

## Poglavje 9

# 3D modeliranje podvodnih posnetkov

Žiga Stopinšek in Franc Solina

**Povzetek** Z večslikovno fotogrametrijo nastajajo ogromni oblaki 3D točk, ki so primerni predvsem za 3D vizualizacijo nekega okolja, vendar za analizo scene in primerjavo objektov potrebujemo bolj kompaktne modele. Superelipsoidi so dobri kandidati za takšne naloge, saj že obstajajo avtomatske metode za njihovo rekonstrukcijo in segmentacijo iz 3D točk in trikotniških mrež. V prispevku predstavljamo študijski primer arheološke 3D dokumentacije rimske tovorne ladje iz 2. – 3. stoletja. Predstavljamo, kako lahko s superelipsoidi modeliramo sarkofage in druge kamnite izdelke. Pripravili smo primerjavo direktno izmerjenih dimenzij kamnitih izdelkov na 3D oblaku točk z izračunanimi dimenzijami superelipsoidov in opisali druge prednosti, ki jih omogočajo volumetrični delni modeli.

**Ključne besede:** računalniški vid, vizualizacija, oblak 3D točk, modeliranje, segmentacija, podvodna arheologija, sarkofagi, amfore, superkvadrki

### 9.1 Uvod

Avtonomni roboti potrebujejo informacije o svojem okolju, da se lahko v njem prosto gibajo. Za ta namen so pomembne kar se da natančne 3D prostorske informacije. V zadnjem času so se razvili številni novi senzorji in nove metode za hitro pridobivanje natančnih 3D prostorskih informacij. Da bi lahko sistematično zbrali kar se da popolne in natančne informacije o prostoru in objektih v njem, pa so zopet zelo uporabni roboti, bodisi v obliki avtonomnih letalnikov, kot so mnogokopterji za zajem podatkov iz zraka, ali podvodnih robotov AUV (Autonomous Underwater Vehicle) in ROV (Remotely Operated Underwater Vehicle) za zajem podatkov pod vodo.

Ena od disciplin, kjer se zahteva zelo natančno in podrobno dokumentiranje 3D oblik je arheologija. Še posebej je ta naloga zahtevna v podvodni arheologiji zaradi človeku nevarnega okolja. Zato so se tudi v podvodni arheologiji začeli uporabljati avtonomni roboti [1]. V prispevku so opisane metode zajema 3D podatkov pod vodo in njihovega modeliranja, s poudarkom na uporabi v podvodni arheologiji. Enake

metode bi lahko uporabili tudi za druge namene. V opisanih primerih smo za zajem slikovnih podatkov uporabili potapljače, ki pa bi jih za bolj obsežno, predvsem pa globlje delovno področje, morale zamenjati avtonomne robotske podmornice.

## 9.2 Problematika arheološke dokumentacije

Najpomembnejši del procesa razumevanja arheološke dediščine je celovito, natančno in čimbolj popolno dokumentiranje [2, 3]. Dediščina je minljiva zaradi naravnih erozijskih procesov ter namernega in nenamernega človeškega uničevanja dediščine, dostopnost širši javnosti pa je pogosto omejena (podvodna dediščina). Zato je naloga arheologov in drugih strokovnjakov na področju zaščite kulturne dediščine sistematična priprava celovitega dokumentarnega gradiva.

Arheološka dokumentacija je urejena zbirka podatkov o organizaciji, izvedbi in rezultatih arheološke raziskave [4]. Namen dokumentacije je:

1. zagotoviti trajni obstoj arheoloških ostalin v dokumentacijskih medijih in tako za prihodnost ohraniti informacije in znanje o arheoloških ostalinah in raziskavi,
2. s sistematičnim zapisom (besedilom, zbirko merskih in drugih podatkov, risbo, fotografijo in drugimi vizualnimi sredstvi) omogočiti podlago za čim verodostojnejšo poznejšo interpretacijo in poustvaritev arheoloških ostalin,
3. z dogovorjenimi načini in oblikami zapisa omogočiti korektno in čim bolj celovito sporočanje podatkov o organizaciji, poteku in rezultatih raziskave strokovni in drugi javnosti.

Analogne oblike dokumentiranja najdišč in predmetov (npr. risana gradiva) imajo vrsto nezanemarljivih pomanjkljivosti [5, 6], kakršne so lahko človeška površnost in subjektivne interpretacije v postopku sistematičnega ustvarjanja dokumentarnega gradiva. Zato se je v sodobni arheologiji zaradi vse večje zmogljivosti in dostopnosti informacijskih tehnologij razširila uporaba digitalnih naprav in programske opreme za ustvarjanje dokumentarnega gradiva, hkrati pa tudi priprava sodobnejšega interpretacijskega gradiva.

V nabor dokumentarnih orodij so se v prvi vrsti pridružile predvsem digitalna fotografija in videoposnetki najdišča, danes pa zaradi cenovne dostopnosti [7] vedno pogosteje govorimo tudi o 3D dokumentaciji z aktivnimi 3D merilniki [8, 9] ter s pomočjo pasivnih metod večslikovne fotogrametrije [5, 8, 10]. Slednja se zlasti zaradi cenovne ugodnosti, enostavnosti uporabe in primerljive natančnosti z aktivnimi 3D merilniki dokazuje kot najbolj učinkovita [5, 10]. V nasprotju z 2D fotografijo, kjer je smer pogleda nespremenljivo določena, lahko s 3D modelom pridobimo simuliran virtualen vpogled v dokumentirane površine ali predmet za potrebe ogledovanja, poučevanja in raziskovanja iz vseh smeri. Poleg potencialne avtomatske in polavtomatske računalniške analize 3D modela pridobimo tudi zmožnost trajnega arhiviranja digitalne arheološke dokumentacije in virtualne predstavitve s pomočjo virtualne resničnosti.

3D gradivo prinaša veliko večjo dodano vrednost pri zaščiti kulturne dediščine, vendar zahteva celovito spremembo delovnega procesa [11]. Ker rezultati niso na

voljo takoj, moramo usmeriti veliko pozornosti v ustrezno zajemanje fotografij, postavlja pa se še vprašanje najprimernejšega arhiviranja ogromnih količin podatkov, ki jih s 3D dokumentacijo proizvajamo v veliko večji meri.

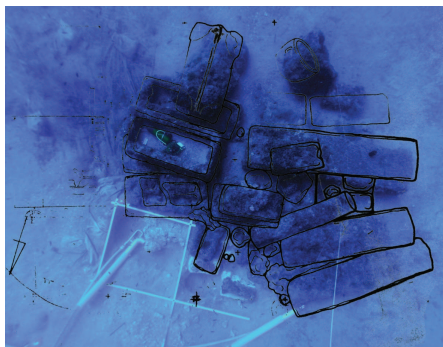
### 9.3 Okoliščine

Obdelani in polobdelani kamniti bloki predstavljajo eno najpomembnejših segmentov antične morske trgovine. Samo v Mediteranu so do danes našli več kot 50 brodolomov s kamnitimi produkti, od tega so tri s tovorom sarkofagov odkrili v Jadranskem morju (pri otokih Veliki Školj, Jakljan in Brač).

Brodolom rimske tovorne ladje v bližini kraja Sutivan na otoku Braču se nahaja na skoraj ravnem peščenem morskem dnu. Na globini 32 metrov je po približno 40 m<sup>2</sup> veliki površini vidnih 23 kamnitih izdelkov. Med kamnitimi izdelki so sarkofagi s pokrovi, grobo pripravljene nagrobni kamni in kamnit dolij (posoda za shranjevanje olja). Ocenjuje se, da je rimska tovarna ladja, ki je nosila kamniti tovor, morala biti velika med 20 in 22 metri [12].

### 9.4 Dokumentacija

Brodolom s sarkofagi je bil ročno dokumentiran v dveh raziskovalnih odpravah. Med arheološko odpravo leta 2010 je bila po površini postavljena kovinska mreža, sestavljena iz 2×2 metra velikih kvadratov, namenjenih za meritve z merskimi trakovi in ročno skiciranje, za kar je bilo potrebnih skupaj okoli 34 potapljaških ur, zahtevne okoliščine za delo pa so privedle do večjih razhajanj med načrtom in najdiščem. Ta lahko vidimo na sliki 9.1, ki nazorno ponazarja razlike med ročno skico in pozneje narejenim ortofotom.



Slika 9.1: Primerjava arheološkega načrta najdišča z ortofotom. Odstopanja v analognih meritvah so velika tudi do 50 cm.

Med arheološko odpravo leta 2012 se je v enournem potopu zajelo 900 fotografij približno 110 m<sup>2</sup> velikega najdišča za večslikovno fotogrametrično rekonstrukcijo brodoloma [12]. Fotografije je zajemal Rok Kovačič z DSRL fotoaparatom modela Nikon 300. Oblak 3D točk in trikotniška mreža (Slika 9.2) sta bili pripravljena s spletno storitvijo PHOV (angl. *PHoto field Of View*) Mementify [5] dveh slovenskih podjetij Xlab Research in 3dimenzija.

Fotogrametrična rekonstrukcija s PHOV Mementify poteka v treh korakih:

1. določanje korespondenčnih točk na fotografijah,
2. priprava oblaka točk na podlagi triangulacije korespondenčnih točk,
3. priprava 3D trikotniške mreže na podlagi prilagajanja velikega poligona okoli vseh točk in postopnega zmanjševanja njegovega volumna, dokler se poligon popolnoma ne ujema z oblakom točk.

Če primerjamo ročno narisane načrte (Slika 9.1) z ortofotom, so razhajanja večja od 50 cm, priprava ročne dokumentacije pa je zahtevala 30 potapljaških ur. Zajem 900 fotografij, ki je omogočil izdelavo ortofota in kasneje oblaka 3D točk, pa je trajal le 35 minut. Na podoben način smo pridobili tudi oblak 3D točk za rimsko ladjo, odkrito v Ljubljani pri Sinji gorici [13].



Slika 9.2: Oblak 3D točk brodoloma s sarkofagi je prekrit s fotografsko teksturo.

## 9.5 Metodologija

### 9.5.1 Modeliranje v računalniškem vidu

Abstrakcija nam pomaga obvladovati omejitve pri količini informacij, ki jo lahko z računalnikom obdelujemo hkrati. Dekompozicija kompleksnih objektov v posamezne enote oz. primitive je ključna za obravnavo na različnih nivojih abstrakcije. Za obvladovanje količine informacij pri 2D in 3D gradivu moramo slike razdeliti na naravne in enostavne dele, ki vizualno informacijo omejijo na končno število pomenljivih enot. Ta proces imenujemo segmentacija in je predpogoj za razumevanje slik, predpostaviti pa moramo, da se enote, ki so rezultat segmentacije, neposredno ujemajo s fizično strukturo scene, ki jo slika predstavlja. Tako lahko vidimo, da je segmentacija ključna za arheološko analizo opazovanega najdišča ali celo posamezne najdbe.

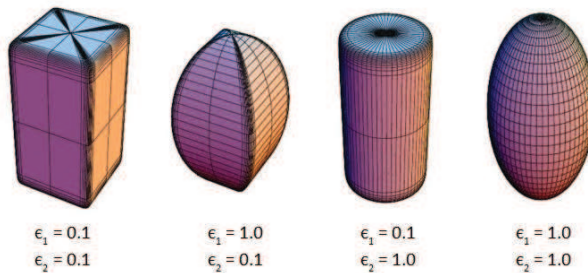
Do danes se je uporabljala številna množica modelov za modeliranje različnih zornih kotov objektov in scen. Modele, ki predstavljajo 3D strukture, lahko razdelimo na lokalne in globalne. Lokalna rekonstrukcija skuša predstaviti objekte z množico matematičnih primitivov, npr. s površinskimi zlepci (angl. *surface patch*) ali robovi.

Globalne metode pa za razliko od lokalnih skušajo rekonstruirati celoten objekt kot svojo entiteto v lastnem koordinatnem sistemu. Če se objekti, predstavljeni z globalnimi modeli, ujemajo z izbranimi območji na sceni, govorimo o modeliranju po delih (angl. *part-level modeling*). Za predstavitev nekega artikuliranega objekta zato potrebujemo več delnih modelov. Ti omogočajo sklepanje o prostoru, manipulacijo objekta in prepoznavo lastne strukture ter morebitnih podobnih struktur. Uporabljajo se tako pri opisovanju naravnih, kot tudi umetno izdelanih predmetov [14]. Primerni so za načrtovanje in manipulacijo, hkrati pa tudi za analizo in razumevanje scene. Za modeliranje izbrane scene po njenih delih moramo poskrbeti za dva ključna pogoja:

1. slika je potrebno razčleniti na enote, ki predstavljajo individualne predele (segmentacija),
2. potrebno je rekonstruirati model za vsako posamezno enoto posebej.

Obeh pogojev se ponavadi lotimo ločeno, posledično pa se lahko zgodi, da segmentacija ne more neposredno upoštevati vseh morfoloških lastnosti, zaradi česar lahko imamo težave pri pridobitvi ustreznih delnih modelov za vse segmentirane predele slike.

Težavi se lahko izognemo tako, da segmentacija poteka hkrati z rekonstrukcijo in tako sliko razdelimo samo na tiste enote, ki so hkrati tudi delni modeli. Za interpretacijo oblakov točk so volumetrični modeli naravna izbira za modeliranje posameznih predelov [2].



Slika 9.3: Tipične oblike superelipsoidov glede na vrednosti parametrov  $\epsilon_1$  in  $\epsilon_2$

### 9.5.2 Modeliranje s superkvadrčki

Superkvadrčki so volumetrični modeli, ki lahko z relativno enostavno parametrizacijo predstavljajo veliko množico standardnih geometrijskih primitivov ter veliko raznovrstnih gladkih prehodnih oblik med njimi. Primerni so za predstavitev po osi z ciklično simetričnih objektov, ki so tipično nastali z nekim naravnim erozijskim procesom, ter kvadratnih in cilindričnih predmetov, ki jih je naredil človek (slika 9.3).

Superkvadrčki so v kombinaciji z globalnimi in lokalnimi deformacijami neskončna množica primitivov, ki jih lahko oblikujemo kot kepe gline in tako opišemo strukturo scene na način, ki je podoben naši človeški perceptualni predstavi razumevanja objekta in okolice [14].

V nadaljevanju se bomo osredotočali izključno na pridobivanje superelipsoidov, saj so ti najpogosteje najprimernejša družina superkvadrčkov za modeliranje arheološke dediščine.

### 9.5.3 Pridobitev superelipsoidov

Za pridobitev superelipsoidov iz oblaka 3D točk je potrebno rešiti sistem enačb, kjer je število 3D točk veliko večje od števila posameznih enačb. Enajst parametrov superelipsoida je potrebno določiti iz nekaj sto ali celo tisoč 3D točk, ki se nahajajo na površini opazovanega objekta. Cilj je pridobitev delnega modela, ki je po evklidski razdalji najbližje vsem opazovanim točkam na površini objekta.

S parametri superelipsoida lahko modeliramo le specifične družine oblik, ta pa je zaradi narave izdelave številnih predmetov arheološke dediščine izjemno široka. Razlogov je več, npr. lončarsko vreteno za izdelavo glinastih posod zagotavlja simetrijo končnega predmeta po njegovi osi  $z$ .

Z iterativno, nelinearno metodo najmanjših kvadratov in funkcijo ujemanja (enačba 9.1), ki jo dodatno omejimo s faktorjem volumna, lahko definiramo najmanjši model superelipsoida, ki ustreza opazovani množici 3D točk na površini objekta [15, 16].

Za pridobitev enega modela povprečno potrebujemo 10 iteracij. Nedeformiran superelipsoid skupaj določa 11 parametrov, t. j. dimenzije (širina  $a_1$ , dolžina  $a_2$  in višina  $a_3$ ), oblika ( $\varepsilon_1$  in  $\varepsilon_2$ ), pozicija (translacija na podlagi  $p_x$ ,  $p_y$ ,  $p_z$ ) in orientacija (rotacija na podlagi  $\phi$ ,  $\theta$ ,  $\psi$ ).

$$F(x, y, z) = \left( \left( \frac{x}{a_1} \right)^{\frac{2}{\varepsilon_2}} + \left( \frac{y}{a_2} \right)^{\frac{2}{\varepsilon_2}} \right)^{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} + \left( \frac{z}{a_3} \right)^{\frac{2}{\varepsilon_1}} \quad (9.1)$$

### 9.5.4 Segmentacija superelipsoidov

Segmentacija razdeli sliko na smiselne enote tako, da je vsak kos informacije neke slike neposredno povezan z enoto na sliki ali pa zavržen kot šum. Za čimbolj kompakten opis nekega objekta moramo določiti minimalno število delnih modelov, ki smiselno opisujejo sceno, vendar je definicija, kaj je naravno in enostavno, v računalniškem vidu zahteven izziv. Odvisen je od opazovane scene kot tudi namena same segmentacije, v splošnem pa je zahteven tudi zaradi hkratnega vključevanja številnih virov informacij o sliki, zato se v prispevku osredotočamo izključno na uporabo 3D točk in njihovih soseščin, druge vire informacij pa zanemarimo.

Za segmentacijo in rekonstrukcijo superelipsoidov smo uporabili program Segmentor [16], ki za vhodni podatek sprejema le globinske slike. Ker imamo za vhodne podatke oblak 3D točk, sta bila v Laboratoriju za računalniški vid Fakultete za računalništvo in informatiko, Univerze v Ljubljani, razvita še program Qt-Segmentor [17] za rekonstrukcijo iz trikotniških mrež ter MeshSegmentor [3] za rekonstrukcijo splošnih in deformiranih superelipsoidov v okviru odprtokodnega programa Meshlab.

Iterativen postopek segmentacije in rekonstrukcije v vseh treh programih je enak:

1. po 3D točkah posadimo omejeno število semen superelipsoidov,
2. za vsako seme superelipsoida prilagajamo parametre tako, da se čim bolj ujema z izbrano množico 3D točk v njegovi neposredni soseščini,
3. v vsaki naslednji iteraciji razširimo množico 3D točk s točkami v bližni soseščini in ponovno iterativno prilagajamo parametre modela,
4. ko se superelipsoidi širijo, se začnejo prekrivati z drugimi superkvadričnimi modeli, zato s procesom selekcije na podlagi kriterija MDL (angl. *minimum description length*) izberemo najprimernejše superelipsoide,
5. po nekaj iteracijah ostane samo minimalno število superelipsoidov, ki smiselno predstavljajo strukturo opazovane scene.

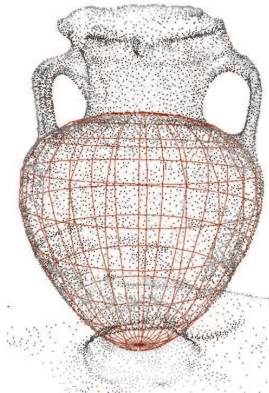
Za uspešno gradnjo modela je ključno poznavanje soseščine [17] izbranih točk. V primeru globinskih slik, kjer za vsako koordinato slike globino določimo z intenziteto, sta točki sosednji, če imata razdaljo v 2D prostoru slike enako 1. V primeru trikotniških mrež pa moramo pojem razširiti v 3D prostor, torej točki sta si sosednji, če v trikotniški mreži sestavljata isti trikotnik. Tako lahko med segmentacijo v model vključujemo najbližje sosedne točke in sproti izločamo tiste, ki ne ustrezajo.

### 9.5.5 Deformirani superelipsoidi

Globalna deformacija je funkcija  $D$ , ki eksplicitno modificira vse točke  $x$ ,  $y$ ,  $z$  na površini superelipsoida (9.2) in jo apliciramo po translaciji in rotaciji superelipsoida

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = D \left( \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} D_x(x,y,z) \\ D_y(x,y,z) \\ D_z(x,y,z) \end{bmatrix} \quad (9.2)$$

Če želimo parametre deformacije pridobiti direktno iz oblaka 3D točk, morajo biti deformacije definirane tako, da čim manj omejujejo lokalni koordinatni sistem superelipsoida. To pomeni, da morajo imeti prostor rešitev okoli spremenljivih rešitev konveksen, tako da se lahko parametri superelipsoida prosto prilagajajo obliki objekta. Hkrati moramo poznati vse parcialne odvode funkcije deformacije po njenih parametrih in parametrih superelipsoida, obstajati pa mora tudi nevtralna vrednost parametrov, pri kateri se vhodni podatki preslikajo sami vase.



Slika 9.4: Amfora tipa NCMA (North Carolina Museum of Art), modelirana v MeshSegmentorju na podlagi globalne deformacije simetričnega šiljenja s sinusoido.

Enostaven primer globalnih deformacij je deformacija šiljenja (9.3), ki oži ali širi objekt po izbrani dimenziji na podlagi koordinate  $z$  in tako modificira koordinate  $x$  in  $y$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x(z)x \\ f_y(z)y \\ z \end{bmatrix} \quad (9.3)$$

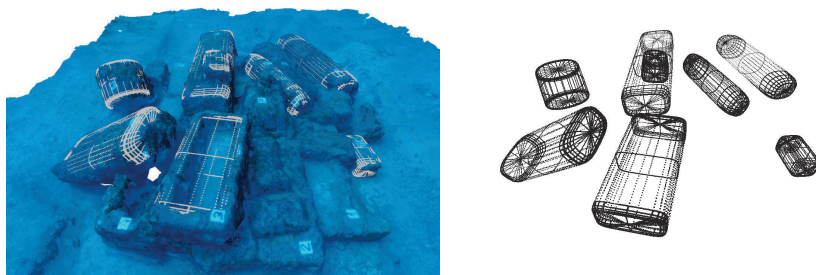
Deformacije lahko za potrebe modeliranja poljubno prilagajamo, lahko pa več vrst deformacij združimo skupaj. Primer je deformacija simetričnega šiljenja s sinusoido [3], ki je opisana z enačbo (9.4). Z njo lahko modeliramo kompleksnejše predmete, kot so npr. telesa amfor (Slika 9.4).



$$f_{xy}(z) = \left(\frac{K_{xy}}{a_3}z + 1\right) \sqrt{\cos^2\left(\frac{\pi}{2}K_f \frac{z}{a_3}\right)} \quad (9.4)$$

Deformacija simetričnega šiljenja s sinusoido skupini enajstih parametrov ne-deformiranega superelipsoida doda še parameter naklona šiljenja  $K_{xy}$  ter parameter frekvence sinusoida  $K_f$ . Razumeti pa moramo, da z večjim številom iskanih parametrov superelipsoida nekoliko žrtvujemo hitrost obdelave oblaka točk za običajno natančnejši končni delni model.

## 9.6 Rezultati



Slika 9.5: Brodolom s sarkofagi blizu Sutivana, modeliran s superelipsoidi; levo: z oblakom točk, prekritim s fotografsko teksturo; desno brez.

Iz fotogrametrično pridobljenega oblaka 3D točk (Slika 9.2) smo pridobili modele superelipsoidov za osem objektov, oštevilčenih s 3, 5, 6, 8, 9, 10, 11 in 13. Slika 9.5 na levi strani prikazuje pridobljene superelipsoide v oblaku 3D točk, ki so na sliki prekriti s fotografsko teksturo, na desni strani pa lahko vidimo vse delne modele brez vhodnih točk. Superkvadrikov na desni strani ne vidimo v celoti, saj modelirani objekti niso idealnih oblik in so tako določene točke znotraj objekta, določene pa zunaj.

Točkovne meritve posameznih objektov na oblaku točk, ki smo jih izvedli v programu Meshlab, smo primerjali z zunanji dimenzijami  $a_1$ ,  $a_2$  in  $a_3$  rekonstruiranih superelipsoidov. Za posamezne dimenzije smo izračunali povprečno napako in standardno deviacijo, ki ju opisuje enačba (9.5), kjer je parameter  $m_i$  točkovna meritev in  $s_i$  velikost superelipsoida po izbrani dimenziji. V tabeli 9.1 so zbrani rezultati posameznih meritev in skupna napaka ter standardna deviacija po dimenzijah.

$$\text{err} = \frac{\sum_{i=0}^M |m_i - s_i|}{M} \quad \text{std} = \frac{\sum_{i=0}^M |m_i - s_i| - \text{err}}{M} \quad (9.5)$$

Tabela 9.1: Primerjava točkovnih meritev na modelu z dimenzijami superelipsoida pri kvadrastih predmetih

Najdba	Meritve na modelu [cm]			Dimenzije superelipsoida [cm]		
	širina	dolžina	višina	širina	dolžina	višina
3	95,05	201,62	40,71	92,12	182,73	44,99
5	107,50	205,80	47,39	94,30	200,70	51,44
6	52,86	115,81	21,63	55,93	111,83	36,11
8	57,43	213,89	42,86	56,33	219,07	53,78
9	81,98	273,02	56,42	84,13	278,49	61,22
11	44,21	77,26	28,31	46,98	75,81	41,95
13	95,12	351,22	54,78	97,12	355,62	59,44
Povprečna napaka				3,89	6,36	8,12
Standardni odklon				4,16	5,69	4,71

## 9.7 Diskusija

Večslikovna fotogrametrija že danes prevladuje kot najbolj učinkovita in cenovno ugodna oblika 3D dokumentacije, vsaj v podvodni arheologiji. Za bolj sistematičen zajem velike količine slik na obsežnem področju, predvsem pa v večji globini, je smiselno za to nalogo uporabiti avtonomne podvodne robote [1]. Za take raziskave bi bili najbolj primerni majhni in ceneni podvodni roboti, ki bi bili po funkcionalnosti in ceni v enakem razmerju do podmornic, kot so drobni mnogokopterji do helikopterjev s človeško posadko.

Ogromna številčnost 3D točk ponuja izjemno 3D vizualizacijo, vendar žal ni primerna za arheološko analizo scene. Če želimo razumeti sceno na podlagi njene strukture in funkcij posameznih objektov, moramo 3D obliko predstaviti v bolj kompaktni obliki. Modele, ki podpirajo takšno razumevanje scene, imenujemo delni modeli. Superkvadrki so v računalniškem vidu in robotiki že nekaj časa učinkovita oblika delnih modelov za opisano obravnavo 3D prostora [16]. Tak način modeliranja je nujen, kadar želimo, da ima robot predstav o fizični strukturi svojega okolja, kar je nujno, če želi stopiti v inteligentno interakcijo s svojim okoljem.

Superelipsoidi v arheologiji ponujajo nov nivo abstrakcije za razumevanje celotne strukture neke scene, npr. koliko pomembnih predelov sestavlja sceno, kako so povezani med sabo, kakšen je njihov volumen idr. Velikost in oblika superelipsoida je določena le s petimi parametri, kar omogoča enostavno primerjavo med njimi. Ta žal ne more biti neposredna, saj proces parametrizacije istega objekta ni vedno enak, lahko pa parametre uporabljamo za indeksiranje in iskanje podobnih oblik na nekem specifičnem arheološkem objektu ali v hipotetični centralizirani podatkovni bazi obstoječih modeliranih oblik. Primer takega prepoznavanja objektov smo že pokazali za primer človeškega telesa [18].

Modeliranje s superelipsoidi lahko izboljšamo z uporabo globalnih in lokalnih deformacij ter tako omogočimo bolj izrazito modeliranje neke oblike [16]. Za arheološko analizo neke scene ni potrebna popolna avtomatizacija procesa segmenta-

cije in rekonstrukcije, vendar vseeno stremimo k polavtomatski metodologiji, ki bi arheologu omogočala označevanje ključnih predelov za modeliranje, manipulacijo delnih modelov in prikazovanje najnujnejših informacij za celovito razumevanje opazovanega objekta.

## 9.8 Zaključek

V študiji, ki smo jo predstavili v prispevku, z delnimi modeli superelipsoidov modeliramo sarkofage in druge predmete na podvodnem najdišču, ki nam pomagajo ocenjevati njihovo velikost in volumen. V našem primeru so fotografije, ki smo jih potrebovali za 3D rekonstrukcijo, zbrali podvodni fotografi. Tudi v Jadranskem morju se skriva še veliko ladijskih razbitin, ki so zaradi globine nedostopne za potapljače. V takih primerih bo potrebno uporabiti podvodne robote. Direktne točkovne meritve na oblaku točk so lahko težavne, če robovi in koti predmetov niso dobro definirani, vendar pa lahko zaradi narave rekonstrukcije superelipsoida dobimo želene povprečne dimenzije opazovanega objekta. Verjamemo, da za popolno uporabo 3D tehnologij v arheologiji potrebujemo vsaj polavtomatsko metodologijo rekonstrukcije volumetričnih in drugih delnih modelov, ki nam bodo omogočili učinkovito analizo scene in primerjavo med rekonstruiranimi objekti. Metodologija podobna opisani v tem poglavju pa se seveda lahko uporabi še na številnih drugih področjih.

## Literatura

1. M. Johnson-Roberson, M. Bryson, A. Friedman, O. Pizarro, G. Troni, P. Ozog in J. C. Henderson, "High-resolution underwater robotic vision-based mapping and three-dimensional reconstruction for archaeology," *Journal of Field Robotics*, 2016.
2. A. Jaklič, M. Erič, I. Mihajlovič, Ž. Stopinšek in F. Solina, "Volumetric models from 3D point clouds: The case study of sarcophagi cargo from a 2nd/3rd century AD Roman shipwreck near Sutivan on island Brač, Croatia," *Journal of Archaeological Science*, vol. 62, št. 10, str. 143–152, 2015.
3. Ž. Stopinšek, "Segmentacija in rekonstrukcija kulturne dediščine iz fotogrametrično pridobljenih oblakov točk," magistrsko delo, Fakulteta za računalništvo in informatiko, Univerza v Ljubljani, 2016.
4. "Pravilnik o arheoloških raziskavah." Uradni list RS, Št. 3/2013, 2013.
5. M. Erič, R. Kovačič, G. Berginc, M. Pugelj, Ž. Stopinšek in F. Solina, "The impact of the latest 3D technologies on the documentation of underwater heritage sites," v *Digital Heritage International Congress*, vol. 2, str. 281–288, 2013.
6. P. Holt, "An assessment of quality in underwater archaeological surveys using tape measurements," *International Journal of Nautical Archaeology*, vol. 32, št. 2, str. 246–251, 2003.
7. F. Solina, "Računalniški vid nekdanj in danes," v *Računalniška obdelava slik in njena uporaba v Sloveniji : zbornik strokovne konference ROSUS* (B. Potočnik, ur.), str. 3–12, Univerza v Mariboru, 2006.
8. M. L. Brutto in P. Meli, "Computer vision tools for 3D modelling in archaeology," *International Journal of Heritage in the Digital Era*, vol. 1, str. 1–6, 2012.
9. F. Remondino, "Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning," *Remote Sensing*, vol. 3, št. 6, str. 1104–1138, 2011.
10. P. Drap, D. Merad, J. Seinturier, A. Mahiddine, D. Peloso, J.-M. Boi, L. Long, B. Chemisky in J. Garrabou, "Underwater programmetry for archaeology and marine biology: 40 years of

- experience in Marseille, France,” v *Digital Heritage International Congress*, vol. 1, str. 97–104, 2013.
11. J. De Reu, P. De Smedt, D. Herremans, M. Van Meirvenne, P. Laloo in W. De Clercq, “On introducing an image-based 3D reconstruction method in archaeological excavation practice,” *Journal of Archaeological Science*, vol. 41, str. 251–262, 2014.
  12. I. Mihajlović, “Antique shipwreck with sarcophagi near Sutivan on the island of Brač,” *Skyllis*, vol. 13, št. 1, str. 67–72, 2013.
  13. M. Erič, A. Gaspari, K. Čufar, F. Solina in T. Verbič, “Zgodnjerimska ladja iz Ljubljane pri Sinji Gorici= Early Roman barge from the Ljubljana River at Sinja Gorica,” *Arheološki vestnik*, vol. 65, str. 187–254, 2014.
  14. A. P. Pentland, “Perceptual organization and the representation of natural form,” *Artificial Intelligence*, vol. 28, št. 3, str. 293–331, 1986.
  15. F. Solina in R. Bajcsy, “Recovery of parametric models from range images: The case for superquadrics with global deformations,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 12, št. 2, str. 131–147, 1990.
  16. A. Jaklič, A. Leonardis in F. Solina, *Segmentation and recovery of superquadrics*. Springer, 2010.
  17. B. Kverh, A. Jaklič, A. Leonardis in F. Solina, “Using recover-and-select paradigm on triangulated data.” Tehnično poročilo, FRI, UL, 1997.
  18. J. Krivic in F. Solina, “Part-level object recognition using superquadrics,” *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 95, št. 1, str. 105–126, 2004.

---

Žiga Stopinšek  
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za računalništvo in informatiko  
[ziga@stopinsek.eu](mailto:ziga@stopinsek.eu)

Franc Solina  
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za računalništvo in informatiko  
[franc.solina@fri.uni-lj.si](mailto:franc.solina@fri.uni-lj.si)