracija in pretvorba dna *drevaka* v model trajala 12 dni. Rezultat je viden na Sliki 1. Pridobljena triangulirana mreža je velika okoli 2 GB.

3. 3D DOKUMENTACIJA V PODVODNI ARHEOLOGIJI

Sodobno varstvo kulturne dediščine, tako tudi v podvodni arheologiji, priporoča ohranjanje dediščine *insitu*. Vodno okolje je za arheološko raziskovalno delo v primerjavi s suhozemnimi najdišči izjemno težko [4]. Sodelavci pri projektih morajo biti vrhunsko usposobljeni potapljači, delo pod vodo pa je iz različnih razlogov (omejeno gibanje, tok, slaba vidljivost, dostopnost, globina, razpoložljivi čas) lahko tudi življenjsko nevarno. Zato je pomembno oblikovati dobro razmerje med vrhunsko izvedenim dokumentiranjem najdišča (omogoča poznejše meritve, analizo in interpretacijo) in porabljenim časom. K izboljševanju tega razmerja danes močno prispevajo metodologije 3D dokumentiranja. Pogoji za snemanje pod vodo so zahtevni. Na kvaliteto podvodnega zajema podatkov vpliva razpršitev in absorpcija svetlobe ter motnost medija, kar zmanjšuje kontrast in svetilnost, poveča izgubo podrobnosti in spremembo barve.

Aktivni 3D merilniki so prirejeni za delo na kopnem. Laboratorijsko so sicer raziskovalci s primernimi ohišji in drugimi rešitvami LMT prilagodili tudi za delo pod vodo [8]. Žal pa ni cenovno dostopnih naprav za operativno terensko podvodno delo. Poseben problem predstavlja tudi uporaba bele svetlobe, zato je priporočena uporaba monokromatske ali koherentne svetlobe. Prilagoditev aktivnih merilnikov za delo pod vodo odpira vrsto težko rešljivih problemov. Za 3D modeliranje so tako primernejši in cenovno dostopnejši pasivni sistemi, npr. eno ali večsmerni stereo sistemi [9] ter fotogrametrija. Težava pri pasivnih sistemih je iskanje ujemajoče se točke na slikah (korespondenca) zaradi enostavnih in monotonih tekstur pod vodo. Dobre rezultate trenutno prispevajo kombinacije različnih metod. Na Univerzi v Calabriji so uporabili več MSS in jih povezali v stereo sistem [2]. Na Univerzi v Shizouki pa so s projekcijo binarnega vzorca med fotografiranjem predmeta rešili problem korespondence [5].

Operativnega podvodnega arheološkega dokumentiranja pa laboratorijske rešitve še vedno ne morejo povsem zadovoljiti.

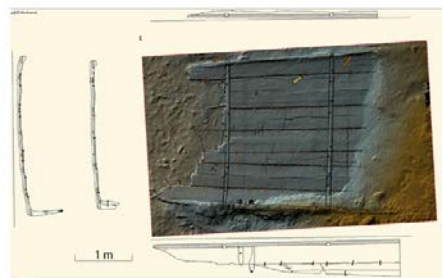
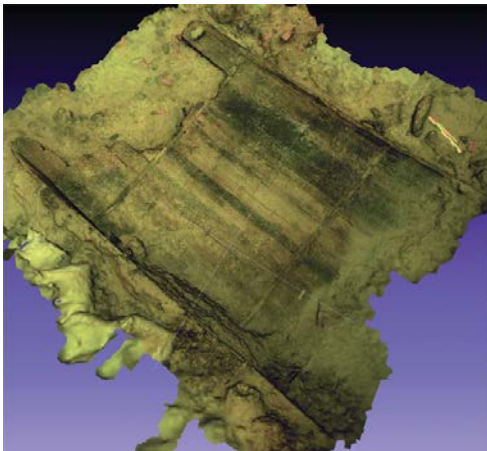
3.1 Primer: dokumentiranje rimske tovorne ladje v Sinji Gorici

Oktobra 2012 je v Sinji Gorici v Ljubljani potekalo dokumentiranje rimskega tovornega plovila iz prve polovice prvega stoletja [3]. To je avgustejsko obdobje, ko je

bilo delovanje rimskega mesta Nauporta, ki je ležal na območju današnje Vrhnike, na višku. Zaradi zahtevnosti posega in zelo kratkega razpoložljivega časa je bila v Sloveniji za 3D dokumentiranje prvič pod vodo uporabljena metoda fotogrametrije. Kljub želji po primerjalni dokumentaciji analogno dokumentiranje z risanjem tlorisa in presekov v mreži kvadrantov zaradi pomanjkanja časa ni bilo izvedeno. Vendar pa so se s fotogrametrijo pridobljeni 3D modeli izkazali za zelo natančne, reprezentativne ter izjemno analitično uporabne (Slika 2).

Na podlagi izkušenj¹ iz analognega dokumentiranja je, kljub temu, da primerjalna analiza ni bila izvedena, mogoče oceniti, da bi bila kvaliteta in natančnost analognega dokumenta zaradi omejenosti in odstopanj pri meritvah z metri in risanju na tablo vsaj 20% slabša, 3D modela pa na podlagi teh podatkov sploh ni mogoče izdelati. Izjemno pomembno je dejstvo, da bi za analogno dokumentiranje 12 m² velike površine plovila potrebovali najmanj 15 do 20 dragih in potencialno nevarnih potapljaških ur.

Za namenska fotografiranja² plovila v 4 različnih stanjih raziskav so bile potrebne 3 potapljaške ure. Iz setov fotografij (ločljivosti 4288x2848 dpi) so bili sestavljeni trije 3D modeli. V Laboratoriju za računalniški vid FRI UL za potrebe preverjanja natančnosti fotogrametričnih 3D modelov nastalih iz dveh skupin fotografij, posnetih v dveh različnih potopih, poteka primerjalna analiza, ki bo potrdila ali zavrgla pričakovanja o absolutni natančnosti dokumentirane najdbe.



Slika 2: 3D model rimske tovarne ladje (levo), in predelava modela za nadaljno analizo (desno).

¹ Soavtor pričujočega članka M. Erič na področju raziskovanj v podvodni arheologiji deluje od leta 1988, s problematiko 3D dokumentiranja podvodnih arheoloških najdišč pa se poglobljeno ukvarja od leta 1999.

² Opravil jih je Rok Kovačič (svetovni prvak v podvodni fotografiji 2011) s fotoaparatom Nikon D300 ter 18 mm objektivom. Za vsak 3D model je bilo narejenih okoli 900 fotografij.

4. UPORABA 3D PODATKOV V ARHEOLOGIJI

Potencial dobljenih 3D podatkov je, mimo atraktivnega pogleda na virtualni 3D model, širše uporaben. V nasprotju z 2D fotografijo, ki nespremenljivo določa smer in kot pogleda ter interpretirano 2D tlorisno dokumentacijo, omogoča 3D model simuliran virtualen pogled v dokumentirane površine ali predmete, ki jih je mogoče proučevati skoraj povsem tako kot *insitu*. Pomembneje pa je, da so zaradi morfoloških značilnosti 3D oblakov prostorsko umeščenih točk, absolutni posnetek trenutnega stanja, povsem odprte možnosti nadaljnjih analiz 3D modela, ki jih ne bi mogli opraviti niti realno na originalnih površinah arheoloških najdišč. Sistematično in načrtno je mogoče proučevati, segmentirati ali klasificirati izbrane površine na 3D modelu. Z avtomatiziranim iskanjem in analiziranjem površin je mogoče na modelu poiskati značilne elemente, ki bi sicer bili zaradi omejenega časa v naravnem okolju spregledani. Pomembna pa je tudi verjetna³ arhivska trajnost digitalnega arheološkega dokumentarnega gradiva kot podlaga za proučevanje, promocijo, interpretacijo in turistično trajnostno rabo.

4.1 Standardizacija

V arheologiji je v uporabi množica merilnih naprav za prostorske meritve naravnega in kulturno spremenjenega prostora.⁴ Dokaj podhranjeno je 3D dokumentiranje v večji ločljivosti, saj so tehnike, ki so v uporabi pri daljinskem zaznavanju, premalo natančne. Tudi uporaba TOF in LMT za širša 3D dokumentiranja so v proučevanju podrobnosti premalo natančna.

Zato se pojavlja potreba po standardiziranju 1) primernih tehnik in merilnikov za razumevanje razlik v natančnosti, obsegu, formatih in kompresijskih algoritmov visoko ločljivih 3D modelov, 2) dostopne in primerne programske opreme za procesiranje modelov ponuja različne algoritme in filtre za poenostavitve in druge posege v 3D model, 3) potek 3D snemanja, 4) kombinirana 3D snemanja s fotografskim arhivom in analognimi načrti, 5) možnosti analize 3D podatkov, segmentiranje, fragmentiranje ter uporaba podatkov v svetovnih spletih in mobilnih aplikacijah

4.2 Programska oprema

Le nekaj računalniških aplikacij rešuje izrazito arheološka vprašanja. Mednje sodi predvsem program za Harrisovo matriko časovnih soodvisnosti stratigrafskih enot pri izkopavanjih ter nanj vezan StratiGraf za arhiviranje arheoloških izkopavanj, ter izjemno dober Site Recorder za kartiranje dediščine. Deluje na podlagi množice medsebojnih

³ Vprašanje trajnosti digitalnih podatkov je široka in zelo zahtevna tema, predmet številnih znanstvenih raziskav, ki doslej še niso povsem zanesljivo ponudile končnega odgovora.

⁴ Posebej intenzivno so se različne merilne tehnike v arheologijo implementirale po spremenjenih načelih arheoloških znanosti, ki govorijo o čim boljšem ohranjanju arheoloških najdišč. Razvijati so se začele metode daljinskega zaznavanja (Remote Sensing), z uporabo laserskih, sonarskih, geoelektričnih, geomagnetnih, geotermalnih, ultrafrekvenčnih, spektrometričnih, seizmičnih, geokemičnih, fotogrametričnih in drugih tehnik proučevanja morfologije in notranje strukture zemljine.

meritev, ki jih aplikacija triangulira v absolutno natančnost. Žal pa je zelo zamudno zajemanje podatkov pod vodo. Nekaj programov je razvitih tudi v posameznih univerzitetnih okoljih, vendar so slabo ali celo nedostopni. Tu je še nekaj specializiranih programov za dendrokronologijo (Past) in datacije radikarbonskih datacij (Ox-Cal)

Za procesiranje 3D podatkovnih slojev, ki izvirajo iz naslova arheoloških raziskav na področju daljinskega zaznavanja, je na razpolago množica programskih orodij, v večini razvitih kot podpora strojni merilni opremi. Nekaj je tudi univerzalnih, zelo močnih, vendar tudi zelo dragih programskih rešitev. Mednje sodijo programske rešitve AutoCad, Surfer, ArcGis, PhotoModeler, Maya, Catia, Erdas, MapInfo, Las, Intergraf in mnogi drugi. S temi programi se tudi rešuje večina potreb po analitičnem dokumentiranju arheoloških podatkovnih slojev.

Za poglobljeno procesiranje 3D arheoloških podatkovnih slojev še ni razvitega učinkovitega namenskega programskega orodja. Obstajajo pa programske rešitve za izdelavo 3D arheoloških podatkovnih slojev iz digitalnih fotografij v obliki prostodostopnih in plačljivih storitev v oblaku (PHOV/Mementify⁵, 123D Catch) Omenjene rešitve temeljijo na tehnologiji »oblika iz gibanja« (ang. *structure from motion*), pri kateri se na podlagi ujemanj slikovnih značilnic sosednjih slik izvede samodejna kalibracija sistema kamer ter izgradnja gostega oblaka točk. Za prikazovanje in urejanje 3D modelov je zelo primerno prostodostopno programsko orodje MeshLab, ki omogoča tudi delo z obsežnimi 3D modeli..

Uporabniki pričakujejo naslednje rešitve: 1) interaktivno ogledovanje in urejanje 3D modelov, 2) ogledovanje in izvoz presekov modela v linearnih 3D oblikah v druga programska orodja, 3) pretvorbe 3D modelov v realno velikost in integracijo v absolutne koordinatne sisteme CAD in GIS okolja, 4) določanje in odpiranje točk na 3D modelu, za povezavo z drugimi deli arhivskega gradiva, 5) segmentacijo, poenostavljanje, dvosmerno avtomatizirano interpretacijo delno prepoznanih elementov 3D modela ter izločanje prepoznanih elementov za kasnejšo analizo, 6) klasifikacija elementov z uporabo prosto dostopnih podatkovnih zbirk ter 7) možnost fotogrametričnega 3D modeliranja brez posrednikov.

Izpostavljamo nekaj brezplačnih in odprtokodnih platform, ki bi lahko bile primerne kot izhodišče razvoja rešitve. SketchUp [12] ni odprtokoden, vendar ponuja vmesnik v programskem jeziku Ruby za manipulacijo scene. Poleg tega omogoča komunikacijo z vgrajenim brskalniškim oknom. Ima pa hude pomanjkljivosti povezane s hitrostjo in odpiranjem večjih 3D modelov, ki morajo biti v COLLADA formatu.

Velik potencial ima lahko uporaba WebGL-a [13] preko knjižnic three.JS, SceneJS ali OSG.JS, vendar se lahko pojavijo prostorske in časovne težave z velikimi modeli.

MeshLab [10] je odprtokoden program za prikazovanje in urejanje 3D modelov. Je hiter, omogoča pa uvažanje in izvažanje modelov v veliko formatov (OBJ, PTY, STL, itd).

⁵ Ena pomembnejših svetovnih programskih rešitev za izdelavo 3D modelov s pomočjo fotogrametrije je nastala v podjetjih Xlab in Tretja Dimenzija iz Slovenije [11].

Ponuja vmesnik v programskem jeziku C++ za pripravo različnih razširitev: uvažanje oz. izvažanje informacij, filtre in orodja za urejanje modela.

5. ZAKLJUČEK

Varstvo kulturne dediščine je zapleten ciklični proces, ki ga vzdržujejo različni dejavniki. Razvoj 3D tehnologij je ponudil možnosti, ki bi lahko podkrepile učinkovitost njene zaščite. Omogočil je nove oblike zajema informacij ter njihove predstavitve, analize in obdelave. V sodobni arheologiji se že uporabljajo tehnike globinskega zaznavanja, vendar pa pomanjkanje standardizacije postopkov ogroža enoten pristop k arhiviranju ter analizi in obdelavi pridobljenih 3D modelov.

V članku smo predstavili nekaj metod globinskega zaznavanja, ki so primerne za 3D dokumentacijo na kopnem in pod vodo. Metode smo tudi ovrednotili na plovilu *drevaku* in potopljeni rimski ladji. Opisali smo rešitve, ki jih obetajo 3D informacije v arheologiji. Izpostavili smo nerešena vprašanja pri standardizaciji ter programske rešitve, ki bi lahko predstavljale iztočnico za nadaljnje delo.

V nadaljevanju bi bilo potrebno izvesti temeljite študije o natančnosti in uporabnosti 3D modelov ter preveriti možnost delne ali popolne zamenjave analognih metod dokumentiranja s 3D dokumentacijo. Pripraviti bo potrebno programsko opremo, ki bo sposobna takšne informacije obdelovati in učinkovito pomagati arheologom pri analizi in vrednotenju teh informacij.

LITERATURA

1. W. Böhler, G. Heinz (1999), Documentation, surveying, photogrammetry, *XVII Cypa Symposium*, Olinda, Brazil.
2. F. Bruno, G. Bianco, M. Muzzupappa, S. Barone, A. V. RZIONALE (2011), Experimentation of structured light and stereo vision for underwater reconstruction, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 66, str. 508-518.
3. M. Erič (2012), Documenting a Roman Vessel at Sinja Gorica, *Yearbook of the International Centre for Underwater Archaeology in Zadar*, no. 2, str. 58-65.
4. A. Gaspari, M. Erič (2010), *Minimalni standardi podvodnih arheoloških raziskav: izhodišča in smernice*, projektna študija, Ministrstvo za kulturo RS. (http://www.arhiv.mk.gov.si/fileadmin/mk.gov.si/pageuploads/Ministrstvo/raziskave-analize/dediscina/STANDARDI_PODVODNIH_RAZISKAV_20100301.pdf)
5. R. Kawai, A. Yamashita, T. Kaneko (2009), Three-dimensional measurement of objects in water by using space encoding method, *Proceedings of the 2009 IEEE international conference on Robotics and Automation*, str. 2890-2835.

6. G. Sansoni, M. Trebeschi, F. Docchio (2009), State-of-the-art and applications of 3d imaging sensors in industry, cultural heritage, medicine and criminal investigation, *Sensors*, vol. 9, str. 586-601.
7. Ž. Stopinšek (2012), *Uporabnost 3D merilnikov v kulturni dediščini*, diplomsko delo, Fakulteta za računalništvo in informatiko, Univerza v Ljubljani.
8. A. Yamashita, S. Ikeda, T. Kaneko (2005), 3-d measurement of objects in unknown aquatic environments with a laser range finder, *Proceedings of the 2005 IEEE international conference on Robotics and Automation*, str. 3912-3917.
9. A. Yamashita, R. Kawanishi, T. Koketsu, T. Kaneko, H. Asama (2011), Underwater sensing with omni-directional stereo camera, *Proceedings of the 11th Workshop on Omnidirectional Vision, Camera Networks and Non-classical Cameras (OMNIVIS2011)*, str. 304-311.
10. <http://meshlab.sourceforge.net/>
MeshLab.
11. <http://phov.eu>
PHOV.
12. <http://www.sketchup.com>
SketchUp.
13. <http://en.wikipedia.org/wiki/WebGL>
WebGL.