

# IZDELAVA 3D-MODELA KOMPLEKSNEGA KULTURNO ZGODOVINSKEGA SPOMENIKA Z UPORABO DIGITALNE FOTOGRAMETRIČNE POSTAJE

# USING AN IMAGING STATION IN MAKING A 3D MODEL OF A COMPLEX CULTURAL AND HISTORICAL HERITAGE OBJECT

*Admir Mulahusić, Nedim Tuno, Jusuf Topoljak, Džemila Balić*

UDK: 528.74  
Klasifikacija prispevka po COBISS.SI: 1.01  
Prispelo: 5. 8. 2015  
Sprejeto: 9. 2. 2016

DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2016.01.28-41  
SCIENTIFIC ARTICLE  
Received: 5. 8. 2015  
Accepted: 9. 2. 2016

## IZVLEČEK

Namen prispevka je prikazati značilnosti tehnologije laserskega skeniranja pri dokumentiranju kulturnozgodovinskih objektov kompleksne oblike. Popolno digitalno snemanje spomenika je večdimenzionalen proces. Postopek je odvisen od narave samega objekta ter primerne metode merjenja in obdelave. V članku je opisan postopek geometrijske dokumentacije spomenika Umirajoči lev, ki se začne z zajemom podatkov, sledi obdelava, sklene se s predstavitvijo končnih rezultatov. Danes se 3D-modeli pogosto uporabljajo za širjenje informacij o kulturnozgodovinskih spomenikih, na primer prek interneta v obliki formata \*.vrml. Kljub temu je oblikovanje visokoločljivih modelov, njihovo objavlanje in interakcija z njimi še vedno izziv in težka naloga. Zagotovo so takšni modeli z določeno stopnjo točnosti neprecenljivo sredstvo za restavriranje, ohranjanje in upravljanje spomenikov. Glavni cilj tega dela je bil raziskati postopek pridobivanja kolikor je mogoče podrobnega in točnega 3D-modela spomenika.

## ABSTRACT

*The primary objective of this paper is to present the characteristics of laser scanning technology in the documentation of cultural and historical heritage objects of complex shapes. Generally speaking, the digital recording of monuments is a complex process that depends highly on the nature of subject as well as on applied surveying methods and processing. The paper describes the geometric documentation of the monument 'Wounded Lion', which begins with the collection of data, followed with processing, and concludes with the presentation of the final results. At present, 3D models are frequently used for the dissemination of information about cultural and historical heritage objects, e.g., via web pages in the form of VRML models. However, the creation, publication, and interaction of high-resolution 3D textured models remain rather challenging and difficult tasks. Such models, with a certain level of accuracy, are clearly invaluable tools for applications involving the restoration, maintenance, and monitoring of monuments. The goal of this paper is to explore the process of creating detailed and accurate (to the greatest degree possible) 3D models.*

## KLJUČNE BESEDE

kulturnozgodovinska dediščina, dokumentiranje kulturnozgodovinske dediščine, lasersko skeniranje

## KEY WORDS

cultural and historical heritage, documenting the cultural and historical heritage, laser scanning

## 1 UVOD

Svet izjublja svojo arhitekturno in arheološko kulturno dediščino hitreje, kot jo strokovnjakom različnih strok uspe dokumentirati. Glavni razlogi za izgube so katastrofe, ki jih povzročijo ljudje sami, najpogosteje so to nenadzorovani dogodki in vojne. Še en razlog za izginjanje kulturne dediščine so naravne katastrofe ter zanemarjanje in slabo ohranjanje spomenikov (Amans et al., 2013). Velik pomen za zgodovinske objekte ima tudi okolje, v katerem stojijo zgodovinski spomeniki (Mulahusić et al., 2013). »Zgodovinski objekti pričajo o preteklosti, informirajo o sedanosti in dajejo vidni, trajni prikaz o delovanju ljudi v različnih rodovih« (Rüther, 2009). Izdelana dokumentacija o objektih kulturne dediščine je vir informacij za vse, ki ne morejo osebno obiskati objekta, a jih iz različnih razlogov zanimajo tudi največje podrobnosti o njem. Objekt kulturne dediščine je označen z mnogimi detajli, dokumentacijo pa v glavnem sestavljajo: dokumenti o njegovi geometriji, materialih, dokumenti, ki vsebujejo zgodovinske poglede na spomenik, in podobno. Eden od vidikov dokumentacije je pridobivanje podatkov o geometriji objekta, s tem pa sta povezani dve najbolj priljubljeni metodi v arhitekturni fotogrametriji. Metodi, ki sta lahko tudi medsebojno povezani, sta (Kalinka in Rutkowska, 2007):

- bližnjleslikovna fotogrametrija in
- lasersko skeniranje.

Podlaga za kakršen koli konservatorski projekt so različne vrste dokumentov o spomenikih. Njihova vloga v ohranjanju dediščine je že zdavnaj prepoznana, posebno v identifikaciji, zaščiti, interpretaciji in fizičnem ohranjanju spomenikov. Fotogrametrija je tradicionalno najbolj prikladna metoda za zbiranje dokumentacije o različnih kompleksnih objektih, ne glede na to, ali so to arhitektonske konstrukcije, skulpture ali splošni spomeniki. Običajno je rezultat takšnih postopkov ortofoto. V zadnjih letih pa se, v skladu s spektakularnimi tehnološkimi doseganji ter uporabo terestričnega laserskega skeniranja (TLS) in digitalne fotogrametrije, stalno izboljšuje delovni tok oblikovanja takšnih izdelkov, in s tem seveda tudi sami izdelki (Stathopoulou et al., 2011).

Ena od zelo priznanih metod za dokumentiranje kulturne dediščine je izdelava geometrijske dokumentacije s tehnologijo laserskega skeniranja. S takšno dokumentacijo se ohranja obstoječe stanje spomenika, ki se je preoblikoval v času, je tudi podlaga za preučevanje preteklosti in vsa prihodnja načrtovanja v zvezi s spomenikom. Tehnologija vključuje niz merenj, na podlagi katerih se opredelijo oblika, velikost in položaj objekta v 3D-prostoru (Balić, 2014).

## 2 VLOGA GEOMETRIJSKE DOKUMENTACIJE V OHRANJANJU KULTURNE DEDIŠČINE

Edini dostopen način, ki daje smisel, jamči za razumevanje, opredelitev in prepoznavanje kulturne dediščine, je njeno dokumentiranje. Pomen dokumentacije je mogoče prepoznati v različnih aktivnostih, ki vključujejo: zaščito, restavracijo, konzervacijo, identifikacijo, spremljanje, interpretacijo, ohranjanje ter upravljanje zgodovinskih zgradb in lokacij. Zaščita in ohranjanje kulturnih krajev, raziskovanje in uporaba dobljenih rezultatov so vse večkrat podprti z digitalnimi mediji in odvisni od njih. Z gotovostjo lahko zatrdimo, da so dokumentacijska orodja v zadnjih dvajsetih letih zelo napredovala (Haddad, 2011).

Na področju kulturne dediščine lahko velikost objektov sega od zelo majhnih do gigantskih struktur, in tako zajema spomenike, skulpture, artefakte, mumije, grobove, grobnice, amfiteatre in arheološka najdišča. Danes, v moderni dobi, obstaja kar nekaj orodij za digitalizacijo na področju ohranjanja kulturne

dediščine, to so: satelitske in letalske metode zajema terena, bližnjelikovna digitalna fotogrametrija, terestrično lasersko skeniranje, ročni skenerji in posebni medicinski skenerji. Točnost podatkov lahko sega od milimetra do nekaj centimetrov. Geometrijsko dokumentacijo spomenika lahko opredelimo kot »akcijo zbiranja, obdelave in prezentacije nujnih podatkov za definiranje položaja in obstoječe oblike, velikosti in vrste spomenika v 3D-prostoru v določenem časovnem trenutku« (Photogrammetry applied to ..., 1972). Lahko rečemo tudi, da »geometrijska dokumentacija beleži trenutno stanje spomenika, ki se je oblikovalo v toku časa. To je nujna podlaga za raziskovanje njegove preteklosti in ohranjanje teh struktur v prihodnosti« (Bariami et al., 2012).

Geometrijska dokumentacija bi morala veljati za sestavni del obsežnejšega svežnja tako imenovane splošne dokumentacije kulturne dediščine, sestavljene iz zgodovinske, arhitektonske, arheološke in bibliografske dokumentacije. Geometrijska dokumentacija spomenika sestoji iz serije nujnih meritev, iz katerih je mogoče dobiti vizualne izdelke, kot so: vektorski načrti, rastrske fotografije, 3D-modeli ... Takšni izdelki imajo merske značilnosti, še posebej tisti, ki so izdelani v ortogonalni projekciji (Georgopoulos et al., 2007). Vse pridobljene podatke in informacije o spomenikih je mogoče razdeliti v dve kategoriji in tako oblikovati bazo podatkov dokumentacije. To so (Kalinka in Rutkowska, 2007):

- analitične informacije, ki vključujejo besedilne informacije o zgodovini spomenika,
- geometrijske informacije, ki lahko vključujejo: vektorske načrte, model oblaka točk, ortofoto fasad, 3D-mrežni model, virtualni videomodel, pridobljen iz oblaka točk, interpretacija intenzitete barv s fotografij.

V splošnem lahko govorimo o treh različnih tehnikah geometrijske dokumentacije. To so (Haddad, 2011):

- nefotografska tehnika (grafična dokumentacija, ročno merjenje in tahimetrija);
- fotografska tehnika (fotografije, rektificirane fotografije, računalniško rektificirane fotografije, fotogrametrija in termografija);
- lasersko skeniranje.

### 3 IZZIVI PRI DOKUMENTACIJI KULTURNE DEDIŠČINE S TERESTRIČNIM LASERSKIM SKENERJEM

V večini aplikacij je določenih osem zahtev za uspešno 3D-rekonstrukcijo objekta: visoka geometrijska točnost, snemanje vseh detajlov, fotorealizem, visoka stopnja avtomatizacije, nizke cene, prenosljivost opreme, fleksibilnost aplikacije in uporabnost velikosti modela (Sabry et al., 2004). Glavni cilj vsake tehnike je uspešno raziskovanje posameznega tipa objekta ali spomenika, izpolnjevanje navedenih zahtev in potreba posameznega projekta digitalnega snemanja (na primer popolno snemanje za arhiv, digitalizacija za predstavitev, digitalizacija za komercialno uporabo in podobno). Obstajajo tehnike, ki zagotavljajo zadovoljive rezultate za zelo majhne objekte, in druge metode za male, srednje ali velike objekte, na splošno spomenike. Obstajajo različne tehnike za kovinske, keramične ali steklene objekte. Lahko rečemo, da je snemanje kulturne dediščine večdimenzionalen proces. Dejavniki, ki vplivajo na izbiro sistema za 3D-digitalizacijo kulturne dediščine, so:

- strošek,
- material digitaliziranega objekta,
- velikost digitaliziranega objekta,

- prenosljivost opreme,
- točnost sistema,
- snemanje tekstur,
- produktivnost tehnike,
- usklajenost dobljenih podatkov s standardi.

Postopek dokumentiranja objekta kulturne dediščine ne zajema samo 3D-digitalizacije objekta oziroma spomenika, temveč se bomo ukvarjali tudi z vprašanji upravljanja digitalne vsebine, predstavitve in razmnoževanja dokumentacije (Pavlidis et al., 2007). 3D-digitalno modeliranje v računalniški grafiki je proces ustvarjanja matematične predstavitve površine objekta s posebno programsko opremo. Model je mogoče predstaviti na različne načine: kot 2D-posnetek, animacija, kratki video z virtualnim sprehodom itd. V postopku modeliranja je treba filtrirati oblak točk. Vsi podatki so obremenjeni s posamezno vrsto pogreškov in vedno obstaja posamezna vrsta šuma, ki je pri modeliranju nezaželena. Takšne slabo definirane točke je treba torej odstraniti, zgladiti je treba površine in s posebnimi metodami izvesti spremembo položaja točk. Količino podatkov je treba zmanjšati, da se skrajša čas obdelave. Nekateri objekti so lahko zelo zapleteni in lahko se zgodi, da jih je težko v celoti zajeti s točkami. Nekateri programi (na primer *Geomagic 3D*) ponujajo orodja za samodejno ali ročno zapolnjevanje praznin. Preden začnemo oblikovati ploskve, je priporočljivo v podatkih odstraniti vse šume.

Za pridobivanje površin iz točk uporabimo orodje za triangulacijo. Mogoče je uporabiti samo točke, v nekaterih primerih (če je treba opredeliti krivulje) pa se točke uporabijo kot vrhovi linij. Takšne možnosti nima vsak program, večina dovoljuje oblikovanje triangulacijske nepravilne mreže (TIN) ali skeleta (opredeljenega z linijami, loki itd.). Zelo pomemben korak na tej stopnji je uporaba orodja za korekcijo mreže TIN. Ko je narejen model površine, je mogoče izdelati model svetlobe in refleksije. To je bolj vizualni korak celotnega procesa. V tej fazi je mogoče izbrati vrsto izvora svetlobe. Operater lahko izbere položaj svetlobe, material modela in opredeli, kako ta odseva svetlobo (3ds MAX). Na model je mogoče dodati teksturo. Lahko je izbrana le ena barva ali pa privzamemo barvne vrednosti s fotografij. Če se posnetki nanašajo na model, je precej enostavno nanj dodati dejansko teksturo. Postopek se imenuje teksturiranje in daje modelu bolj realističen videz (realistično fototeksturiranje).

Zadnji korak je oblikovanje datoteke in tiskalniškega izpisa za prikaz končnega rezultata. To je lahko 2D-posnetek ali 3D-datoteka. Obstajajo različne vrste 3D-datotek, ki jih je mogoče izvoziti in pregledovati. To so: 3D PDF, OBJ, PLY, STL in pogojno VRML. Podrobno opišimo 3D PDF, ki ponuja različne možnosti uporabe, saj lahko model vrtimo, mogoče je menjati izvor svetlobe in materiale, samo datoteko pa je mogoče pregledati v Adobe Readerju. Druga možnost so videodatoteke. Poenostavljen delovni potek s predstavljenimi operacijami v modeliranju in vizualiziranju od 3D-oblaka točk do koristnih informacij je prikazan v preglednici 1 (Aulejtner, 2011).

Če upoštevamo aktivne in pasivne senzorje, lahko razlikujemo med štirimi alternativnimi metodami za modeliranje objektov (Remondino et al., 2006):

- IBR (ang. *image based rendering*) – prikaz, ki temelji na fotografijah;
- IBM (ang. *image based modeling*) – modeliranje, zasnovano na fotografijah;
- RBM (ang. *range based modeling*) – modeliranje, zasnovano na razdaljah;
- kombinacija metod, zasnovanih na fotografijah in razdaljah.

Preglednica 1: Poenostavljen delovni potek modeliranja: od oblaka točk do končnega modela (Aulejtner, 2011).

Običajen 3D-oblak točk	
Filtriranje oblaka točk	<ul style="list-style-type: none"> <li>— odpravljanje šuma, točk</li> <li>— algoritmi glajenja</li> <li>— posamezni ročni posegi, če so potrebni</li> <li>— zmanjševanje števila točk</li> </ul>
Triangulacija	<ul style="list-style-type: none"> <li>— oblikovanje mreže TIN, 3D-površine</li> </ul>
Filtriranje mreže TIN	<ul style="list-style-type: none"> <li>— zapolnjevanje praznin (če so prisotne)</li> <li>— algoritmi glajenja</li> <li>— odpravljanje ostrih robov</li> <li>— popravki površine (topologija, preseki)</li> <li>— zmanjševanje števila trikotnikov</li> </ul>
Ustvarjanje tekstur/mozaičenje	<ul style="list-style-type: none"> <li>— dejanska tekstura iz fotografij ali umetna tekstura</li> </ul>
Nekatere dodatne vizualne opcije	<ul style="list-style-type: none"> <li>— odvisno od programa</li> </ul>
Izvoz rezultatov	<ul style="list-style-type: none"> <li>— 2D-posnetki</li> <li>— 3D-datoteke, npr.: 3D PDF, VRML, videodatoteke idr.</li> </ul>

#### 4 OSNOVNE INFORMACIJE O SPOMENIKU UMIRAJOČI LEV

Pokopališče Lev (v originalu, bosan.: *Lav*) s površino dveh hektarjev stoji na območju Koševa v neposredni bližini kliničnega centra v Sarajevu (slika 1). Po vzpostavitvi avstro-ogrske oblasti so na njem pokopavali preminule pripadnike avstro-ogrske vojske, med prvo svetovno vojno pa so bili tu pokopani avstro-ogrski vojaki. Prvo ime pokopališča je bilo Vojaško grobišče (nem. *Militar Friedhof*), ime Lev pa je dobilo po veliki figuri leva, delu kiparja Josipa Urbanie. Uporabljalo se je tudi kot hebrejsko aškenaško pokopališče, potem so ga leta 1958 zaprli. Po drugi svetovni vojni se je uradno imenovalo Partizansko grobišče, aprila 1992 pa so mu spet vrnili ime Lev.



Slika 1: Mestno pokopališče z označeno lokacijo skulpture Umirajoči lev in videz spomenika po restavratorskih delih leta 2009 (Rekonstrukcija i restauracija ..., 2014).

V najtežjih trenutkih zgodovine Sarajeva, od aprila 1992 do decembra 1995, ko na pokopališču Bare zaradi neposredne izpostavljenosti artilerijskemu ognju ni bilo mogoče opravljati pogrebov, so obudili pokopališče Lev. V tem obdobju je bilo pokopanih vsega skupaj 3.880 ljudi. Za pokopavanje muslimanov, pravoslavcev, katolikov in ateistov so bile namenjene posebne parcele (Groblje Lav, 2014).

Kot je bilo že navedeno, je spomenik Umirajoči lev zasnoval akademski kipar Josip Urbanija, izdelali pa so ga med letoma 1915 in 1918. Umetnik je uskladal naravno konfiguracijo terena in oblike samega spomenika, pri čemer je ustvaril markantno secesijsko-baročno spominsko obeležje, ki ga danes sestavljajo plato, stopnišče, podstavek in figura ležečega leva.

Urbanija je upodobil svojo poslanico, alegorični pomen Umirajočega leva kot obeležje vojaškega pokopališča iz prve svetovne vojne. Spomenik je oblikovan v duhu pesniškega realizma, zato združuje neo-baročni in secesijski slogovni izraz. Dostopno stopnišče je betonsko, s štirimi vrstami polkrožnih stopnic, izdelanih iz kamnitih kvadrov različnih velikosti, pohodne površine so iz tesanega kamna s fugami. Ob podstavku se širi ploščad, na kateri je bil prej travnik (Hozo, 2007). Skulptura Umirajoči lev je bila poškodovana še pred vojno v letih 1992–1995. Poškodbe zaradi atmosferskih vplivov in posedanja terena so se kazale v obliki plitvih in globokih razpok, površinski sloj skulpture se je krusil in osipal (Rekonstrukcija i restauracija ..., 2014). Večje poškodbe, ki jih je figura leva utrpela v vojni med letoma 1992 in 1995, so bile posledica različnih izstrelkov, pozneje pa tudi škodljivega delovanja vremenskih vplivov (slika 2). Zaradi vsega tega je bilo poškodovanih več kot 70 % kipa; njegova rekonstrukcija je zahtevala temeljito pripravo in premišljeno izvedbo (Hozo, 2007).



Slika 2: Skulptura Umirajoči lev v obdobju 1992–1995 (Hozo, 2007).

Zaradi vojne so se poškodbe na spomeniku večkratno povečale. Dva neposredna zadetka granate sta precej uničila zadnji del skulpture. S konservatorsko-restavratorskimi deli so strukturo stabilizirali, injicirali so razpočene in poškodovane dele, jih ojačali z armaturo, manjkajoče dele podstavka in same figure so dozidali z opeko ter nazadnje grobo in fino zgladili celoten spomenik z malto. Sanacija Umirajočega leva je prvi v nizu kulturno-izobraževalnih projektov, ki so bili izvedeni v okviru mednarodnega sodelovanja Evropski most – Avignon, Ljubljana, Sarajevo (Rekonstrukcija i restauracija ..., 2014). Po prvi fazi v letu 2003 je bilo treba samo še nanesti zunanjo dodatno zaščito. V letu 2009 je bil spomenik saniran, dela so sklenili z nanosom zaključnega sloja z impregnacijo, ki zagotavlja vodoodbojnost površine. Kljub

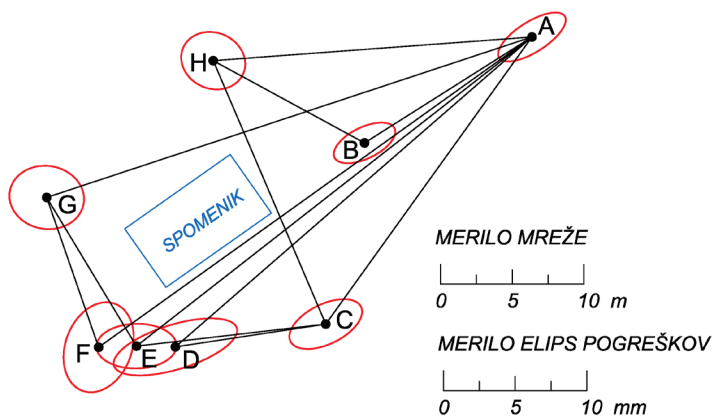
temu so se pokazale manjše pomanjkljivosti in pojavile so se nove poškodbe. Te so večinoma posledica stalne izpostavljenosti spomenika zunanjim vplivom, saj vsak vdor vode in mraza nekoliko uniči strukturo zaključnega sloja (Hozo, 2007; Rekonstrukcija i restauracija ..., 2014).

## 5 TERENSKA DELA ZA POTREBE IZDELAVE 3D-MODELA

### 5.1 Vzpostavitev geodetske mreže

Za izpolnitev projektnih zahtev je bilo treba vzpostaviti mrežo fiksiranih točk okoli spomenika. To je kontrolna mreža točk, s katerih je bilo izvedeno skeniranje objekta, in od nje je odvisna tudi točnost končnega rezultata. Pred začetkom meritev je bilo treba obiskati lokacijo spomenika in pregledati teren. Za projekt je bila načrtovana kontrolna mreža osmih točk, razporejenih okoli objekta. Izbrane so bile najbolj ugodne lokacije za kontrolne točke, ki ustrezajo nekaterim zahtevam, kot je medsebojna vizualna povezava med točkami in dovolj stojišč za skeniranje. Po tem je bila izvedena stabilizacija mreže.

Vse meritve v mreži so bile izvedene obojestransko z elektronskim tahimetrom Trimble M3 v dveh ponovitvah (girusih). Skupaj je bilo izmerjenih 38 horizontalnih smeri, 38 zenitnih kotov in 19 dolžin, potem so bile meritve obdelane (računanje ustreznih redukcij in korekcij). Da bi dobili čim bolj kakovostne rezultate, je bila izvedena izravnava mreže s posrednim modelom in definicijo optimalnega datuma. S tem je medsebojni položaj točk določen samo na podlagi meritev oziroma se zagotovi visoka točnost iskanih količin, tj. položajnih koordinat in višin točk v mreži. Za vsako točko so bila izračunana ustrezna standardna položajna in višinska odstopanja ( $s_{yx}$  in  $s_{y\mu}$ ). Povprečno standardno položajno odstopanje točk te mreže znaša 3,3 milimetra, kar kaže na zelo dobro točnost koordinat mreže. To potrjujejo tudi elipse pogreškov, ki so prikazane na sliki 3. Standardna odstopanja višin točk so intervali od 1 milimetra do 2 milimetrov.



Slika 3: Oblika mreže in elips pogreškov iz položajne izravnave brez prisile.

### 5.2 Izdelava oblaka točk

Skeniranje celotnega spomenika je bilo izvedeno z instrumentom Topcon IS3 (Reference Manual Imaging ..., 2007) in je trajalo sedem dni. Na spomeniku so označene detaljne točke, ki so se pozneje uporabljale

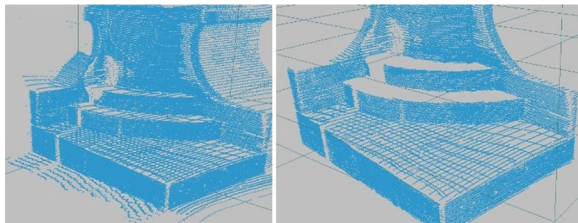
za oceno točnosti izdelanega modela. Kot detajlne točke smo uporabili ročno izdelane tarče (dimenzij 2 cm x 2 cm). Tarče (slika 4) so postavljene na različna mesta na podstavku in so za prikaz na modelu izmerjene s polarno metodo izmere detajla – tahimetrijo. Po postopku skeniranja se je začel najbolj zapleten in dolgotrajen korak projekta – izdelava dokumentacije o spomeniku, to je obdelava podatkov merjenja in skeniranja, njihovo medsebojno povezovanje ter analiza dobljenih rezultatov.



Slika 4: Tarča, pritrjena na podstavek spomenika.

## 6 OBDELAVA PODATKOV LASERSKEGA SKENIRANJA

Vsi skenogrami so posneti s stojišč s predhodno določenimi koordinatami v lokalnem koordinatnem sistemu, zato so vsi skenirani podatki, ki se uvozijo v program, samodejno poravnani po koordinatah v istem referenčnem koordinatnem sistemu.



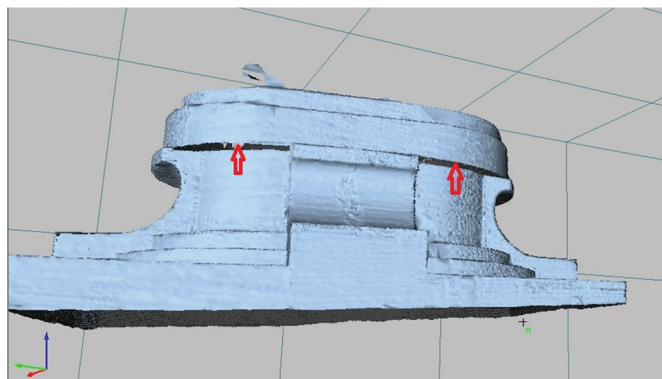
Slika 5: Oblak točk prvega dela podstavka pred postopkom filtriranja (levo) in po njem (desno).

Spomenik Umirajoči lev je sestavljen iz dveh delov: figure leva in podstavka. Površina in oblika objekta sta zelo zapleteni, imata veliko neravnin in delov, ki se medsebojno zakrivajo, zato je treba za obdelavo podatkov zagotoviti dovolj gost oblak točk in tudi zmogljiv program, ki bi dal zelo precizne in realistične rezultate. Ker je celoten podstavek zelo težko obdelati v celoti, je bil proces razdeljen na dvanajst delov. Podatki se po uvozu v program najprej filtrirajo, kar pomeni, da se izločijo moteči podatki, torej točke, ki so nastale z odbojem laserskih žarkov v neposredni bližini ali od bližnjih objektov (dreves, znakov, nagrobnikov) in se kažejo v obliki šuma. Na sliki 5 je prikazan primer filtriranja podatkov.

Celoten podstavek je obdelan po delih, zato je bilo treba poiskati način, kako spojiti posamezne dele v celoto. Ker s filtriranjem ni mogoče odpraviti vseh šumov (predvsem tistih v neposredni bližini objekta), se pokažejo po oblikovanju mreže TIN. Mreža TIN se korigira z brisanjem trikotnikov ali njihovih vrhov.

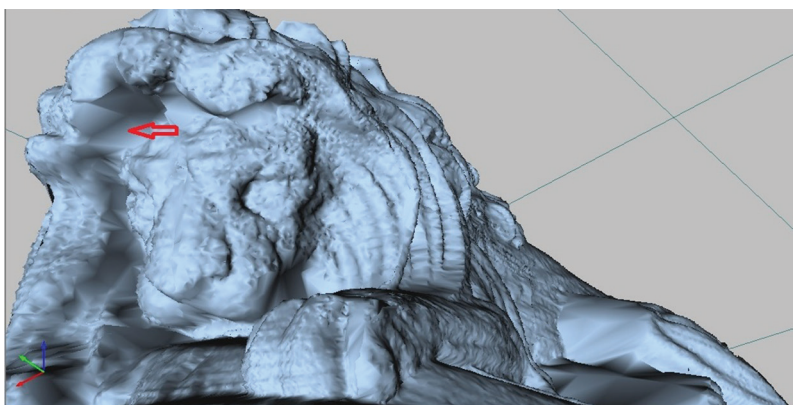
Tako se najprej izvede filtriranje, sledi izrisovanje polilinj, oblikovanje mreže TIN, vključevanje posameznih slojev in brisanje odvečnih trikotnikov na stičnih mejah dveh ali več ploskev. Končni rezultat mreže TIN za celoten podstavek je viden na sliki 6.





Slika 6: Praznine v mreži TIN, ki so nastale zaradi pomanjkanja podatkov.

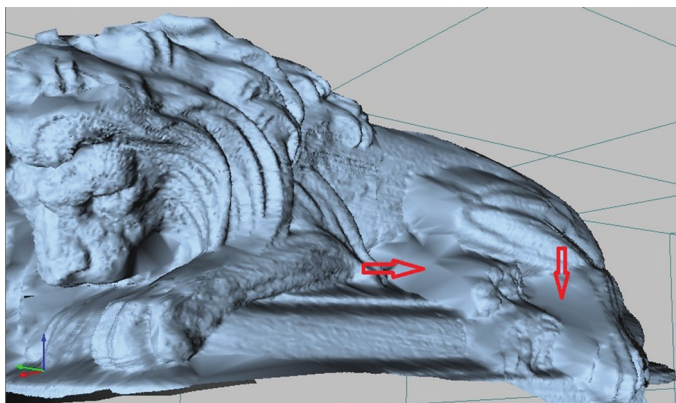
Izdelavi in obdelavi mreže TIN sledi postopek teksturiranja oziroma »pripenjanja« tekstur na mrežo. S teksturiranjem se dobi fotorealističen model objekta. Ta faza obdelave je zelo dolgotrajna, saj je treba urediti več kombinacij fotografij, dokler se ne uskladijo najboljše. Na mreži TIN se enostavno označi, na kateri del se nanaša tekstura, in izberejo se fotografije, ki bodo uporabljene v postopku teksturiranja. Teksturirani model je obremenjen s pomanjkljivostmi, kot so razlike v tonu, raztegnjena območja, praznine in podobno.



Slika 7: Mreža TIN sprednjega dela figure leva z oznako dela (puščica), kjer oblak točk ni dovolj gost.

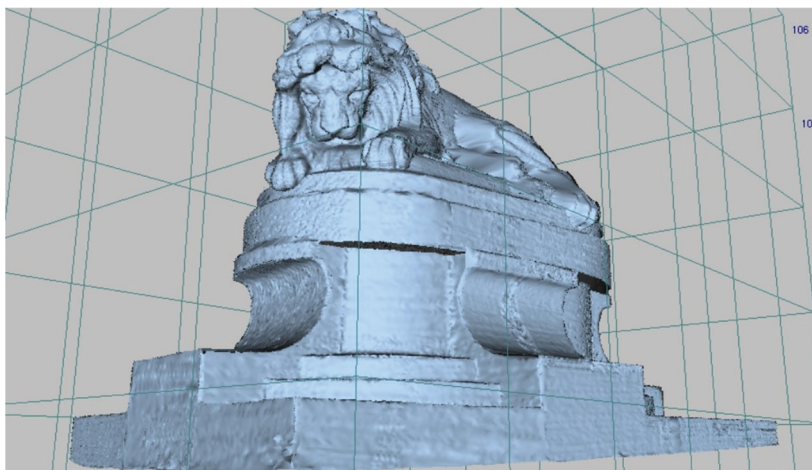
Koraki za izdelavo mreže TIN figure leva (slika 7) so isti kot pri podstavku. Figura leva je bila skenirana z ločljivostjo 9 milimetrov, kar je dalo gost oblak točk. Ker je njena površina neravna in kompleksna, je postopek obdelave dolgotrajen in razdeljen na več delov. Izdelanih je 17 mrež TIN.

Posamezni deli figure (na primer območja okrog prednjih šap) niso v celoti vidni z enega stojišča (stojišče C), zato so posneti še z drugega stojišča (stojišče D). Tako je treba kombinirati dva delna oblaka točk, posneta z dveh različnih stojišč, pri čemer se pokaže kot problematično oblikovanje mreže TIN za isti del. Oblak točk je namreč treba postaviti v pogled, ki ustreza pogledu s stojišča C. Dobljena površina je gladka za točke, posnete s stojišča C, medtem ko se pri vseh točkah, posnetih s stojišča D, pojavljajo špice. Včasih je napak v TIN malo in jih je mogoče odstraniti, kot rezultat pa dobimo lepo zglajeno površino, kot je prikazano na sliki 8.



Slika 8: Odpravljene napake pri kombinaciji dveh oblakov točk, ki sta posneta z različnih stojišč, in pridobljena zglajena površina.

Pri nekaterih kombinacijah oblaka točk, pridobljenih z različnih stojišč, mreža TIN vsebuje toliko napak, da je njihovo odpravljanje dolgotrajno in se ne splača, tako se na koncu izbere tisti oblak točk, iz katerega pridobimo najboljšo mrežo TIN. Ko so odpravljene vsi odvečni trikotniki in popravljene napake, je lev obdelan v obliki mreže TIN in po pravilu se začne postopek teksturiranja, ki je tako kot pri podstavku obremenjeno s pomanjkljivostmi. Za celoten spomenik je bilo posnetih 899.931 točk. Po obdelavi je bilo dobljenih 29 površin TIN, ki predstavljajo 3D-model spomenika Umirajoči lev. Ta površina obsega 407.118 trikotnikov in 207.084 vozlišč. Izkušen operater, ki je dobro poznal tudi spomenik, je za izdelavo modela potreboval deset dni.



Slika 9: Prikaz zahodne strani 3D-modela.

Potem ko je 3D-model figure leva (slika 9) uvožen v 3ds Max, je povečan do ustrezne velikosti, da ustreza dimenzijam 3D-modela podstavka iz AutoCAD-a. 3ds Max omogoča teksturiranje z različnimi materiali. Tako je končni 3D-model spomenika »prevlečen« z betonsko teksturo, za boljši učinek so dodane sence. Končni rezultat vizualizacije je prikazan na sliki 10.



Slika 10: Končni 3D-model spomenika Umirajoči lev.

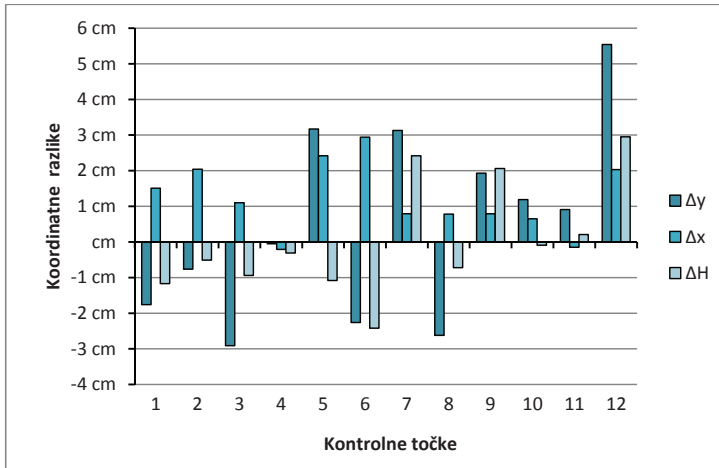
## 7 OCENA KAKOVOSTI 3D-MODELA SPOMENIKA

Pojem točnost opisuje vrednost, s katero merjenja odstopajo od njihove »prave« vrednosti. Ocenjevanje prostorske točnosti 3D-modela spomenika Umirajoči lev je izvedeno s primerjavo koordinat dvanajstih izmerjenih kontrolnih točk na modelu (v programu ImageMaster) in ustreznih referenčnih (»pravih«) koordinat, izmerjenih s tahimetrom Topcon IS3. Kot dodatni kazalec točnosti modela so izmerjene tudi dolžine na terenu, to je dolžine kontrolnih stranic podstavka spomenika in iste dolžine na 3D-modelu. Izmera je bila izvedena s tahimetrom Topcon IS3, ki zagotavlja natančnost kotnih merjenj 3“ (po ISO 17123-3), natančnost merjenja kratkih razdalj brez uporabe reflektorja pa je 5 milimetrov (z uporabo reflektorja jo je mogoče izboljšati na 2 milimetra, po ISO 17123-4). Instrument samodejno določa koordinate opazovane detajlne točke na podlagi podatkov, izmerjenih s polarno metodo, saj so koordinate stojiščne in orientacijskih točk predhodno definirane v lokalnem koordinatnem sistemu. Tako so koordinate vseh detajlnih točk opredeljene v referenčnem lokalnem sistemu. Programska rešitev *ImageMaster* omogoča določanje koordinat katere koli točke v modelu TIN. Ko je TIN oblečen s teksturo, je mogoče brez težav prepoznati tarčo s povečevanjem posameznega dela, na katerem domnevno stoji detajlna točka.

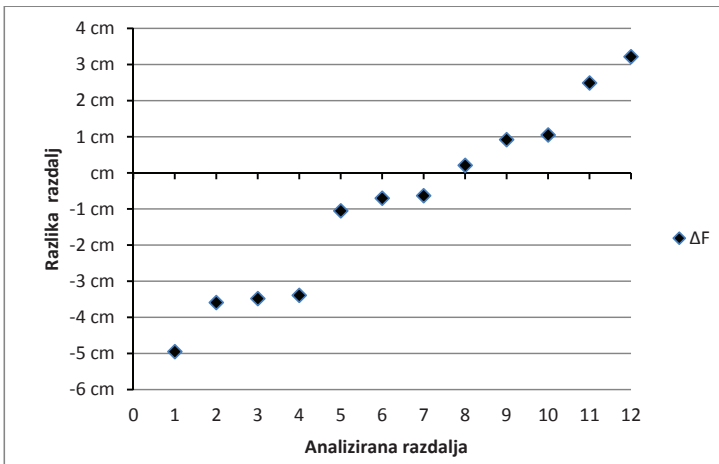
Preglednica 2: Pregled statistike odstopanj na kontrolnih točkah.

Statistične mere	Razlike koordinat					Razlike razdalj
	$\Delta_y$	$\Delta_x$	$\Delta_{yx}$	$\Delta_H$	$\Delta_{yxH}$	$\Delta_F$
Minimum [cm]	-2,91	-0,21	0,07	-2,42	0,32	-4,95
Sredina [cm]	0,46	1,22	3,09	0,03	3,39	-0,83
Maksimum [cm]	5,54	2,94	7,83	2,95	8,37	3,22
Razpon [cm]	8,45	3,15	7,76	5,37	8,05	8,17
St. odstopanje [cm]	2,71	1,61	3,83	1,62	4,16	2,72

Kakovost 3D-modela spomenika, ocenjena s primerjavo koordinat točk in razdalj, dobljenih s programom ImageMaster, ter pravih vrednosti, ponazarjajo statistične mere, prikazane v preglednici 2. Lahko ugotovimo, da z oceno točnosti na podlagi koordinat in oceno točnosti na podlagi razdalj dobimo zelo podobne rezultate. Vrednosti sredine za koordinatne komponente po osi  $y$ ,  $x$  in  $H$  kot tudi za razdalje, ki so zelo blizu ničli, kažejo, da ni razloga za sum, da so v razlikah  $\Delta_y$ ,  $\Delta_x$ ,  $\Delta_H$  in  $\Delta_F$  prisotni sistematični pogoški. Ker so pogoški medsebojno neodvisni in imajo normalno porazdelitev, je skupna položajna točnost modela 7,1 centimetra, s stopnjo zaupanja 95 %. Za ponazoritev dosežene točnosti je bil izdelan tudi grafični prikaz (sliki 11 in 12), s katerim dobimo vpogled v kakovost izdelanega modela spomenika.



Slika 11: Grafična interpretacija koordinatnih razlik.



Slika 12: Porazdelitev razlik razdalj.

Kot rešitev za prihodnja dela na velikih objektih proste, asimetrične in nepravilne oblike predlagamo zelo pazljivo izbiro položaja stojiščnih točk kontrolne mreže in tudi snemanje robov objekta z večjo ločljivostjo. Zelo pomembno je izbrati stojišča, s katerih se da snemati objekt v celoti. Če posameznih

delov objekta ni mogoče posneti s postavljenih stojišč (tako kot pri našem delu), predlagamo, da se okrog objekta postavi gradbeni oder, če to seveda dopušča finančni okvir. Tako lahko zagotovimo snemanje zakritih delov, ki jih ni mogoče posneti s stojišč na zemeljski površini.

## 8 SKLEP

Terestrično lasersko skeniranje je z uporabo ustreznega instrumentarija in metodologije za obdelavo podatkov učinkovita tehnika za dokumentiranje različnih spomenikov, torej tudi kulturnozgodovinskega spomenika Umirajoči lev. V preteklosti so spomenik v glavnem poškodovani ljudje, sedaj pa ga počasi uničujejo tudi naravne sile. Največ poškodb nastaja zaradi stalne izpostavljenosti zunanjim vplivom, saj vsak vdor vode in mraza nekoliko razje strukturo zunanjega sloja. Zaradi tega je treba izdelati dokument, v katerem so točno opisane vse geometrijske značilnosti spomenika. To je mogoče narediti tudi s 3D-modelom objekta kot digitalno kopijo, ki jo pridobimo iz oblaka točk. Za izdelavo fotorealističnega 3D-modela za zahtevano stopnjo točnosti so potrebne napredne tehnologije za zajem in obdelavo podatkov. V našem primeru smo za zajem podatkov uporabili tahimeter Topcon IS3. Instrument ima nekaj pomanjkljivosti za tako obsežne projekte, kot je opisani, lahko pa je koristen v projektih, v katerih se ne zahteva velika gostota podatkov (na primer snemanje nasipov, fasad objektov in podobno), saj zagotavlja dobro točnost. V našem primeru instrumentarij delno ustreza zahtevam po točnosti končnega modela. Odstopanja so posledica več razlogov, saj na končni rezultat vplivajo različni dejavniki.

Pomanjkljivost instrumenta, kot je slikovna postaja Topcon IS 3, je zelo dolgotrajen postopek pridobivanja podatkov. Pri velikih projektih se to ne bi splačalo. Obravnavani spomenik zahteva veliko večjo ločljivost skeniranja za pridobivanje dovolj gostega oblaka točk. Večja ločljivost pomeni tudi več porabljenega časa za snemanje. Na kakovost zajetega oblaka točk in torej kakovost končnega rezultata vpliva razpored stojišč, za določitev katerih so potrebne predhodne izkušnje z delom na takšnih spomenikih z zapleteno strukturo. Pomembno je upoštevati tudi vpliv vremenskih razmer in položaj instrumenta glede na sončne žarke. Znano je, da skeniranje površine pod kotom  $45^\circ$  daje dobre rezultate. Prav zaradi navedenih dejavnikov so se pojavljale težave pri oblikovanju mreže TIN.

Z metodo rekonstrukcije je treba iz končnega nabora točk dobiti točno geometrijo in topologijo objekta. Obdelava podatkov je bila izvedena v programu ImageMaster, ki pa ni najboljša rešitev za izdelavo 3D-modela kompleksnega spomenika, kot je Umirajoči lev. Obdelava je zelo dolgotrajna in kljub temu ne vemo, ali bo končni rezultat izpolnil zahteve glede točnosti in vizualizacije. Predlagamo uporabo zmogljivejšega programa za obdelavo podatkov in tudi večjo količino izmerjenih podatkov.

Kot alternativno rešitev (po Meschini et al., 2014) bi lahko uporabili naprednejši merski sistem za zajem prostorskih podatkov (na primer Leica ScanStation P20) in tudi naprednejši program za obdelavo podatkov (na primer Real Works Survey). Mnogi instrumenti nimajo možnosti hkratnega snemanja fotografij, a obstajajo rešitve, pri katerih je mogoče nanje pritrčiti digitalno kamero in jo uporabljati ločeno. Pri tem govorimo o integraciji laserskega skeniranja in bližnjieslikovne fotogrametrije, kar je idealna rešitev za kulturnozgodovinske spomenike, kot je Umirajoči lev. Takšno izdelovanje visokoločljivega teksturiranega 3D-modela je nedvomno zelo zahtevna naloga, če hočemo dobiti zelo točne in realistične rezultate.

## Literatura in viri:

- Amans, O. C., Beijing, W., Ziggah, Y. Y., Daniel, A. O. (2013). The Need for 3D laser scanning documentation for select Nigeria Cultural heritage sites. *European Scientific Journal* 9(24), 75–91.
- Aulejtner, M. (2011). Investigation on methods for making detailed digital models of sculptures and other artefacts. *Magistarska naloga*. Trondheim, Norveška: Norwegian University of Science and Technology.
- Balić, Dž. (2014). Izrada 3D modela spomenika „Ranjeni lav“ na groblju Lav u Sarajevu korištenjem laserskog skeniranja. *Diplomska naloga*. Sarajevo: Građevinski fakultet Univerziteta u Sarajevu.
- Bariami, G., Faka, M., Georgopoulos, A., Ioannides, M., Skarlatos, D. (2012). Documenting a Unesco WH Site in Cyprus with complementary techniques. *International Journal of Heritage in the Digital Era*, 1(1), 27–32. DOI: <http://dx.doi.org/10.1260/2047-4970.1.0.27>
- Haddad, N. A. (2011). From ground surveying to 3D laser scanner: A review of techniques used for spatial documentation of historic sites. *Journal of King Saud University*, 23(2), 109–118. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jksues.2011.03.001>
- Hozo, M. K. (2007). Umirući lav – konzervatorski projekat. Sarajevo: Akademija likovnih umjetnosti Univerziteta u Sarajevu.
- Georgopoulos, A., Ioannidis, C., Ioannidis, M. (2008). 3D Virtual Reconstructions at the Service of Computer Assisted Archaeological Measurements. V: A. Posluschny, K. Lambers, I. Herzog (ur.), *Proceedings of the 35th International Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology* (9 str.). Berlin, Nemčija: CAA. <http://archiv.ub.uniheidelberg.de/propylaeumdok/volltexte/2010/535>, pridobljeno 22. 5. 2014.
- Groblje Lav (2014). Sarajevo: Kantonalno javno komunalno preduzeće Pokop, d.o.o. <http://www.pokop-sarajevo.ba/Groblja/Lav/index.html>, pridobljeno 14. 4. 2014.
- Kalinka, M., Rutkovska, E. (2007). Use The 3d Laser Scanning For Documentation, The Riga Cathedral In Latvia. V: F. Remondino, S. El-Hakim (ur.), *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, (XXXVI-5/W47): 3D-ARCH 2007: „Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures“ (5 str.). Zurich, Švica: ISPRS.
- Meschini, A., Petrucci, E., Rossi, D., Sicuranza, F. (2014). Point cloud-based survey for cultural heritage: An experience of integrated use of range-based and image-based technology for the San Francesco convent in Monterubbiano. V: F. Remondino, F. Menna (ur.), *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, (XL-5): ISPRS Technical Commission V Symposium (str. 413–420). Riva del Garda, Italija: ISPRS. DOI: <http://dx.doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-413-2014>
- Mulahusić, A., Tuno, N., Topoljak, J., Balić, Dž., Hadžiosmanović, E., Stanić, S., Hajdar, A. (2013). Primjena fotogrametrije i laserskog skeniranja kod zaštite spomenika kulturno historijske baštine. *Geodetski glasnik*, 44, 34–57.
- Pavlidis, G., Koutsoudis, A., Arnaoutoglou, F., Tsioukas, V., Chamzas, C. (2007). Methods for 3D digitization of Cultural Heritage. *Journal of Cultural Heritage*, 8(1), 93–98. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2006.10.007>
- Photogrammetry applied to the survey of Historic Monuments, of Sites and to Archaeology (1972). Pariz: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, UNESCO editions.
- Reference Manual Imaging Station IS [3.Scannig] (2007). Tokio, Japonska: Topcon Corporation, [http://www.topcon.co.jp/uploads/media/QG/IS/3\\_ScanningIS.pdf](http://www.topcon.co.jp/uploads/media/QG/IS/3_ScanningIS.pdf), pridobljeno 29. 1. 2016.
- Remondino, F., Sabry, H. (2006). Image-based 3D modelling: A review. *The Photogrammetric Record*, 21(115), 269–291. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1477-9730.2006.00383.x>
- Rüther, H., Chazen M., Schroeder, R. (2009). Laser scanning for conservation and research of African cultural heritage sites: the case study of Wonderwerk Cave, South Africa. *Journal of Archaeological Science*, 36, 1847–1856. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jas.2009.04.012>
- Rekonstrukcija i restauracija skulpture „Umirući lav“ (2014). Sarajevo: Kantonalni zavod za zaštitu kulturno-historijskog i prirodnog naslijeđa Sarajevo, <http://www.spomenici-sa.ba/groblja-i-nadgrobnji-spomenici/item/88-umirući-lav>, pridobljeno 14. 4. 2014.
- Sabry, F. H., Beraldin, A. J., Picard, M., Godin, G. (2004). Detailed 3D Reconstruction of Large-Scale Heritage Sites with Integrated Techniques. *IEEE Computer Graphics and Application* 24(3), 21–29. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MCG.2004.1318815>
- Stathopoulou, E. K., Valanis, A., Lerma, J. L., Georgopoulos, A. (2011). High and low resolution textured models of complex architectural surfaces. V: F. Remondino, S. El-Hakim (ur.), *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, (XXXVIII-5/W16): *Proceedings of the 4th ISPRS International Workshop 3D-ARCH 2011: "3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures"* (str. 77–81). Trento, Italija: ISPRS.
- Mulahusić, A., Tuno, N., Topoljak, J., Balić, D. (2016). Izdelava 3D-modela kompleksnega kulturnozgodovinskega spomenika z uporabo digitalne fotogrametrične postaje. *Geodetski vestnik*, 60 (1): 28-41. DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2016.01.28-41



**izr. prof. dr. Admir Mulahusić, univ. dipl. inž. geod.**  
 US, Građevinski fakultet, Patriotske lige 30  
 BIH-71000 Sarajevo, Bosna in Hercegovina  
 e-naslov: amulahusic@yahoo.com

**doc. dr. Nedim Tuno, univ. dipl. inž. geod.**  
 US, Građevinski fakultet, Patriotske lige 30  
 BIH-71000 Sarajevo, Bosna in Hercegovina  
 e-naslov: nedim\_tuno@gf.unsa.ba

**doc. dr. Jusuf Topoljak, univ. dipl. inž. geod.**  
 US, Građevinski fakultet, Patriotske lige 30  
 BIH-71000 Sarajevo, Bosna in Hercegovina  
 e-naslov: jtopoljak@yahoo.com

**Džemala Balić, MA geodezije, dipl. inž. geod.**  
 HPM-Vermessung, Dietrich-Bonhoeffer-Str. 8  
 D-38 300 Wolfenbüttel, Nemčija  
 e-naslov: balic@hpm-vermessung.de