

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

Žiga Stopinšek

**Uporabnost 3D merilnikov v kulturni
dediščini**

DIPLOMSKO DELO

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM PRVE STOPNJE
RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKA

MENTOR: prof. dr. Franc Solina

Ljubljana, 2012

Rezultati diplomskega dela so intelektualna lastnina Fakultete za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani. Za objavljanje ali izkoriščanje rezultatov diplomskega dela je potrebno pisno soglasje Fakultete za računalništvo in informatiko ter mentorja.

Besedilo je oblikovano z urejevalnikom besedil \LaTeX .



Št. naloge: 00037/2012

Datum: 13.04.2012

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za računalništvo in informatiko izdaja naslednjo nalogo:

Kandidat: **ŽIGA STOPINŠEK**

Naslov: **UPORABNOST 3D MERILNIKOV V KULTURNI DEDIŠČINI**
APPLICABILITY OF 3D SCANNERS IN CULTURAL HERITAGE

Vrsta naloge: Diplomsko delo univerzitetnega študija prve stopnje

Tematika naloge:

Preučite tehnične možnosti za merjenje, prezentacijo in reprodukcijo 3D oblik v kulturni dediščini, s posebnim poudarkom na uporabi te tehnologije v podvodni arheologiji. V eksperimentalnem delu naloge v praksi preizkusite izbran merilnik 3D oblik in izdelajte spletno aplikacijo za pregledovanje in preiskovanje zbirke 3D modelov.

Mentor:

prof. dr. Franc Solina

Dekan:

prof. dr. Nikolaj Zimic



IZJAVA O AVTORSTVU DIPLOMSKEGA DELA

Spodaj podpisani Žiga Stopinšek, z vpisno številko **63090153**, sem avtor diplomskega dela z naslovom:

Uporabnost 3D merilnikov v kulturni dediščini

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- sem diplomsko delo izdelal samostojno pod mentorstvom prof. dr. Franca Soline,
- so elektronska oblika diplomskega dela, naslov (slov., angl.), povzetek (slov., angl.) ter ključne besede (slov., angl.) identični s tiskano obliko diplomskega dela
- soglašam z javno objavo elektronske oblike diplomskega dela v zbirki "Dela FRI".

V Ljubljani, dne 30. septembra 2012

Podpis avtorja:

Zahvaljujem se mentorju prof. dr. Francu Solini, saj me je skozi celotno delo dobro usmerjal in bil vedno na voljo, ko sem ga potreboval. Zahvaljujem se tudi mag. Miranu Eriču, ki me je skozi delo vsebinsko podkrepil z vsem potrebnim znanjem o problematiki in me podpiral pri ideji in izvajanju praktičnega dela.

Hvala Jelki Vrečko, Sandiju Gecu, Urbanu Pavlovčiču, Gregorju Grešaku in Andreju Cimermanu za uso pomoč pri analizah in eksperimentih. Hvala Romani Krajnc za pomoč pri pravopisnih dilemah.

Posebna zahvala tudi družini, Metki in prijateljem, ki so me skozi študij vedno podpirali in me prepričali, da zmorem izpeljati zadane cilje do konca.

Očetu in mami, ki sta mi omogočila študij.

Kazalo

Povzetek

Abstract

1	Uvod	1
2	Problematika	3
2.1	Problematika kopenske dediščine	5
2.2	Problematika v podvodni arheologiji	6
3	Zajem 3D podatkov	11
3.1	Zgodovina računalniškega vida	11
3.2	Razvoj računalniškega vida	12
3.3	Oblike zajema 3D podatkov	14
3.4	Izbira ustrezne metode zajema	22
4	Predstavitev 3D podatkov	29
4.1	Oblike predstavitve 3D podatkov	29
4.2	Ogled 3D modelov z namiznimi programi	34
4.3	Spletna predstavitev	36
4.4	Navidezna resničnost	37
4.5	Hologrami in druge oblike prikaza	38
4.6	Kompresija 3D mrež	38
4.7	Poenostavitev 3D modelov	43
4.8	Avtorska zaščita	44

5 Zbirke 3D podatkov	45
5.1 Prednosti zbirke podatkov	45
5.2 Virtualna gliptoteka	47
6 Reprodukcija	53
6.1 Kopistika	53
6.2 Hitra izdelava prototipov	55
7 Eksperimenti	61
7.1 3D snemanje in modeliranje	61
7.2 Primerjava tehnik 3D zajema podatkov	64
7.3 Analiza natančnosti merilnika Artec MHT	66
7.4 Primer virtualne gliptoteke	68
8 Sklepne ugotovitve	77
Literatura	79
Priloge	87
A Uporabljena tehnologija	89
A.1 Merilnik Artec 3D MHT	89
A.2 Javascript	90
A.3 PHP	90
A.4 HTML5	90
A.5 CSS3	90
A.6 Apache2	91
A.7 MySQL	91
A.8 JQuery	91
A.9 JQuery UI	92
A.10 YAML	92
A.11 Three.js	92
A.12 CodeIgniter	93
A.13 Artec Studio	93

KAZALO

B Tabele	95
C Virtualna gliptoteka	99
C.1 Podatkovni model	99

Povzetek

V diplomskem delu smo se osredotočili na problematiko razpadanja in uničevanja kopenske in podvodne kulturne dediščine. Vzroki za to so naravni in človeški. Konservacija je draga in pogosto ni smiselna ali mogoča, zato se postavlja vprašanje digitalizacije kulturne dediščine, ki nam mogoča analiziranje, arhiviranje, prikazovanje in reprodukcijo. Opisali smo tehnike 3D snemanja, povzeli možnosti prikaza, kompresije in poenostavitve 3D modelov. Omenili smo tudi prednosti podatkovnih zbirk, ki so lahko močno orodje za eksperte. Povzeli smo tudi tradicionalne in moderne metode reprodukcije. S 3D merilnikom smo posneli nekaj predmetov in jih predstavili v osnutku virtualne gliptoteke. Preverili smo natančnost merilnika in njegovo tehniko snemanja primerjali s fotogrametrijo.

Applicability of 3D scanners in cultural heritage

Abstract

In this thesis we focus on the problem of decay and destruction of land and underwater cultural heritage because of natural and human factors. Conservation is expensive and often not reasonable or possible, so the question of digitizing cultural heritage is in place. With digitalization we can analyze, archive, present and simplify obtained 3D models. We can use 3D databases, which can be a powerful tool for experts. We also summarize the traditional and modern methods for cultural heritage reproduction. With a 3D scanner we scanned some sculptures and represented them in a virtual glyptothèque. We also tested the scanner's accuracy and compared its scanning technique with photogrammetry.

Poglavje 1

Uvod

Digitalizacija kulturne dediščine je smiselna iz več razlogov. Snovna kulturna dediščina, kot so kipi, spomeniki, arheološke ostaline, so izpostavljeni naravnim in človeškim uničevalnim dejavnikom, zato se postavlja vprašanje reprodukcije. Določeni zanimivi predmeti kulturne dediščine so širši javnosti nedostopni in bi zato lahko v virtualnih muzejih bili predstavljeni s 3D modeli. 3D modele je mogoče kompresirati in arhivirati za poznejšo uporabo. Dobra 3D dokumentacija lahko omogoča dodatne raziskave. Vključitev modelov v podatkovne zbirke lahko postavi temelj za izgradnjo sistema za iskanje in prepoznavo oblik, avtomatsko klasifikacijo, strojno učenje in veliko več. Ko imamo 3D modele skulptur enkrat zbrane v podatkovni zbirki, jih lahko z različnimi metodami reproduciramo.

Danes so 3D merilniki vedno bolj cenovno dostopni. Ljudje jih uporabljajo, ne da bi za to sploh vedeli. Slovenska arheološka podjetja jih tudi že redno kupujejo. Razvile so se še druge tehnologije, kot je pridobitev 3D oblike iz serije fotografij, ki so na spletu dostopne brezplačno.

Naši cilji so spoznati in primerjati različne tehnike 3D snemanja, preizkusiti 3D snemanje in modeliranje kipov in arheoloških ostalin, oceniti možnost izpeljave virtualne gliptoteke ter pripraviti osnutek takšnega programa.

Namen naloge je predstaviti možnosti, ki jih ponuja digitalizacija kulturne dediščine. To so različne oblike prikaza 3D podatkov z namiznimi

programi, spletnimi tehnologijami, navidezno resničnostjo in hologrami, ki jih ima večina ljudi še vedno za znanstveno fantastiko. Zanimajo nas tudi možnosti arhiviranja in reprodukcije ter prednosti podatkovnih zbirk 3D modelov, ki bi lahko počasi začele nastajati. Poleg tega želimo pokazati, da je izvedba projekta virtualne gliptoteke mogoča, njen obstoj pa je lahko pomemben prispevek slovenskemu kiparstvu in tudi narodu nasploh.

V 2. poglavju spoznamo problematiko kopenske in podvodne kulturne dediščine ter aktualne metode dokumentiranja v podvodni arheologiji. V 3. poglavju spoznamo tehnike 3D snemanja in razlike med njimi. V 4. poglavju spoznamo različne načine predstavitve 3D podatkov, torej oblike predstavitve 3D modelov in tehnologije prikaza, od namiznih programov in spleta do hologramov. V tem sklopu spoznamo tudi kompresijo in poenostavitev 3D modelov ter njihovo avtorsko zaščito. V 5. poglavju lahko vidimo prednosti uporabe podatkovnih zbirk ter oceno izvedbe projekta postavitve virtualne gliptoteke. V 6. poglavju spoznamo tradicionalne in moderne možnosti za reprodukcijo kulturne dediščine. V 7. poglavju si lahko ogledamo eksperimente diplomske naloge.

Poglavje 2

Problematika

Kulturna dediščina so viri in dokazi človeške zgodovine in kulture, ne glede na njihov izvor, razvoj in ohranjenost, ter s tem povezane kulturne dobrine [62]. Delimo jo na snovno (stavbna dediščina, arheološka dediščina, dediščinska kulturna krajina, premična dediščina, ...) in nesnovno dediščino (znanja, spretnosti, šege in navade, ...). Tako snovno kot tudi nesnovno dediščino je potrebno varovati, saj nanjo vplivajo ne le naravni dejavniki, ki jih težko preprečimo, ampak tudi človeška malomarnost. Ker dediščine ne moremo popolnoma zavarovati, je zelo pomembna natančna dokumentacija, ki jo lahko dosežemo z digitalizacijo.

Za potrebe diplomske naloge razdelimo snovno kulturno dediščino na tisto, ki je bila najdena na kopnem (v nadaljevanju kopenska dediščina), in tisto, ki je bila najdena pod vodo (v nadaljevanju podvodna dediščina). Razlog za takšno razdelitev je v tem, da se nevarnosti, obravnava problematike, načrtovanje in vzdrževanje v večini točk razlikujejo. Cilji digitalizacije kljub razlikam ostajajo enaki:

- natančna in uporabna dokumentacija
- možnost reprodukcije
- možnost čim bolj realistične predstavitve
- možnost računalniške analize, klasifikacije in strojnega učenja

Dokumentacija kulturne dediščine je pomembna za tiste, ki objekta dokumentiranja iz različnih razlogov ne morejo opazovati sami [10]. Ti so:

- objekt ni dostopen interesnim skupinam (prazgodovinske poslikave v jamah)
- objekt je prevelik ali preveč kompleksen, da bi bil spregledan, hkrati pa zahteva preveč časa, da bi se zanj sklicala nova odprava
- objekt ostane *in situ* samo krajše časovno obdobje
- objekt je geografsko preveč oddaljen od tistih, ki se zanj zanimajo
- objekt je ogrožen (naravne katastrofe, vandalizem)

Zadnji dve točki sta vedno prisotni, zato je dobra dokumentacija zaželeno. V okviru dokumentacije dediščino tudi izmerimo, umestimo, analiziramo, ugotavljamo materiale [52] ipd. Teh postopkov ni niti smiselno niti vedno mogoče ponoviti.

Tradicionalne oblike dokumentiranja najdb (npr. ročno skiciranje) imajo tri pomembne pomanjkljivosti [42]:

- nenatančnost pri reprodukciji
- izguba informacij
- subjektivnost opisa

V moderni arheologiji se zato najdbe fotografirajo in posnamejo, vedno pogosteje pa se uporabljajo tudi aktivni 3D merilniki.

3D dokumentacija lahko rešuje vse probleme tradicionalne dokumentacije. 3D modeli so lahko dostopni vsem interesnim skupinam. Nad njimi se lahko izvaja arheološka analiza. Objekt dokumentiranja se lahko programsko razdeli na več modelov, nad katerimi se posamično izvajajo analize. Vedno hitrejša internetna povezava omogočajo prenos 3D modelov po svetovnem spletu, zaradi česar postane ogled objekta mogoč tudi za tiste, ki so geografsko preveč oddaljeni.

Potreba po 3D zajemu podatkov se pojavlja tudi zaradi dveh razlogov [33]: kontroliranje rezultatov konserviranja in izdelava replik.

2.1 Problematika kopenske dediščine

Kopenska kulturna dediščina je izpostavljena različnim zunanjim vplivom. Nekateri so naravni (naravno staranje, izpostavljenost kisiku, onesnaženo ozračje, ciklusi zmrzovanja, potresi, požari, vlaga, korozija, erozija ...) in nanje nimamo neposrednega vpliva, drugi pa so posledica malomarnosti ljudi (kraje, vandalizem, malomarnost turistov, tresljaji zaradi vožnje dostavnih vozil ...) [29, 47]. Razlogi za malomarnost so lahko neozaveščenost populacije in slabo upravljanje z dediščino.

Predvsem kopensko dediščino ogrožajo upori in vojne. Aktualen primer sta kipa Bude v Afganistanu, ki so ju uničile talibanske sile marca 2001. Največji je bil visok 53 m, manjši 38 m. Ekipa iz ETH Zürich je opravila računalniško rekonstrukcijo večjega kipa [20], ki lahko služi za njegovo reprodukcijo. 3D model so ustvarili s pomočjo fotogrametrije iz treh različnih serij fotografij, ki so jih pridobili z interneta, od amaterskega turista in metričnih slik.

Glavni namen konservacije je zaščita vredne in uporabne dediščine pred poškodbami in nepravilno uporabo [56]. Tukaj je veliko naravnih dejavnikov, kot so naravne katastrofe (potresi, požari, plazovi). Zgradbe, skulpture, spomeniki in druga premična dediščina so vedno ogroženi zaradi vandalizma ali kraja. Ukradena dediščina pogosto ni najdena, če pa je, stroški popravil niso zanemarljivi (tabela 2.1). Turizem je pogosto glavni vir dohodka pri nekaterih kulturnih znamenitostih, ki pa so na ta način še bolj izpostavljene nevarnostim [15]. Poleg turistov lahko škodo povzroča tudi organizacija, ki upravlja znamenitost.

3D dokumentacija kopenske kulturne dediščine je že nekaj časa prisotna, vendar se na tem področju še veliko raziskuje [2, 9, 10, 33, 37, 38, 56].

Kip	Leto kraje	Uspešnost najdbe	Vrednost popravila
Vodnjak življenja (ukradeni dve figuri) iz Žal	2003	najdeni	5.400 €
Sedem doprsnih kipov narodnih herojev iz Parka herojev	2006	najdeni	20.300 €
Plavalka iz Kopališča Ilirija	2007	ni bil najden	/
Doprsni kip Staneta Bloudka iz parka Tivoli	2007	ni bil najden	/
Kip kurirja, ukraden iz spomenika kurirjem Dolomitskega odreda	2007	najden	10.200 €
Bronasta figura talca s Spomenika padlim v NOB	2008	najden	5.000 €
Kip s spomenika v NOV padlim profesorjem in dijakom	2008	ni bil najden	/
Figura konjička iz vodnjaka pred Hotelom Holiday Inn	2011	ni bil najden	/
Kip umirajočega talca iz Gramozne jame	2011	najden v delih	še ni podatka

Tabela 2.1: Kraje bronastih kipov v Ljubljani med leti 2003 in 2011. Vir: http://www.dnevnik.si/tiskane_izdaje/dnevnik/1042520661, citirano 4.6.2012.

2.2 Problematika v podvodni arheologiji

Priporočilo konvencije UNESCO 2001 [18] je, da se za ostaline podvodnih najdišč *in situ* (ostaline, ki niso bile premaknjene iz svojega prvotnega kraja) ohrani prvotno stanje in se tako minimizira število poškodb. To pomeni, da se iz vode ne dviguje najdenih ostalin. Razlogov je več: draga in dolgotrajna konservacija z vodo prepojenega lesa, pomanjkanje muzejskih prostorov za hrambo in osiromašenje avtentičnosti, konteksta in celovitosti najdišča. Poleg tega je lahko dvig ostalin, kot so razbitine plovil ali letal, težko izvedljiv in drag postopek, kjer je verjetnost poškodbe ostaline zelo visoka. Zato se lahko ostaline dvignejo samo v primeru ogroženosti. Podvodne ostaline najbolj ohranjamo tako, da poskrbimo za odsotnost kisika.

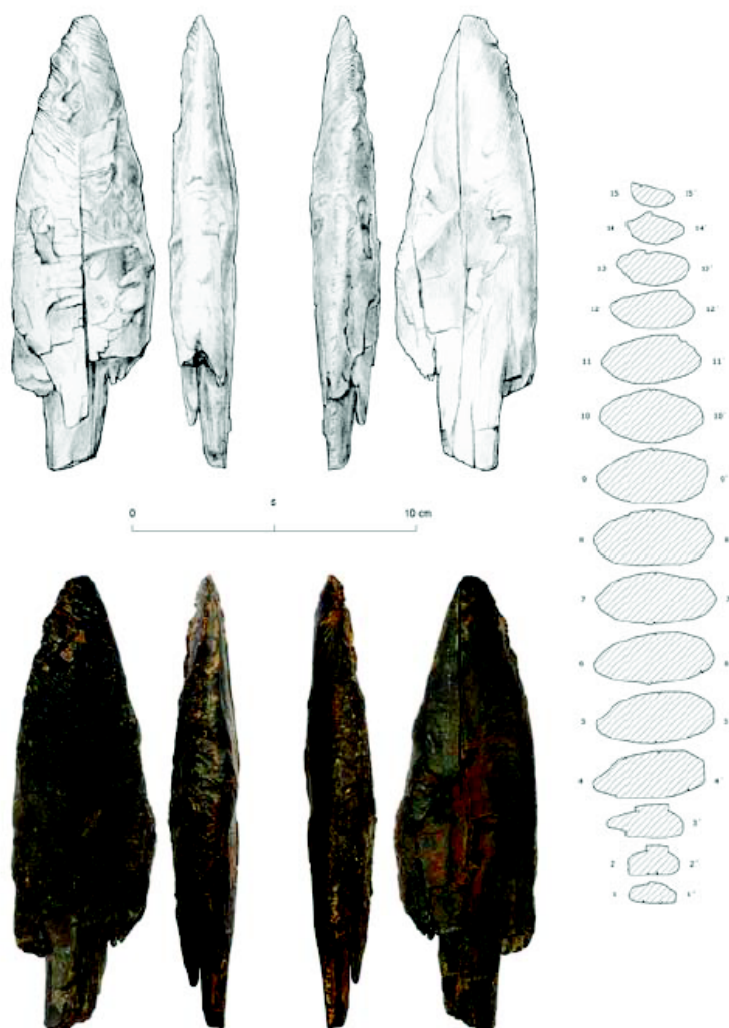
Med tistimi, ki zagovarjajo dvigovanje podvodnih najdb zaradi njihove ekonomske vrednosti, in arheologi, ki zagovarjajo stališče puščanja podvodnih najdb v vodi, že dolgo časa obstaja konflikt [11]. Spor je prisoten zaradi vprašanja lastništva. Najdišče v teritorialnih vodah neke države ostane v njeni lasti, kar pa ne more veljati za mednarodne vode. Pomorsko pravo

določa, da najdeno pripada državi, ki je bila lastnica v času potopa, kar je zaradi dobre dokumentacije pomorskega prometa po srednjem veku mogoče natančno ugotoviti. Še vedno pa obstaja veliko tveganje nedovoljenega plenjenja in prodaje vrednejših predmetov na črnem trgu.

Podvodna arheološka najdišča ogrožajo tako gospodarski posegi kot lov na zaklade in tatvine [18]. Nevarni gospodarski posegi so globinski ribolov s talno mrežo, sidranje, ladijski manevri, polaganje kablov in cevi, poglobljanje plovniških kanalov in gradnja infrastrukture. Globinski ribolov je v Sloveniji in na Hrvaškem prepovedan, vendar še ni popolnoma izkoreninjen. Podvodna najdišča so pogosto oplenjena s strani športnih potapljačev in drugih obiskovalcev. To so najpogosteje turisti, ki se ne zavedajo škode, ki jo povzročajo. S strani pristojnih institucij pa se ovirajo tudi raziskave, saj je bilo v času razcveta podvodne arheologije iz vode dvignjenih na tone najdb, ki razstavljene v muzejih propadajo. Konservatstvo lahko predstavlja velik strošek, zato velik delež predmetov ni pravilno konserviran in posledično veliko hitreje razpada, kot bi v vodi.

UNESCO priporoča ustanovitev zaščitnih območij in rezervatov, satelitski nadzor in postavitve sonarskih boj. Slednje lahko nosijo opozorilne oznake in oddajo alarmni signal, če se plovilo preveč približa zaščitenemu območju. Španija že izvaja satelitski nadzor premikov ladij v zaščitenih območjih.

Fizična zaščita najdišč predstavlja zasutje ostalin s peskom, prevleke in mreže ipd. V kombinaciji obojih lahko ostaline zaščitimo pred škodo, ki jo povzročajo sidra, kočarjenje in plenjenje. Uporabljajo se tudi zaščitne plošče in kovinske mreže ter kletke. Zaščito lahko zagotavlja tudi uvedba podvodnih parkov, stez, muzejev in uporabljanje zaščitnih lokacij. V Sloveniji se za zaščito najdišč ozavešča prebivalstvo in turiste. Razglašeni imamo tudi nekaj podvodnih spomenikov, npr. Ljubljana (primer najdbe na sliki 2.1), kjer je potapljanje brez pooblastil prepovedano (Odlok o razglasitvi struge reke Ljubljane ter njenega pritoka Ljubije, vključno z bregovi, in območja stare struge Ljubljane, za kulturni spomenik državnega pomena, ur. l. RS, št. 115/2003).



Slika 2.1: 40.000 let stara lesena konica, najdena v strugi reke Ljubljanice [19].

Problem podvodne arheologije je tudi ta, da je raziskovanje na najdišču časovno in prostorsko omejeno. Prav tako je vsak potop lahko življenjsko nevaren. Težave predstavljajo globina, ki nelinearno zmanjšuje čas potopa, omejeno gibanje, slaba vidljivost in dostopnost. Zato je bistvenega pomena dobra dokumentacija najdišča, ki lahko omogoča poznejšo analizo in predstavitev. Tudi ogledovanje je omejeno, kar za kopensko kulturno dediščino ne velja. Turistične ogledsicer lahko ponujajo potapljaški centri, vendar je potencialni ekonomski izkoristek veliko manjši kot pri kopenskih znamenitostih.

Na območjih, ki so težko dostopna ali nedostopna za potapljače s klasično opremo, se za dokumentiranje pošilja podmornice s človeško posadko ali samostojna in programsko vodena podvodna plovila (AUV) ali daljinsko vodena podvodna plovila (ROV). Slednja morajo biti z matično ladjo fizično povezana s kablom, da lahko operater vodi plovilo.

2.2.1 Dokumentacija podvodnih najdišč

Podvodna najdišča se dokumentira z ročno izmero položaja točke v odnosu do točk z znanim položajem z uporabo merskih trakov in analognih merilnih naprav ali z elektronskimi instrumenti. Sprejemljiva je natančnost do enega milimetra, za obsežnejša območja pa tudi do 10 cm. Odvisna je predvsem od namena dokumentiranja.

Vsi načini podvodnega dokumentiranja najdišč temeljijo na natančno izmerjenih oslonilnih točkah (na tlorisu), ki so lahko izhodišča meritev v mreži, od osnovnic ali s triangulacijo in trilateracijo. Določiti je potrebno tudi položaj v državnem koordinatnem sistemu. Sistemi za določanje položaja so lahko vizualni (nenatančni), optični (sekstant), elektrooptični (elektronski tahimetri) in elektronski (RADAR - Radio Detection and Ranging, LORAN - Long-range Navigation, GPS, DGPS).

Za določanje višine obstaja veliko možnosti, ki se močno razlikujejo po natančnosti (analogni globinometri do 1 m, potapljaški računalniki do 10 cm ipd.). Z rigidno risarsko mrežo se risarsko dokumentira v vodoravni in

navpični ravnini.

V uporabi je tudi nekaj sistemov za tridimenzionalno točkovno zajemanje. Direct survey method (DSM) je sistem merjenja z izhodiščem v treh točkah. Računalniški programi nato omogočajo izdelavo oblaka točk. Uporabljajo se tudi akustične naprave, ki delujejo na principu triangulacije. Obstajajo sistemi SHARPS (Sonic High-Accuracy Range and Positioning System), HPASS (High Percision Acoustic Surveying System), EDM (Electric Distance Measuring System) in PLSM (Underwater Positioning System).

Za izdelavo vseobsegajočih reprodukcij najdišč se uporabljajo fotomozaiki oz. fotogrametrija. Na podlagi velike količine posnetkov, ki se morajo pod vodo zaradi optičnih napak prekrivati vsaj za okoli 40 odstotkov [18], se lahko nato izvede 3D izvrednotenje. Stereo fotogrametrija uporablja prekrivajoče se pare posnetkov iz parov identičnih kamer na istem nosilcu, ali pa iz enega, natančno pozicioniranega aparata. Vsak del najdišča mora biti fotografiran iz dveh različnih, a vzporednih položajev. Tukaj se mora posnetek prekrivati v najmanj 60 odstotkih, na stranskih robovih pa okoli 20-30 odstotkih.

Možna pa je tudi uporaba videozapisov. S tehnologijo HDV je mogoče pridobivati zaporedja parov slik, ki se lahko v nadaljevanju obdela s stereo fotogrametrijo.

Poglavje 3

Zajem 3D podatkov

Oblak točk lahko pridobimo na več načinov. Pridobimo jih lahko iz fotografij ali videoposnetkov ali namenskih naprav, t. i. tridimenzionalnih merilnikov. S težavami analize in interpretiranja vizualnih informacij se ukvarja računalniški vid za podporo umetni inteligenci.

V nadaljevanju bomo predstavili zgodovino in razvoj računalniškega vida, oblike zajema 3D podatkov in izbiro ustreznega merilnega sistema.

3.1 Zgodovina računalniškega vida

V času prve in druge svetovne vojne so vojaške ustanove začele iskati načine iskanja in merjenja globine [8]. V 70-tih letih 20. stoletja pa se je začel razvijati računalniški vid. Računalniški vid je veda, ki se ukvarja z interpretacijo in analizo slik. Končni cilj računalniškega vida je s pomočjo vizualnih informacij reševati probleme, ki jih lahko z vidom rešuje človek [48].

V 70-tih letih je procesorska moč računalnikov postala dovolj močna, da so lahko začeli procesirati večje količine podatkov. Razvoj je pospešila ideja o umetni inteligenci, ki bo sposobna reševati enake probleme kot človeški razum. Izkazalo se je, da so podcenjevali interpretacijo slik, saj se je ocenjevalo, da bodo največjo težavo predstavljale druge oblike delovanja človeških možganov, npr. sklepanje in planiranje [50].

Prevladovalo je mnenje, da je 3D rekonstrukcija oblike nujna za vse nadaljnje naloge, zato se je razvoj usmeril v pridobivanje 3D oblike iz slik. Poskušali so z odkrivanjem robov v slikah in nato s pridobivanjem 3D oblike iz njihove topološke strukture. Za modeliranje 3D podatkov so uporabljali t.i. generalizirane cilindre, ki so zdaj zelo popularni pri razpoznavi objektov. Začelo se je razvijati tudi laserske merilnike, ki so za globinsko merjenje projicirali vzorce na objekt zajema.

3.2 Razvoj računalniškega vida

V 80-tih letih so posvečali veliko pozornosti matematičnim metodam za kvantitativno analizo slik in 3D scen. Začeli so uporabljati stereo sisteme za pridobitev 3D oblike s souporabo značilk, kot so senčenje in fokus. Želeli so poenotiti matematično ogrodje za stereo sisteme, za razne značilke in za odkrivanje robov. Pojavil se je diskreten model MRF (Markovo naključno polje, angl. Markov Random Field), ki je omogočil boljše globalne iskalne in optimizacijske algoritme, kot je postopno ohlajevanje (angl. simulated annealing) za iskanje optimuma funkcije.

V tem času so raziskovali tudi možnosti procesiranja globinskih slik (zajem, združevanje, modeliranje in prepoznavo) [23]. Pojavili so se prvi laserski merilniki na podlagi triangulacije. Ti so z lastnim virom svetlobe reševali problem korespondence, ki se pojavi pri stereo sistemih in fotogrametriji, ko se išče skupna točka na dveh fotografijah. Ker so bili prvi laserji nevarni za oči, se je pospešil razvoj aktivnih 3D merilnikov in pojavili so se prvi merilniki z metodo trajanja potovanja svetlobe in merilniki, ki uporabljajo belo svetlobo. Vendar so 3D merilni sistemi bili tako dragi, da so se uporabljali samo v panogah, kjer se obrača veliko denarja, npr. vojska ali medicina.

V 90-letih so posvetili veliko pozornosti pridobitvi strukture iz gibanja. Napredovali so algoritmi za iskanje skupnih točk na dveh slikah stereo sistemov (reševanje problema korespondence). Raziskovali so algoritme za obdelavo stereo slik z več pogledi. Napredovali so algoritmi za sledenje objektov,

kot so človeški obrazi in telesa. Napredovala je tudi računalniška grafika, predvsem za modeliranje in 3D prikaz. Pojavili so se tudi prvi algoritmi za avtomatsko ustvarjanje realističnih 3D modelov iz serij fotografij (fotogrametrija). Začeli so se uporabljati algoritmi statističnega učenja za prepoznavo obrazov, ki so ogrodje za strojno učenje. Močno je napredovala tudi segmentacija slik.

Razširil se je tudi razvoj metod prepoznave objektov, ki temeljijo na videzu (angl. appearance-based methods). Informacije se pridobijo neposredno iz intenzitet 2D slik [40]. Poznamo analizo glavnih komponent (angl. Principal Component Analysis, PCA), pristop matrične faktorizacije (angl. Non-negative Matrix Factorization, NMF), analizo neodvisne komponente (angl. Independent Component Analysis, ICA), kanonično korelacijsko analizo (angl. Canonical Correlation Analysis, CCA), Fisherovo linearno diskriminantno analizo (angl. Linear Fisher Discriminant Analysis, LDA) itd. Pri teh metodah je največji problem segmentacija slik na dele, zato obstajajo različni pristopi k segmentaciji (v osnovi so to glede na robove, glede na regije in drugi).

Po letu 2000 je napredoval razvoj analize in interpretacije digitalnih fotografij. Začeli so zapostavljati razvoj 3D merilnikov, saj so ugotovili, da 3D informacija ni več nujno potrebna za prepoznavo objektov, klasifikacijo ipd. Pojavili so se algoritmi za pretvorbo globinskih slik v obliko, ki jo je moč prikazati na zaslonu. Razvili so se algoritmi za prepoznavo obrazov glede na obrazne karakteristike, kot tudi algoritmi za prepoznavo panorame ali lokacije. Čeprav so za prepoznavo bile zanimive predvsem karakteristike točk na slikah, so se pojavile oblike prepoznavanja glede na obrise in segmentacijo regij. Izboljšali so se tudi algoritmi za globalne optimizacijske probleme.

Zdaj obstaja vrsta različnih 3D merilnikov, ki so cenovno dostopni tudi v panogah, kjer se ne obrača veliko denarja. Ponovno se je pojavil večji interes za globinsko zaznavanje in interpretacijo 3D podatkov. Napredovali so sistemi za prepoznavo objektov in območij, sledenje objektom, interpretacije scen itd.

3.3 Oblike zajema 3D podatkov

3D merilnike lahko delimo na dotične in nedotične [33]. Dotični delujejo na principu fizičnega dotika in se meritve izvajajo v specializiranem okolju, npr. laboratoriju. Iz tega razloga so za potrebe digitalizacije kulturne dediščine skoraj neuporabni. 3D obliko pa je moč pridobiti iz fotografij z metodo fotogrametrije ali stereo fotogrametrije.

Nedotičnih 3D merilnikov je veliko vrst, med katerimi so tudi prenosljive naprave, ki so za izbrano področje kulturne dediščine najbolj primerne [38]. Merilniki imajo tudi različne načine pridobitve 3D informacije. Obstaja tudi veliko metod za pridobitev 3D informacije iz dvodimenzionalnih slik ali videoposnetka, ki je v principu samo kompresirana serija fotografij.

3.3.1 Pridobitev 3D podatkov iz posameznih fotografij

Fotografije nosijo vrsto dodatnih informacij (t. i. značilke), iz katerih lahko izračunamo tridimenzionalno obliko (angl. shape-from-X) [46]. Če na primer en objekt na fotografiji prekriva drug objekt, je logično, da leži pred drugim objektom, kar imenujemo interpozicija. Le-ta predstavlja dobro značilko, preko katere lahko izračunamo relativno globino do objektov na fotografiji.

Prav tako lahko izračunamo globino glede na velikost objekta v fotografiji, kar imenujemo skaliranje zaradi perspektivne projekcije. Uspešno je, če prepoznamo objekt na sliki in poznamo njegovo velikost. Tako lahko na primer samo s poznavanjem razdalje med očmi pri človeku izračunamo njegovo oddaljenost od kamere, če poznamo parametre kamere. Podobna značilka je tudi zmanjševanje razdalje med objekti glede na razdaljo od objektiva, kar imenujemo popačenje zaradi perspektivne projekcije. Predstavljajmo si skupino ljudi, ki sedijo za dolgo mizo en nasproti drugemu. Če jih fotografiramo na začetku mize in opazujemo razdalje med tistimi, ki si sedijo nasproti, vidimo, da se glede na razdaljo od objektiva razdalja med njimi na fotografiji manjša. Podobne informacije lahko zasledimo tudi na teksturi. Če opazujemo fotografijo koruznega polja, vidimo, da je glede na oddaljenost na enem

kvadratnem centimetru fotografije vedno več koruznih listov.

Poznamo tudi vrsto drugih načinov pridobitve 3D oblik iz fotografij. Možne značilke so senčenje, gibanje, meje objektov (če vidimo elipso, lahko predpostavljamo, da predstavlja disk ali sfero), fokus na fotografiji itd.

Sistemi za pridobitve 3D oblike iz serije neregistriranih fotografij delujejo po različnih principih. Sistem Façade deluje po principu poznavanja objekta snemanja, npr. zgradbe [17].

3.3.2 Globinsko zaznavanje

Globinske slike so slike, ki predstavljajo razdaljo objekta od senzorja [17, 45]. Vsak piksel globinske slike nosi informacijo o globini namesto o svetilnosti in barvi. Tehnik globinskega zaznavanja je več vrst, uporabljajo jih pa lahko vsi optični merilniki.

Globinsko zaznavanje lahko delimo tudi na pasivno in aktivno [32]. Aktivni merilniki uporabljajo lastni vir svetlobe (laser ali strukturirana svetloba), pasivni merilniki pa ne uporabljajo nobenih dodatnih virov, ampak se zanašajo na analizo sprememb v vidni odprtini ali fokusu. Lasten vir svetlobe rešuje problem korespondence, ki ga imajo stereo sistemi in drugi pasivni merilniki.

Veliko večino najbolj aktualnih laserskih merilnikov lahko razdelimo na tri osnovne skupine [16]:

1. merilniki po principu triangulacije
2. merilniki po principu fazne modulacije
3. merilniki po principu časa potovanja svetlobe

Pri naštetih metodah v osnovi lahko zamenjamo laser s katerikoli svetlobnim virom, a se laserji uporabljajo zaradi več razlogov [16]:

- nevsiljivo se lahko uporabljajo infrardeči žarki
- nastavljiva širina snopa žarkov

- enostavno ignoriranje neželenih frekvenc
- prilagoditev frekvence

Alternativo laserjem predstavlja bela svetloba. Takšni merilniki običajno uporabljajo metodo strukturirane svetlobe ali interferometrijo [24]. Name-njeni so predvsem aplikacijam manjšega ali srednjega razpona (tukaj odpa-dejo zgradbe ali večja območja). Naenkrat ne morejo zajeti površine večje od 1 m². Za svoj zorni kot in razpon zajema imajo visoko natančnost in so cenovno vedno bolj dostopni navadnemu uporabniku.

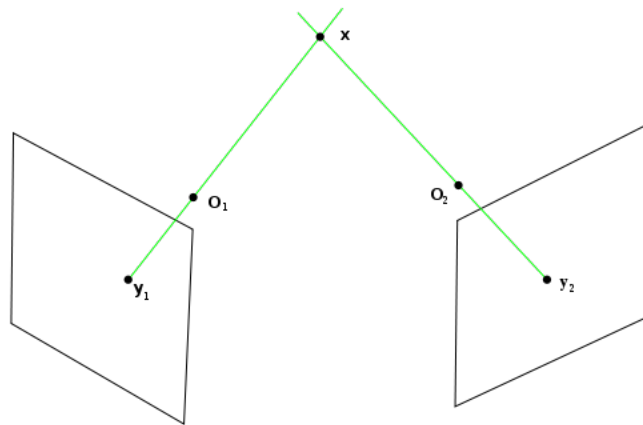
Fotogrametrija

Fotogrametrija je metoda, ki pridobi 3D podatke iz serije fotografij. Faze fotogrametrije so: kalibracija kamere in orientacija, merjenje točke na sliki, generiranje oblaka točk, generiranje površine in lepljenje tekstur. Pogosto se uporablja v kombinaciji s stereo sistemi in z merilniki s strukturirano svetlobo [42].

Fotogrametrija je cenovno ugodna, saj potrebujemo le fotoaparatus, in tudi natančna, vendar zahteva veliko procesorske moči. Poleg tega je lahko naj-hitrejši način pridobitve 3D informacije za večja območja (npr. arheološko najdišče, zgradbe). Merjenje s 3D merilnikom je počasnejše in zato primernejše za manjše predmete [51], kjer potrebujemo bolj natančno informacijo kot za celotno območje.

Stereo triangulacija

Princip stereo sistemov je, da simulira binokularen vid, kakršnega ima na primer človek. Za simulacijo potrebujemo vsaj dve kameri na znanih pozicijah, da se lahko globina izračuna po principu triangulacije (slika 3.1). Točka na objektu in točki v obeh hkrati zajetih fotografijah sestavljajo trikotnik. Ker poznamo razdaljo med obema kamerama in točki fokusa kamer, se lahko določi razdalja do točke na objektu [16]. Znanje o objektu lahko zamenja eno od kamer [46].



Slika 3.1: Na sliki vidimo princip stereo triangulacije. Točko x v realnem koordinatnem sistemu kameri preslikata v točki x_1 in x_2 . Ker poznamo točki fokusa kamer (O_1 in O_2), lahko izračunamo razdaljo do točke x . Vir: http://en.wikipedia.org/wiki/Triangulation_%28computer_vision%29

Naprave s stereo triangulacijo so pasivne, saj ne potrebujejo dodatnega vira projiciranja. Biološki sistemi, kot je npr. človekov binokularen vid, so še vedno inspiracija za večino metod zajema 3D oblike.

Težava pri stereo sistemih je ta, da je težko prepoznati enaki točki na dveh slikah kamer (problem korespondence) [16], kar zahteva veliko procesorske moči, zato je težko napraviti sistem, ki bi zajemal in sestavljal model v realnem času. Prednost takšnih sistemov pa je, da poleg zajemanj globinskih slik zajemajo tudi vizualne informacije v visoki resoluciji. So ugodni in lahko zelo natančni.

Pasivna tehnika, ki se pogosto uporablja, je tudi stereo-fotogrametrija, kjer se po principu stereo triangulacije izračuna 3D model iz serije fotografij.

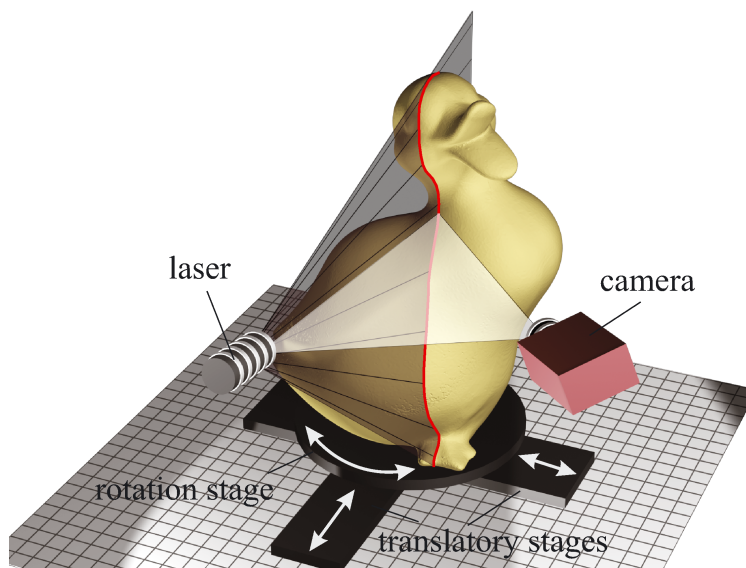
Triangulacija s projektorjem svetlobe

Če eno od kamer na stereo sistemu zamenjamo s svetlobnim virom ali laserjem, lahko na podlagi poznavanja pozicije in orientacije kamere in svetlobnega vira določimo globino [46] in odpravimo problem korespondence. Laserski žarek ali žarek bele svetlobe ustvari krivuljo na objektu, na podlagi katere prepoznavamo 3D točke. To so lahko tudi laserski merilniki po principu triangulacije.

Laserski merilniki po principu triangulacije

Princip pri triangulacijskih merilnikih je podoben tistemu pri stereo sistemih [16]. Snop svetlobe je projiciran iz ene pozicije na opazovano površino. Ustvarjeno točko svetlobe posname kamera na drugi poziciji. Ker poznamo relativne razdalje in orientacije laserja in senzorja, lahko na podlagi trigonometrije izračunamo točko na površini. Za pohitritev procesa zajemanja se namesto točke projicira črta (slika 3.2).

Laserski merilniki po principu triangulacije so zanimivi zaradi njihove visoke natančnosti in odpornosti na zunanje motnje in teksturo objekta, ki ga snemajo [42]. Ker je laserska iluminacija lahko kontrolirana, pridobimo vrsto prednosti pred drugimi merilniki:



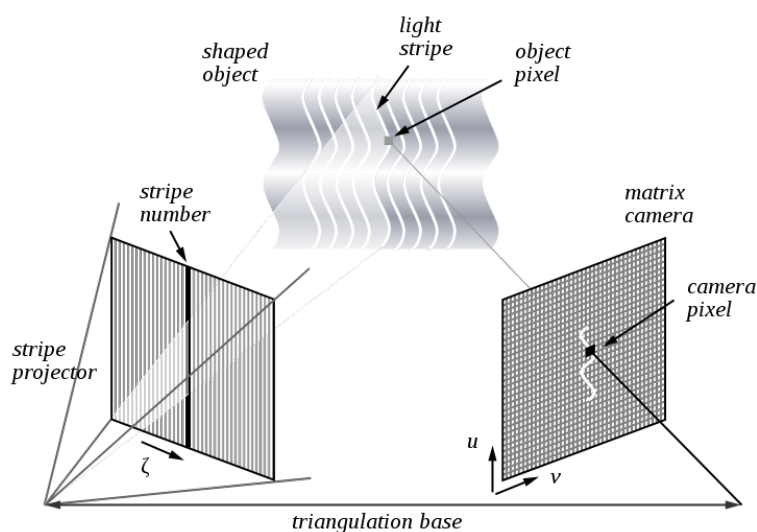
Slika 3.2: Zajem in triangulacija 3D podatkov s projiciranjem črte. Vir: http://en.wikipedia.org/wiki/3D_scanner

1. ker poznamo frekvenco laserja, lahko izločimo zunanje svetlobne mo-
tnje, npr. sonce ali luči
2. laser je lahko prilagojen z lečami ali z zrcali, zaradi česar lahko odda-
jamo več točk ali lis, kar nam omogoča izračun večih točk hkrati
3. laser lahko usmerjamo z zrcali, in če je zajemanje pod računalniškim
nadzorom, lahko določene nezanimive dele opazovanega prostora selek-
tivno izpuščamo

Imajo pa laserski merilniki s triangulacijo nekaj slabosti. Lahko so nevarni za oči, odvisno od moči laserja, problem pa predstavlja tudi kovinski ali zloščeni objekti, saj lahko pride zaradi zrcaljenja do napak pri računanju.

Strukturirana svetloba

Merilniki s strukturirano svetlobo delujejo po principu projiciranja znanih svetlobnih vzorcev na površino, kar je posebna oblika globinskega zaznavanja



Slika 3.3: Zajem in triangulacija 3D podatkov na podlagi strukturirane svetlobe. Vir: http://en.wikipedia.org/wiki/Structured-light_3D_scanner

s pomočjo triangulacije. Na podlagi deformacije teh vzorcev izračunamo 3D obliko zajetega objekta [1, 24], kot je prikazano na sliki 3.3. Čeprav za merjenje uporabljamo triangulacijo, se merilniki od navadnih merilnikov s triangulacijo razlikujejo po tem, da ne merijo dejanske oblike objekta, ampak jo določajo glede na projiciran vzorec.

Uporabljajo se laserji in tudi bela svetloba. Natančnost merilnikov je primerljiva s tistimi, ki uporabljajo triangulacijo [37]. Velikost prostora zajema je običajno do 1 m^3 pri beli svetlobi, pri laserskih je lahko tudi več.

Prednosti merilnikov s strukturirano svetlobo so v visoki hitrosti zajema in natančnosti ter cenovni ugodnosti tistih z uporabo bele svetlobe.

Cenovno dostopna tehnologija na področju aktivnega globinskega merjenja je tehnologija Microsoft Kinect. Deluje po principu strukturirane svetlobe z uporabo enega infrardečega laserja. Merilnik Kinect istočasno zajema podatke o globini in barvi s hitrostjo do 30 fps [28]. Rezultat posameznega zajema (okvirja) je oblak točk s 300.000 točkami. Rezolucija na razdalji 5 m

dosega 7 cm, napaka pa do 4 cm, zato je primeren na razponu zajema od 1 m do 3 m.

Modulirana svetloba

Pri modulirani svetlobi [24, 59] se za razliko od strukturirane svetlobe projicira spreminjajočo se svetlobo, običajno v sinusoidi. Modulira se lahko amplituda ali frekvenca. Kamera zajame odbito svetlobo in na podlagi zamika izračuna globino. Zaradi svoje narave so merilniki z modulirano svetlobo odporni na zunanje motnje, kot je močna sončna svetloba. Z moduliranim signalom se lahko meri na razponu od 20 m do 40 m z natančnostjo do 5 mm.

Merilniki TOF

Ena od metod zajema 3D podatkov je tudi čas potovanja (angl. Time-Of-Flight, TOF). Princip delovanja je podoben kot pri RADAR (RAdio Detec-tion And Ranging) ali SONAR (SOund Navigation And Ranging) sistemih [1]. Obstajajo trije načini določanja globine z merilniki TOF [17]:

1. na podlagi merjenja zamika med oddajo signala in sprejetjem njegove refleksije
2. fazni zamik med oddanim žarkom in odbitim žarkom
3. merjenja razlike med frekvenco oddanih signalov in frekvenco odbitih signalov

Za merilnike TOF velja, da lahko zajamejo samo tiste točke, ki so na njihovi poti, zato jih je potrebno rotirati. Prav tako imajo omejen zaznavni interval med dvema pulzoma, saj je merjenje časovnih razlik v hitrosti svetlobe zahteven problem. V primerjavi z ostalimi laserskimi merilniki, ki delujejo na principu triangulacije, pa imajo veliko večji zorni kot (lahko do nekaj sto metrov).

Pulzi pri merilnikih TOF so izjemno hitri ($300 \text{ m}/\mu\text{s}$) in zato zahtevajo visoko senčno resolucijo [24]. Zaradi velike hitrosti svetlobe je računanje zelo zahtevno, zato je natančnost posledično majhna, do nekaj milimetrov, kar je sprejemljivo na velikih razdaljah, na majhnih pa premalo natančno v primerjavi s laserskimi sistemi s triangulacijo ali merilniki s strukturirano svetlobo. Tipični merilniki TOF merijo globino na razdalji od 10 m do 100 m z natančnostjo od 1 mm do 10 mm [16]. Tudi hitrost zajemanja informacij je relativno majhna, tipično zajemajo od 1.000 do 25.000 točk na sekundo, kar je za večjo 3D resolucijo prepočasi. Ker lahko zajemajo na večjih razdaljah, so primerni za zgradbe ali večja območja.

Interferometrija s koherentno svetlobo

Interferometrija deluje na podlagi koherentne svetlobe [24]. Valovanje je razdeljeno na dve valovni fronti: meritveno in referenčno valovno fronto. Obe nato vsiljeno združimo skupaj in izračunamo globino glede na fazni zamik. Merilniki imajo majhen zorni kot, zato so primerni za izjemno majhne objekte.

Merilniki na podlagi kodirane zaslonke

Kodirana zaslonka (angl. Coded Aperture) je pasivna metoda [32], kjer se z minimalnimi spremembami konvencionalnega načina fotografiranja, istočasno z informacijo o barvah v visoki ločljivosti, pridobi tudi informacijo o globini. Aplikacije omogočajo tudi refokusiranje in globinsko urejanje fotografij. Dodatna optična leča popači svetlobno polje, da zajeta slika ni dokončna, ampak kodirana.

3.4 Izbira ustrezne metode zajema

Dejavniki, ki vplivajo na izbiro merilnika:

- ustrezna natančnost

- prenosljivost
- prilagodljivost
- hitrost
- domet in razpon zajema
- sproten nadzor nad zajetimi podatki
- zajem tekstur
- neškodljivost
- cenovna ugodnost

Ustrezna natančnost je pomembna zaradi namena digitalizacije. Za predstavitev v virtualnem spletnem okolju je natančnost lahko manjša, v primeru reprodukcije ali analize pa mora biti ustrezno višja. Če imamo natančen 3D model, ga lahko po potrebi poenostavimo (npr. za prikaz na spletu). Če pa zajemamo z manjšo natančnostjo, pa lahko pričakujemo napake pri analizi in interpretaciji 3D modela.

Orodja za zajem morajo biti prenosljiva, saj je kulturna dediščina razpršena po celotnem teritorialnem ozemlju Slovenije, od jezer in morja do visokogorskega sveta in kraških jam. Fotoaparati in kamere so zanimive ravno zaradi prenosljivosti in relativne cenovne ugodnosti. Na prenosljivost vplivajo tudi posredni dejavniki, kot so na primer električni vir, velikost in teža merilnika, potreben čas priprave na snemanje itd.

Prilagodljivost merilnika je mišljena glede na vremenske pogoje (močna svetloba, oblačno vreme, deževje, noč), prostorske pogoje (pod vodo, obala, jame, ...). Pomembna je tudi hitrost snemanja. Težko si predstavljamo, da bi z merilnikom, ki bi potreboval nekaj dni za zajetje nekega spomenika, posneli večji delež spomeniške kulturne dediščine.

Sprotni nadzor nad zajetimi podatki je funkcionalnost, ki lahko močno olajša delo na terenu, saj lahko sproti spremljamo pokritost zajema objekta.

Če se zgodi, da smo pozabili fotografirati nek del večjega objekta, to ugotovimo šele po nekajurnem ali celo nekajdnevnem postopku pridobivanja tridimenzionalne oblike.

Teksture so uporabna dodatna informacija pri analizi [24] in pri predstavitvi v nekem virtualnem okolju. Brez tekstur bi virtualno okolje težko predstavljalo alternativo dejanskemu ogledu spomenika ali katere druge dediščine. Cenovna ugodnost pa je predvsem pomembna zaradi omejenih sredstev pri takšnih projektih. Cenovni razpon merilnih sistemov je tako širok, da je za upravičenost namena potrebno dobro oceniti, kaj od merilnika sploh pričakovati.

Vsi dejavniki so bolj odvisni od proizvajalca merilnika kot od uporabljene metode zajema podatkov. Tabeli 3.1 in 3.2 prikazujeta razlike v aktualni ponudbi komercialnih merilnikov. Vidimo lahko, da se med sabo razlikujejo merilniki z enakim principom merjenja globine. Največji domet ima merilnik VMX-450 po principu TOF. 3D scanner podjetja NextEngine je primeren za manjše predmete, predvsem v proizvodnji, zagotavlja pa visoko ločljivost pri podrobnostih. Če ni pripisano drugače, velja natančnost za podani domet. Vsi podatki so pridobljeni iz uradnih spletnih strani ponudnikov.

Ponudniki prilagajajo neenotne in nepopolne specifikacije, zato nekateri podatki manjkajo, najpogosteje resolucija in cena. Poleg ponudnikov, opisanih v tabelah, so znani še: 3D Systems, KONICA MINOLTA, DAVID LASER-SCANNER, Creaform, Solutionx itd.

Metode se vseeno razlikujejo po hitrosti, natančnosti, dometu, zornem kotu, razponu zajema in drugih dejavnikih, zato bomo v nadaljevanju spoznali temeljne razlike med njimi, saj so različni merilniki primerni za različne dejavnosti.

3.4.1 Primerjava ročnih in mehansko vodenih merilnikov

Najpomembnejša razlika med ročnimi in mehansko-vodenimi merilniki je v natančnosti. Za 3D predstavitev objekta moramo vse zajete globinske slike

Merilnik	Artec 3D MHT [4]	Artec 3D L [3]
Proizvajalec	Artec Group	Artec Group
Metoda	strukturirana svetloba	strukturirana svetloba
Ročno vodenje	ja	ja
Zajem teksture	ja	ne
Hitrost zajema	15 fps	15 fps
Točkovna natančnost	do 0.1 mm	0.2 mm
Resolucija	0.5 mm	1 mm
Domet	do 1.0 m	do 1.6 m
Cena	14.900€	13.900€
Ponudnik v Sloveniji	IB-PROCADD d.o.o.	IB-PROCADD d.o.o.

Tabela 3.1: Primerjava 3D merilnikov z belo svetlobo. Cene in ponudniki veljajo dne 26.8.2012.

Merilnik	Kinect	3D Scanner HD [64]	VMX-450 [66]
Proizvajalec	Microsoft	NextEngine	RIEGL USA
Metoda	strukturirana svetloba	triangulacija	TOF
Ročno vodenje	ne	ne	ne
Zajem teksture	ja	ja	ne
Hitrost zajema	30 fps	50.000 točk/s	1100000 meritev/s
Točkovna natančnost	do 4 cm	0.127 mm	8 mm pri 50 m
Resolucija	do 7 cm	/	5 mm pri 50 m
Domet	do 5 m	/	do 800 m
Cena	159,99€	2.995\$	/
Ponudnik v Sloveniji	BigBang, d.o.o.	/	/

Tabela 3.2: Primerjava laserskih 3D merilnikov. Cene in ponudniki veljajo dne 26.8.2012.

nujno poravnati v isti koordinatni sistem. Ta postopek imenujemo registracija [46].

Obstaja več načinov poenostavitve postopka registracije [5]. Lahko se natančno spremlja gibanje senzorjev tako, da je merilnik pritrjen na napravo, ki meri njegovo pozicijo in orientacijo. Problem se rešuje tudi s pasivnimi mehanskimi rokami in roboti. Uporablja se tudi optično spremljanje scene, ki se zajema, ali posebni označevalniki, ki so pritrjeni na objekt ali njegovo okolje.

Študija primera 'Porta del Paradiso' [37] je pokazala, da je mehansko voden merilnik Hyscan45 (podjetje Hymarc Ltd., Kanada) izmeril objekt v natančnosti $10 \mu\text{m}$, kar je poenostavilo postopek registracije. Potrebne informacije je posredovala že naprava, zato ni bilo potrebno iskati najboljšega ujemanja zajetih globinskih slik. Ročni merilnik ModelMaker (podjetje 3D Scan Ltd., Združeno kraljestvo) je posnel objekt v natančnosti $25 \mu\text{m}$, kar lahko zahteva dolgotrajen postopek registracije. Oba merilnika sta laserska, računata pa globino na podlagi triangulacije.

Vendar pa mehansko vodeni merilniki niso primerni za vse oblike zajemanja na terenu. Zavedati se moramo, da lahko posnamejo samo tiste površine, ki so v njihovem dosegu.

3.4.2 Kopenska dediščina

Pri merjenju kopenske dediščine je izbira merilnega sistema odvisna od objekta zajema. Visoko natančnost zagotavljajo merilniki s triangulacijo, merilniki TOF in merilniki s strukturirano svetlobo. Aktivni merilniki, ki uporabljajo belo svetlobo, pa postajajo vedno bolj ugodni [24]. Vsi aktivni 3D merilniki so primerni za kompleksne objekte kot so skulpture, reliefi ali arheološke najdbe [9].

Merilniki po principu strukturirane svetlobe so primerni za manjše objekte, saj imajo zorni kot širok maksimalno okoli 1 m. Za večje objekte so primerni laserski sistemi s triangulacijo in celo merilniki TOF, ki lahko zajemajo tudi do 100 m.

Pomembna je tudi narava površine objekta. Merilniki s strukturirano svetlobo ali triangulacijo imajo težave z bleščečimi objekti in tistimi s slabo odbojnostjo (transparentni objekti) [5]. Za takšne predmete so boljši sistemi TOF, saj ne računajo globine na podlagi projekcije svetlobnega vira, ampak na podlagi časovne razlike od oddaje do sprejema signala.

Fotogrametrija in stereo fotogrametrija sta še vedno uporabni metodi zajema [9]. Čas dokumentiranja je lahko (vključno s predpripravami) veliko krajši kot pri ostalih metodah. Primerna je za objekte z značilnimi teksturami. Rezultati so lahko zadovoljivo natančni. Analogne fotografije lahko lažje arhiviramo za dlje časa.

Pogosto je primerna kombinacija aktivnih 3D merilnikov in fotogrametrije [9, 21]. Metodi se lahko dopolnjujeta in tako ustvarita popolne in natančne modele z izboljšano resolucijo, natančnostjo, definicijo geometrije (izboljšana matematična predstavitev) in teksturo.

3.4.3 Podvodna dediščina

Pogoji za snemanje so pod vodo popolnoma drugačni. Čas in prostor sta omejena, ekipa pa lahko z vsakim potopom ogroža svoje življenje. Tudi vse metode zajemanja se ne morejo uporabljati na enak način kot nad gladino, zato moramo vprašanje podvodne arheologije obravnavati posebej.

Večina aktivnih merilnikov je prirejenih za delo na kopnem. Že dlje časa pa so za fotoaparate in kamere na voljo ohišja, ki omogočajo snemanje pod vodo. Ker je cenovna razlika med konvencionalnimi fotoaparati in kamerami ter med aktivnimi 3D merilniki velika, se za dokumentiranje podvodnih najdišč pogosto uporablja fotogrametrija ali stereo fotogrametrija, ki z uporabo sodobnih algoritmov lahko zagotavljata zadovoljivo natančnost.

Na kvaliteto podvodnega zajemanja vplivajo razpršitev in absorpcija svetlobe v mediju, kar zmanjšuje kontrast in svetilnost ter povečuje izgubo podrobnosti in spremembo barve [1]. Problem rešujemo na štiri načine: polarizacijskim, prostorskim, časovnim zapostavljanjem in zapostavljanjem spektra. Upoštevati moramo tudi motnje v vidnem polju, kot so zračni mehurčki,

majhne ribice in druga bitja [54]. Poseben problem predstavlja tudi lom svetlobe v vodi, kar ima nezanemarljiv vpliv na natančnost.

Polarizacijsko zapostavljanje uporablja polarizacijsko spremembo med razpršeno in odbito svetlobo. S primernim algoritmom lahko tako izboljšamo kontrast z zajemom fotografij pod različnimi koti. Prostorsko zapostavljanje zmanjšuje degradacijo svetlobe s povečanjem razdalje med svetlobnim virom in senzorjem. Časovno zapostavljanje zavrne razpršen signal tako, da meri časovno razliko med oddajo, odbojem in sprejemom svetlobe. Če je signal hipen (torej prekratek), je zavrjen. Metodo zapostavljanja spektra izvedemo tako, da zmanjšamo valovno dolžino svetlobnega vira na moder ali zelen spekter, kjer je dušenje najmanjše [1].

Problem loma svetlobe se pri aktivnih merilnikih rešuje na dva načina [54]. Prva možnost je z uporabo laserja [53], ki projicira točke na objekt, da se lažje rešuje problem korespondence (ujemanja točk na dveh slikah). Druga možnost je t. i. kodiranje prostora (space coding) [27]. Pri tej metodi projiciramo na objekt binaren zapis, ki nato pomaga pri postopku kalibracije.

Uporabni 3D merilni sistemi

Aktivni merilniki po principu strukturirane svetlobe v kombinaciji s stereo sistemom so se izkazali za primerne za podvodne zajeme [1]. Poseben problem predstavlja bela svetloba [27], saj je sestavljena iz žarkov različnih valovnih dolžin. Na površini se odbije v različne smeri, kar popači robove projiciranega vzorca (strukturirana svetloba). Zato je priporočena uporaba monokromatske ali koherentne svetlobe [1, 27].

Uporabni pa so pasivni stereo sistemi, posebej večsmerni [53], vendar je pri njih težko najti ujemajoče se točke na slikah, saj so pod vodo teksture zelo enostavne in monotone. Prav tako nimajo lastnega svetlobnega vira, zato so odvisni od vidljivosti v vodi. Večsmerna stereo kamera (angl. omnidirectional stereo camera) je primerna, ko se snemalec v vodi premika, ali pa če snemamo premikajoče predmete.

Poglavje 4

Predstavitev 3D podatkov

Obstajata dve ciljni skupini, ki ju zanimajo rezultati digitalizacije kulturne dediščine [6]. Prva so širša publika, izobraževalne ustanove, administratorji in investitorji, ki jih najbolj zanima digitalizacija v smislu predstavitve. Druga skupina pa so eksperti (umetnostni zgodovinarji, zgodovinarji, arheologi, restavratorji, itd.). Njih zanima zbiranje, konservacija, raziskovanje, interpretacija in arhiviranje kulturne dediščine.

Dobra predstavitev je pomembna iz več razlogov. 3D model lahko za razliko od dediščine kadarkoli opazujemo na računalniku. Lahko si ga ogledujemo na spletu ali pa ga po njem prenašamo. Lahko ga tudi preoblikujemo za našo potrebo. Muzeji s 3D modeli lahko postanejo bolj atraktivni, če povežejo multimedijske predstavitve in virtualne objekte z realnimi [6]. Objekti, ki so težko dostopni ali pa se težko restavrira (npr. podvodna dediščina) so lahko virtualno predstavljeni v njihovem prostorskem in historičnem kontekstu. Pojavijo se lahko spletni 3D muzeji in virtualne gliptoteke.

4.1 Oblike predstavitve 3D podatkov

3D model je matematična predstavitev površine ali volumna nekega objekta. Obstajajo različne oblike modelov glede na njihov namen [46]. V računalniški grafiki oz. za prikazovanje so to najpogosteje mrežni modeli (3D mreže), ki

jih lahko enostavno manipuliramo (obračamo, večamo, manjšamo), za iskanje oblik, konstruiranje in sklepanje pa so primernejši volumetrični modeli.

3D modeli se v osnovi razlikujejo glede na informacijo, ki jo vsebujejo o zajetem objektu. To je lahko površina (oblak točk, 3D mreža, model ploskev-rob-oglišče) ali volumen (voksel, osmiško drevo, model posplošenega valja, superkvadrki). Prvi so primernejši za prikaz, saj bolj ali manj natančno definirajo površino. Drugi so primernejši za interpretacijo, klasifikacijo, prepoznavo objektov, saj so prilagojeni za potrebe umetne inteligence. Pri slednjih ni pomembna realistična 3D oblika objekta tako kot pri površinskih 3D modelih, saj se uporabljajo predvsem za potrebe prepoznave objektov (slika 4.3).

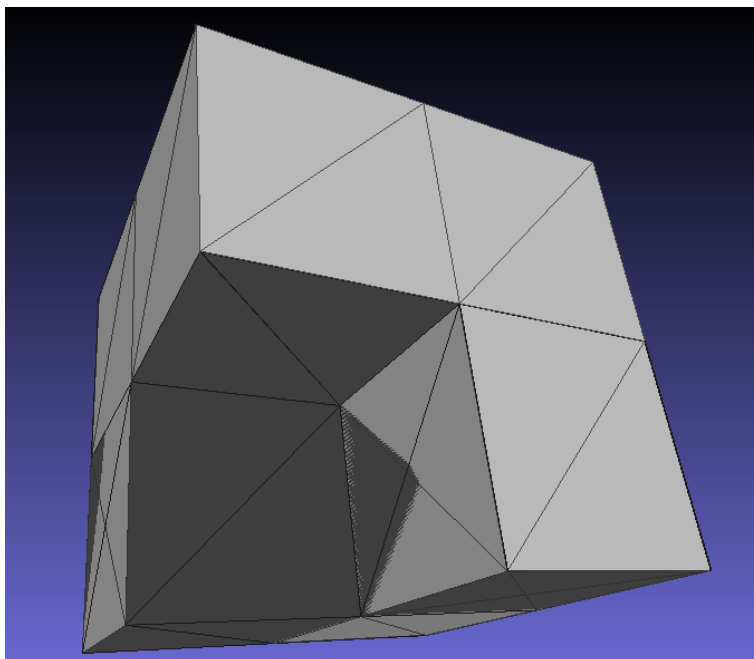
3D merilniki nam najpogosteje vračajo rezultat v obliki oblaka točk. Takšna oblika predstavitve zahteva veliko prostora. Na primer pol kubičnega metra velika kocka je lahko matematično predstavljena z osmimi točkami (oglišči) in šestimi ploskvami. Če bi ga posneli s 3D merilnikom, bi dobili nekaj tisoč točk, ki bi na gosto zgetene skupaj sestavljale ploskve kocke. Zato obstaja več alternativ, s katerimi občutno zmanjšamo količino podatkov, potrebnih za predstavitev nekega objekta.

4.1.1 3D mreže

3D mreža je enostavna geometrijska predstavitev, sestavljena iz oglišč in robov, ki skupaj predstavljajo površino objekta. Poznamo navadne mreže, ki so sestavljene iz enakih mnogokotnikov, in triangulirane mreže, ki so sestavljene iz samih trikotnikov (primer na sliki 4.1). Uporabljajo se predvsem za predstavitev.

4.1.2 Model ploskev-rob-oglišče

Model ploskev-rob-oglišče je podatkovna struktura, ki vsebuje informacije o ploskvah, robovih in ogliščih nekega objekta ter topološke povezave med njimi. Vsako oglišče nosi informacijo o točki v prostoru in o vseh robovih, ki

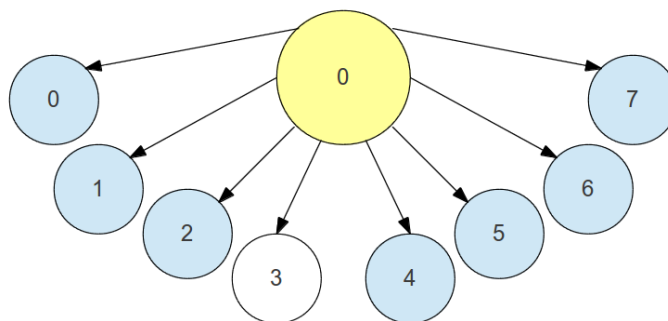


Slika 4.1: Kocka predstavljena v obliki 3D mreže.

se oglišča dotikajo. Vsak rob nosi informacijo o začetni in končni točki, levi in desni ploskvi ter loku, ki definira njegovo obliko (v primeru, da ni ravna črta). Vsaka ploskev ima podano površino, ki določa obliko, in serijo omejitev (to so oglišča in robovi). Kvadratna ploskev ima na primer osem omejitev: štiri robove in štiri oglišča. Primerni so za manipulacijo pri programiranju, saj so lahko predstavljeni kot objekti s kazalci na druge objekte.

4.1.3 Voksel

Voksli so elementarni del neke 3D scene [25], enako kot so piksli v 2D sliki, in so primerni za volumetrično predstavitev nekega modela. Niso primerni za prikaz modelov z veliko praznega prostora [68]. Poleg svoje vrednosti, voksli nimajo shranjenih koordinat. Do njih se dostopa relativno glede na ostale voksle, ali pa s tremi koordinatami: globino, številko vrstice in številko stolpca.



Slika 4.2: Primer osmiškega drevesa za kocko iz slike 4.1. Vozlišče je označeno z rumeno, polni listi z modro, prazni pa z belo barvo.

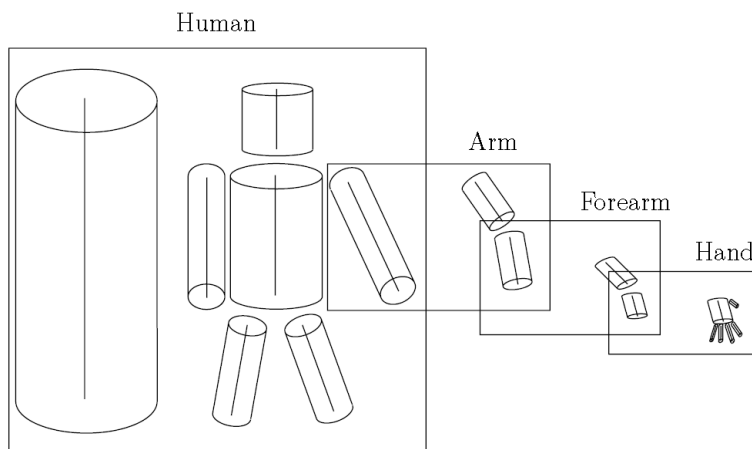
4.1.4 Osmiško drevo

Osmiško drevo je hierarhična osmiška drevesna podatkovna struktura, ki definira prostor v obliki kocke [46]. Kocka je razdeljena na osem manjših kock, vsaka od njih pa je predstavljena z enim vozliščem ali listom v drevesu. Elementi osmiškega drevesa so polni ali prazni vokslji.

List je lahko prazen (pripadajoča kocka je prazna) ali poln (pripadajoča kocka je polna). Delno polne kocke pa so predstavljene z vozlišči in so zato ponovno razdeljene na osem manjših kock, ki so lahko polne, prazne ali delno polne (novo vozlišče). Model si lahko predstavljamo kot izboljšavo voksllov, saj nam praznih in polnih prostorov ni potrebno dodatno razčlenjevati. Primer osmiškega drevesa si lahko ogledamo na sliki 4.2.

4.1.5 Model posplošenega valja

Posplošen valj ali generaliziran cilinder [23] je tridimenzionalna geometrijska oblika, ki ima lahko za osnovno ploskev kakršnokoli sklenjeno funkcijo. Določa se z osjo in osnovno ploskvijo. Če je osnovna ploskev predstavljena kot krog, potem je to pokončen krožni valj. Poznamo tudi eliptične, hiperbolične in parabolične valje. Primer posplošenega valja je tudi torus, ki ima za osnovno ploskev krog, za os pa krožnico.



Slika 4.3: Človek predstavljen z modelom posplošenega valja. Vir: [23].

Model posplošenega valja vključuje opise valjev in prostorske relacije med njimi. Valji so lahko predstavljeni z dolžino osi, povprečno širino osnovne ploskve itd.

Na sliki 4.3 vidimo primer človeka, predstavljenega s posplošenim valjem. Vsak del telesa je lahko predstavljen bolj podrobno, odvisno od potreb.

4.1.6 Superkvadrski

Superkvadrski so bili razviti za namene računalniškega vida. Predstavljamo si jih lahko kot kepe gline, ki jih po želji oblikujemo [23]. Imajo bolj naravne robove kot posplošeni valji, zato so postali popularna oblika 3D predstavitve.

Matematično so predstavljeni kot parametrična družina oblik. Superkvadrski je definiran kot vektor S s komponentami x , y in z . Vsaka komponenta je predstavljena kot funkcija, kar lahko vidimo na enačbi 4.1.

$$S(\eta, \omega) = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \cos^{\epsilon_1}(\eta) \cos^{\epsilon_2}(\omega) \\ a_2 \cos^{\epsilon_1}(\eta) \sin^{\epsilon_2}(\omega) \\ a_3 \sin^{\epsilon_1}(\eta) \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Superkvadrski se lahko deformirajo z raztegovanjem, šiljenjem, vrtenjem in prepogibanjem. Skupino superkvadrskov lahko povežemo s pravili Boolove

algebre, da skupaj sestavljajo kompleksne objekte.

Superkvadrike in generalizirane valje je težko pridobiti iz slik. Superkvadriki imajo nekaj prednosti pred drugimi oblikami predstavitev:

- majhno število parametrov z intuitivnim pomenom lahko močno vpliva na čim bolj naravno obliko superkvadrika
- obstajajo robustne metode za rekonstrukcijo iz globinskih slik
- superkvadrike se lahko dodatno oblikuje z globalnimi in lokalnimi deformacijami

Superkvadriki se uporabljajo tudi v računalniški grafiki, v robotiki in pri 3D modeliranju. Prednost superkvadrikov je tudi v preprostem odkrivanju prekrivanja in dinamični simulaciji.

4.1.7 Geon

Biederman je za predstavitev 3D podatkov predlagal geone (angl. geons) [7]. V računalniškem vidu so geoni primerni za operacije prepoznavne objektov, saj po Biedermanovi teoriji tudi ljudje prepoznavamo objekt z razčlenjevanjem na geone. Ideja temelji na človeški prepoznavi fonemov v besedah. V članku ocenjuje, da je 55 fonemov dovolj, da se predstavi večino besed v vseh jezikih sveta.

Geoni so primitivne geometrijske oblike: valji, kvadri, strehe, stožci, sfere itd. Biederman ugotavlja, da je oblik, ki jih prepoznavata človeški vid, okoli 36. Geone je mogoče predstaviti s posplošenimi valji, lažje pa s superkvadriki [23].

4.2 Ogled 3D modelov z namiznimi programi

Obstaja vrsta namiznih aplikacij za ogledovanje, ustvarjanje in urejanje 3D modelov. Poleg plačljivih komercialnih rešitev je tudi nekaj brezplačnih in odprtokodnih. Podprti so vsi večji operacijski sistemi, kot so Windows, Mac

OS X in GNU/Linux. Priporočljiva je uporaba boljših, novejših grafičnih kartic.

4.2.1 Komercialne rešitve

Ena najbolj znanih komercialnih rešitev je Geomagic Studio (<http://www.geomagic.com/>), ki poleg ogledovanja in urejanja omogoča tudi vrsto analiz. Primeren je za zajem in predelavo globinskih slik.

Poleg nakupa aktivnih 3D merilnikov običajno dobimo pripadajočo programsko opremo. Za merilnike Artec 3D MHT je to Artec Studio (<http://www.artec3d.com/software/artec-studio>), ki nas vodi med zajemom, urejanjem, poravnavo, modeliranjem, post-procesiranjem, lepljenjem tekstur in tudi izvažanjem v vrsto različnih formatov za nadaljnjo delo v drugih aplikacijah.

4.2.2 Brezplačne in odprtokodne rešitve

Za ustvarjanje 3D modelov obstaja odprtokodna rešitev Blender (<http://www.blender.org/>). Omogoča vrsto funkcionalnosti za računalniško grafiko, kot so npr. animacije. Podpira ga močna skupnost, zaradi katere je na voljo vrsta dodatkov. Podprt je za vse večje platforme, torej Windows XP, Vista, 7, Mac OS X, GNU/Linux in FreeBSD.

Močno orodje za ustvarjanje modelov je tudi Sketchup (<http://www.sketchup.com/>), ki je bil do leta 2012 podprt s strani podjetja Google. Čeprav omogoča kreacijo kakršnihkoli modelov, je predvsem uporaben za urbanistično načrtovanje.

Za ogledovanje in procesiranje modelov je eno najboljših orodij Mashlab (<http://meshlab.sourceforge.net/>). Omogoča odstranjevanje podvojenih ali neumeščenih oglišč, robov in površin, poenostavitev modelov, odstranjevanje šuma, glajenje, analizo in razno vizualizacijo. Omogoča tudi registracijo več globinskih slik skupaj.

Novejši Adobe Acrobat Reader (<http://get.adobe.com/reader/>), ki je

v osnovi namenjen za ustvarjanje in ogled dokumentov PDF, omogoča t.i. 3D-PDF format. V prazen dokument preprosto uvozimo 3D model.

4.3 Spletna predstavitev

Spletna predstavitev 3D podatkov je že dolgo aktualna tema. 3D tehnologije so v spletu zanimive tudi zaradi animacij in spletnih iger. V te namene se je dolgo uporabljalo Flash. V zadnjih letih se je s prihodom tehnologij HTML5 pojavil tudi WebGL. Poleg WebGL lahko na spletu 3D modele tudi izrisujemo s tehnologijo SVG, ki jo nekateri brskalniki tudi strojno pospešujejo, ali pa čistim HTML5, vendar pri slednjem ne moremo koristiti grafične kartice.

4.3.1 Flash

Flash je tehnologija, ki jo razvija podjetje Adobe. Nastopa v dveh komponentah, eni za razvijanje in eni za predvajanje [43]. V komponenti za razvijanje je mogoče ustvariti 2D in 3D grafike, animacije, interaktivne programe ter igre [60]. Predvajalnik Flash je najpogosteje dodatek brskalnika in omogoča izvajanje programov Flash.

4.3.2 WebGL

WebGL je programski vmesnik v jeziku Javascript za prikaz 2D in 3D grafike v spletu in bazira na vmesniku OpenGL ES 2.0 [44]. Uporablja element *canvas* prihajajočega standarda HTML5. Kompatibilen je v vseh večjih spletnih brskalnikih (Mozilla Firefox, Opera, Internet Explorer 9, Safari in Google Chrome) brez uporabe dodatkov.

Za razliko od tehnologije Flash, ki je vedno manj podprta, se podpora za WebGL širi. Čeprav je na mobilnih napravah še vedno omejena, pa tehnologijo WebGL podpira standardni brskalnik na operacijskem sistemu Android. Podpora za Apple prihaja z različico operacijskega sistema iOS 5 (v ogrodju iAds).

Obstaja vrsta knjižnic in ogrodij za delo s tehnologijo WebGL, kot so Three.js, SceneJS in OSGJS.

4.4 Navidezna resničnost

Navidezna resničnost (angl. Virtual Reality, VR) je sistem, kjer uporabnik manipulira s 3D modeli namesto s pravimi predmeti [46]. Navidezna resničnost je tesno povezana z računalniško grafiko, vendar mora vsebovati tudi druge sisteme, npr. za procesiranje slik, stereo prikaz, matematične modele za iskanje in prepoznavo objektov v prostoru, strojni vid za zaznavanje pozicije uporabnika ali predmeta itd.

V navidezni resničnosti uporabnik operira s 3D modelom in simulira operacije, ki bi jih opravljal nad realnim objektom. 3D prikaz mora biti čim bolj realističen, da je uporabnik čim manj omejen. Uporabniku mora omogočati spreminjanje okolja 3D modela v realnem času. Prav tako mora uporabniku v realnem času posredovati povratno informacijo.

Navidezna resničnost je lahko atraktiven način predstavitve znamenitosti kulturne dediščine, ki spodbuja turizem in prepoznavnost [58]. Primer takšne predstavitve je VOP (Virtual Old Prauge). VOP je spletna aplikacija, ki omogoča sprehajanje po ulicah stare Prage.

Podoben projekt, imenovan The Virtual Heart of Central Europe, želi v obliki virtualne resničnosti predstaviti štiri mesta: Prago, Bratislavo, Graz in Maribor. Namesto da bi predstavili znane zgradbe in lokacije, želijo virtualnim obiskovalcem predstaviti manj znane znamenitosti, kot so vodnjaki in stolpi. Več o projektu na naslovu: <http://www.vhce.info/>.

Nove možnosti ponuja tudi merilnik Microsoft Kinect. Njen prvotni namen je bil omogočati interaktivne igre na napravi XBOX tako, da snema uporabnika ter njegove gibe in kretnje, s katerimi uporabnik upravlja igro [28]. Zdaj se Kinect uporablja v drugih aplikacijah, tudi kot 3D merilnik preko vmesnika KinectFusion [63].

4.5 Hologrami in druge oblike prikaza

Holografija je tehnika prikaza hologramov, kjer so slike vidne v treh dimenzijah. Tehnika je lahko uporabna v prikazu kulturne dediščine, saj lahko neko težko dostopno ali nedostopno znamenitost prikaže turistom ali drugim osebam na poljubni lokaciji. Na ta način se lahko tudi zaščiti ogrožene znamenitosti, ki so jih poškodovali nepazljivi obiskovalci.

Hologrami so običajno projicirani z laserji, obstajajo pa tudi druge vrste 3D projiciranja [57]. Če okoli zaslona postavimo projektorje ter vrtimo zaslon okoli njegove z-osi z motorjem, se pojavi površina v obliki valja, na katero se projicirajo slike iz okoliških projektorjev.

4.6 Kompresija 3D mrež

3D mreže so pogosto uporabljena oblika predstavitve 3D podatkov. Pogosto zahtevajo veliko prostora v pomnilniku, zato obstaja vrsta metod za njihovo kompresijo. Primer kompresije v pogosti uporabi je zapis 3D mreže v binarni različici formata VRML, ki je postal standard za prenašanje 3D modelov po spletu [34]. V nadaljevanju bomo površno povzeli pristope metod algoritmov za kompresijo.

Algoritme za kompresijo 3D mrež lahko grupiramo v razrede glede na koncept stiskanja oz. metodo, ki jo uporabljajo. Poznamo osnovne (angl. single-rate) in napredne (angl. progressive) algoritme. Stiskajo lahko topologijo ali geometrijo. V osnovi so vsi algoritmi specializirani za triangulirane 3D mreže, obstajajo pa tudi trendi za kompresijo mnogokotnih 3D mrež. Algoritmi so lahko primerni samo za določene oblike 3D mrež, nekateri pa so primerni za vse.

Trendi današnjega časa so predvsem v kompresiji mnogokotnih mrež (drugi algoritmi razdelijo mnogokotnike najprej v trikotnike, kar ni optimalno), kompresiji na podlagi volumna in kompresiji 3D animacij.

Najboljše rezultate med osnovnimi algoritmi daje pristop z valenco. Pristop je uporaben tudi med naprednimi algoritmi.

4.6.1 Osnovni algoritmi za stiskanje topologije

Za primerjavo omenimo znakovni VRML format, ki za zapis mreže uporablja t. i. metodo indeksiranih nizov ploskev (angl. indexed face set). Če triangulirana 3D mreža vsebuje v oglišč, potem vsak indeks oglišča zadeva $\log_2 v$ bitov. Vsak trikotnik tako zahteva $3\log_2 v$ bitov, saj ga sestavljajo tri oglišča. Ker je ponavadi dvakrat več trikotnikov kot je oglišč v 3D mrežah, je potrebnih $6\log_2 v$ bitov za predstavitev povezav vsakega oglišča. Predstavljen format ne kompresira podatkov. Namen vseh spodaj opisanih metod pa je zmanjšati število potrebnih podatkov za predstavitev 3D modela.

Osnovne algoritme za stiskanje topologije bomo podrobneje predstavili, saj so uspešni, ne ustvarjajo izgub podatkov in, za razliko od naprednih algoritmov in algoritmov za stiskanje geometrije, omogočajo kompresijo primerno za arhiviranje.

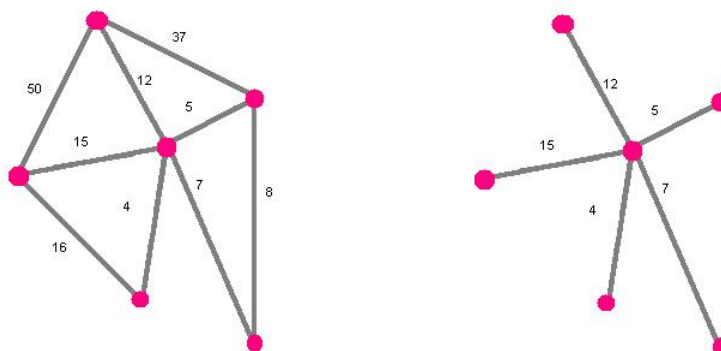
Trikotniški traki

Metoda razdeli 3D mrežo na dolge trake trikotnikov (angl. triangle strips) in nato te trikotnike stiska. Namen metode je razbremeniti prenos podatkov med grafično kartico in centralno procesno enoto, saj so trikotniški traki običajno dobro podprti na strani grafičnih kartic. Ker je oglišč običajno dvakrat več kot je trikotnikov, se nekatera oglišča ponavljajo in zato brez potrebe zahtevajo prostor.

Deeringov algoritem, ki uporablja to metodo, pripravi sklad nazadnje obiskanih oglišč. Namesto da se oglišče predstavi z globalnim indeksom, ki zahteva večje število bitov, se predstavi z indeksom sklada. Metoda lahko doseže kompresijo približno 11 bitov na oglišče za velike 3D mreže.

Vpeto drevo

Ravninski graf je lahko predstavljen s konstantnim številom bitov na oglišče z uporabo dveh vpetih dreves (angl. spanning tree): za oglišča in za trikotnike. Vpeto drevo dobimo iz povezanega grafa z n vozlišči tako, da odstranimo vsa



Slika 4.4: Desni graf predstavlja minimalno vpeto drevo levega grafa. Vir: http://wiki.fmf.uni-lj.si/wiki/Vpeto_drevo

vozišča razen $n - 1$ vozlišč, ki povezujejo vsa vozlišča grafa, kot vidimo na sliki 4.4. Na ta način lahko kompresiramo povezave v 3D mreži. Ideja je, da se prereže mreža čez določene robove in se ustvari ravninski mnogokotnik. Topologija je tako lahko predstavljena z izbranimi robovi.

Večplastna dekompozicija

Pri metodi večplastne dekompozicije (angl. layered decomposition) se uporablja plastno strukturo oglišč. Triangulirano mrežo se razdeli v več koncentričnih plasti oglišč in potem ustvari trikotniške plasti v vsakem paru sosednjih plasti oglišč. Topologija je tako predstavljena s številom plasti oglišč, postavitvijo vsake plasti oglišč in postavitvijo trikotnikov v vsaki trikotniški plasti. V idealnih pogojih se dve plasti oglišč ne sekata in je trikotniška plast posplošen trikotniški trak, vendar je v praksi veliko prekrivanja in presekov.

Pristop z valenco

Pristop z valenco (angl. valence-driven approach) izbere glavni trikotnik, katerega robovi tvorijo začetni okvir. Okvir razdeli celotno mrežo na dva dela: notranjo mrežo, ki je že procesirana, in zunanjo mrežo. Nato se okvir širi navzven, dokler ni procesirana celotna mreža. Rezultat procesiranja je

tok valenc (izraz valenca se v kemiji uporablja za razlago kemijskih vezi), iz katerih se lahko rekonstruira prvotna topologija.

Osvajanje trikotnikov

Metoda osvajanja trikotnikov (angl. triangle conquest) je podobna pristopu z valenco. Okvir razdeli mrežo na osvojeno in neosvojeno območje, nato pa algoritem vstavlja trikotnike v osvojeno območje. Rezultat je tok operacij gradnje mreže (za razliko od pristopa z valenco, kjer je rezultat tok valenc).

4.6.2 Osnovni algoritmi za stiskanje geometrije

Algoritmi za stiskanje geometrije so bili v preteklosti zapostavljeni, čeprav dosegajo kompresijo le nekaj bitov na oglišče. V nasprotju z osnovnimi algoritmi za stiskanje topologije pa stiskanje geometrije lahko povzroča izgubo podatkov. Kompresija poteka v treh korakih:

1. skalarna kvantizacija
2. napoved pozicije oglišč
3. kodiranje napak pri napovedih

Koordinate geometrije so ponavadi predstavljene z 32-bitnim formatom IEEE s plavajočo vejico. Natančnost je večja, kot jo zaznava človeško oko, ali kot je potrebna za večino aplikacij. Zato se lahko koordinate zaokrožijo na manj natančno vrednost brez večjega vpliva na kvaliteto predstavitve. Kvantizacija je postopek preslikave podatkov iz večje množice (npr. realna števila) v manjšo diskretno množico (npr. cela števila). Tehnike so lahko enakomerne (vsi podatki so predstavljeni v celicah enakih dolžin) ali neenakomerne in skalarne ali vektorske. Tipični algoritmi enakomerne skalarne kvantizacije zaokrožijo podatke v 8-bitno ali 16-bitno resolucijo. 3D mreža se pogosto razdeli na regije, kjer se po potrebi uporabi različna resolucija (npr. glede na velikost trikotnikov).

V drugem koraku se predvideva pozicija oglišč. Obstaja več shem za napoved pozicije oglišč, so pa vse posebni primeri linearne napovedi, kjer se predvideva pozicija n -tega oglišča kot linearna kombinacija pozicije prejšnjih k oglišč, ki so izbrani po posebnem postopku. Napake, ki nastanejo v napovedih, se nato kodirajo z enim od entropijskih kodirnikov, npr. Huffmanov kodirnik.

4.6.3 Napredni algoritmi

Napredni algoritmi se uporabljajo predvsem za optimizacijo prenosa podatkov po omrežju. V principu delujejo tako, da v prvem koraku posredujejo najenostavnejšo verzijo 3D mreže, nato pa v vseh naslednjih korakih kompleksnejšo verzijo. Postopek traja dokler ni prenesena surova oblika 3D mreže ali dokler odjemalec ne prekine prenosa. Koncept je primeren za postopno grajenje 3D mreže med prikazom.

Napredne algoritme za stiskanje topologije lahko razdelimo v naslednje razrede:

- napredne mreže (angl. progressive meshes)
- osvajanje z valenco (angl. valence-driven conquest)
- vgrajeno kodiranje (angl. embedded coding)
- večplastna dekompozicija (angl. layered decomposition)

Napredne algoritme za stiskanje geometrije lahko razdelimo v naslednje razrede:

- dekompozicija s k-d drevesom (angl. kd-tree decomposition)
- dekompozicija z osmiškim drevesom (angl. octree decomposition)
- spektralno kodiranje (angl. spectral coding)
- kodiranje z valovnim elementom (angl. wavelet coding)
- kodiranje geometrijske slike (angl. geometry image coding)

4.7 Poenostavitev 3D modelov

Ker so triangulirane mreže najpogostejša oblika predstavitve 3D podatkov, obstaja veliko pristopov poenostavitve takšnih 3D modelov. Nekateri modeli, ki jih ustvarijo 3D merilniki s priloženo programsko opremo, so sestavljeni iz več sto tisoč ploskev [14]. Visoka kompleksnost ni vedno potrebna, zato je smiselno določene modele poenostaviti za potrebe prenašanja po spletu, raznih predstavitev ali arhiviranja. Kadar smo prepričani, da tako kompleksnega modela ne bomo potrebovali, ga je namesto stiskanja bolje poenostaviti.

Čeprav visoka natančnost 3D modelov ni vedno potrebna, je lažje posneti objekt v visoki natančnosti in ga nato po želji poenostaviti, kot pa ponoviti snemanje z višjo natančnostjo, kot jo potrebujemo, kar pa pogosto ni mogoče. Zato je pred nabavo merilnika potrebno dobro razmisliti, če ponuja dovolj visoko natančnost za naše potrebe.

4.7.1 Združevanje komplanarnih vidikov

Z metodami združevanja komplanarnih vidikov (angl. Coplanar facets merging) v 3D mreži poiščemo komplanarne ali delno komplanarne ploskve. Komplanarne ploskve so tiste, ki ležijo v isti ravnini. Najdene ploskve nato združimo v en mnogokotnik in ga trianguliramo, da dobimo nove trikotnike.

4.7.2 Kontrolirano zdesetkanje oglišč

Kontrolirano zdesetkanje oglišč, robov in ploskev (angl. Controlled vertex/edge/face decimation) iterativno izločuje oglišča, robove in ploskve, ki ne ustrezajo lokalnemu optimizacijskemu kriteriju. Algoritmi večinoma ne uničujejo topologije. Uporablja se več pristopov:

- odstranjevanje oglišč, ki ne ustrezajo s kotom ali z razdaljo določenim kriterijem
- razpad robov v oglišča ali razpad ploskev

- sprotno računanje globalne napake med odstranjevanjem oglišč (če napaka preseže določeno vrednost, se oglišče ne zavrže)

4.7.3 Optimizacija z energijsko funkcijo

Optimizacija z energijsko funkcijo (angl. Energy function optimization) je pristop, kjer z energijsko funkcijo merimo kvaliteto poenostavljene 3D mreže. V vsakem koraku poskusno odstranimo rob. Tisti, ki z odsotnostjo najmanj zviša vrednost energijske funkcije, je izbrisan.

4.7.4 Gručenje oglišč

Pri gručenju oglišč (angl. Vertex clustering) združimo oglišča glede na bližino in gručo nato zamenjamo z novim ogliščem.

4.8 Avtorska zaščita

Z razcvetom 3D modeliranja je postala aktualna avtorska zaščita 3D modela. Ena od oblik zaščite je tudi 3D zgoščevanje (angl. 3D hashing). Zgoščevalne funkcije preslikajo blok znakov ali bitov v blok konstantne dolžine. Primerne so za prepoznavo kopij in avtentifikacijo [31]. Za avtentifikacijo se tipično uporabljajo kriptografske enosmerne zgoščevalne funkcije MD5 in SHA, vendar niso primerne za detekcijo kopij.

Obstaja več možnosti zgoščevanja. Učinkovita možnost je zgoščevanje glede na vsebino. Najprej analiziramo model in izločimo njegove karakteristike. Nato z nekim ključem glede na karakteristiko generiramo pripadajoč binaren niz, ki ga lahko primerjamo z nizi drugih modelov.

Poglavje 5

Zbirke 3D podatkov

Podatkovne zbirke so pomemben člen digitalizacije kulturne dediščine. Za končnega uporabnika zagotavljajo indeksiranje, klasifikacijo in pridobitev 3D modelov [36].

5.1 Prednosti zbirke podatkov

Posamezen 3D model lahko analiziramo, merimo, prikazujemo in oblikujemo. Če ga vključimo v zbirko podatkov, pa lahko izvajamo vrsto drugih operacij, kot so:

- avtomatska klasifikacija (npr. obdobje, material itd.)
- primerjava 3D modelov
- iskanje po zbirki
- iskanje in prepoznavna oblik

Če je predstavitev podatkov pomembna predvsem za širšo publiko, izobraževalne ustanove, administratorje in investitorje, so zbirke podatkov lahko ključno orodje za zgodovinarje, umetnostne zgodovinarje, arheologe, konservatorje in druge eksperte. Iskanje, klasifikacija, primerjava, umestitev v širši kontekst idr. so operacije, ki jih velika večina še vedno izvaja ročno, lahko pa

bi jih nadomestil inteligen ten sistem. Tako lahko eksperti svoj čas usmerijo v druge operacije, kjer jim računalnik ne more biti v pomoč.

5.1.1 Iskanje oblik

Obstaja več tehnik za iskanje oblik (angl. three-dimensional shape searching). Večina se jih osredotoča na računalniško podprto načrtovanje (angl. Computer-Aided Design, CAD) in inženirstvo [22]. Iskanje se vrši glede na:

- globalne karakteristike (angl. global feature-based)
- proizvodne karakteristike (angl. manufacturing feature recognition-based)
- topologijo (angl. graph-based)
- histogram (angl. histogram-based)
- informacijo o produktu (angl. product information-based)
- prepoznavo 3D objekta (angl. 3D object recognition-based)

Metode glede na globalne karakteristike so računsko učinkovite, vendar pa ne znajo izločiti oblike, ki si niso podobne. Metode glede na proizvodne karakteristike ne razgrajujejo oblik unikatno, poleg tega pa pogosto zahtevajo človeško posredovanje. Metode glede na topologijo imajo težave z modeli z veliko povezavami, če pa temeljijo na skeletu objekta, se jih ne more uporabiti za katerekoli probleme. Metode glede na histogram so računsko manj učinkovite. Najboljše rezultate dajejo, ko je izbranih veliko točk, vendar se takrat močno poveča računska zahtevnost. Metode glede na produkt vedno potrebujejo človeško posredovanje. Metode glede na prepoznavo 3D objekta poznajo premalo različnih oblik in imajo veliko računsko in prostorsko zahtevnost.

Za klasifikacijo so primerne metode glede na globalne karakteristike. Za točno primerjavo pa so primerne tehnike glede na prepoznavo 3D objekta.

Klasifikacija nam odpira vrata v druga orodja umetne inteligence, kot je npr. strojno učenje.

5.1.2 Primer iskalnika

Primer interaktivnega ogrodja za iskanje je RETIN-3D [36]. Cilj ogrodja je ponuditi uporabniku prijazno orodje za klasifikacijo, za indeksiranje glede na vsebino, za pridobitev in za vizualizacijo modela. Primeren je za zgodovinarje in arheologe, da lahko iščejo, prikažejo in primerjajo umetniška dela. Glede na histogram klasificira modele v kombinaciji s segmentacijo površine in lokalnimi deskriptorji oblik.

5.1.3 Primer avtomatske klasifikacije

Na področju kulturne dediščine se že dolgo časa raziskuje avtomatska klasifikacija. Zanimiva pridobitev za arheologe in zgodovinarje je, da lahko iz oblaka točk pridobijo informacije o lončeni posodi, ki je predstavljena v članku [26].

3D obliko dobijo z merilnikom Vivid 900 podjetja MINOLTA, ki deluje po principu strukturirane svetlobe. Ekspertni sistem simulira arheološki pristop in razdeli pridobljen model na temelj, steno in obod, na podlagi katerih izračuna potrebne točke za klasifikacijo. Določijo se trije atributi:

- blago
- osnovna oblika
- osnovni tip

5.2 Virtualna gliptoteka

Gliptoteka je muzej kiparskih del in hkrati institucija, ki prinaša razvoj umetniškemu in družbenemu okolju, v katerem je [30]. V gliptoteki se zbirajo, hranijo, restavriraajo in postavljajo na ogled kipi in vsa ostala dela, ki jih

ustvarjajo kiparji ali pa so tesno povezana s kiparstvom. Beseda *gliptoteka* izhaja iz grščine (*glipto* - izdolben, *teka* - zbirka). V Jugoslaviji je bila gliptoteka v Zagrebu, Slovenija pa je nima. Gliptoteka bi bila namenjena skrbi za kiparske umetnine (avtorska dela) iz domovine in tujine, izobraževanju ter promociji del slovenskih avtorjev doma in v tujini. V svetu je nekaj pomembnih gliptotek:

- Glyptothek v Münchnu (zasnovana leta 1806, odprta 1830)
- Glyptoteket v Kopenhagnu (1899)
- Dvorana skulptur v muzeju Carnegie (1907)
- Gliptoteka v Zagrebu (1937)
- Noguchi Museum v New Yorku (1985)
- Gipsoteca-Gliptoteca v Trstu (2000)
- Sculpture Collection and Museum of Byzantine Art (2000)

Dokler Slovenci še nimamo svoje gliptoteke, jo lahko vsaj v ideji zamenja virtualna gliptoteka. Virtualna gliptoteka je virtualno okolje, kjer si lahko uporabniki ogledujejo 3D modele skulptur, zgodovinskih artefaktov, spomenikov in drugo kulturno dediščino. Poleg samega ogledovanja objekta lahko ponuja tudi vrsto informacij o objektu, kot so kraj in datum nastanka, avtor, umestitev, okoliščine, ipd. V okviru virtualne gliptoteke lahko delujejo tudi naslednji sistemi:

- avtorska zaščita
- avtomatska prepoznavna skulpture
- iskanje po oblikah skulptur
- avtomatska klasifikacija skulpture
- sistem arhiviranja 3D modelov skulptur

- reprodukcija skulptur

Virtualna gliptoteka je lahko izobraževalni pripomoček za osnovnošolce, dijake in študente. Lahko promovira slovenske kulturne znamenitosti turistom in jim pomaga pri iskanju le-teh. Z razcvetom e-poslovanja lahko omogoča prodajo sodobnih skulptur slovenskih avtorjev na e-dražbah. S sodobnimi tehnikami prepoznavne objektov lahko omogoča napredno iskanje informacij o kipu in avtorju po zbirki glede na fotografijo, posneto s pametnim telefonom ali tablico.

5.2.1 Tehnologije

Obstaja več tehnologij, ki so primerne za izvedbo virtualne gliptoteke:

- spletne tehnologije (PHP, Java, ASP.NET),
- mobilne platforme za pametne telefone in tablične računalnike (Android, iOS, Windows Phone).

Spletne tehnologije so dostopne večjemu delu populacije. Strežnikov in strežniških programskih jezikov je več, od odprtokodnih in brezplačnih (PHP in Apache, Java in Apache Tomcat) do plačljivih (ASP.NET in Microsoft Server). Povezljivi so z vrsto različnih sistemov za upravljanje podatkovnih baz (MySQL, PostgreSQL, Microsoft SQL Server, ...). Na strani odjemalca je primeren programski jezik JavaScript, ki lahko v kombinaciji z vmesnikom WebGL omogoča prikaz 3D modelov. Vmesnik WebGL podpirajo že vse novejšje verzije večjih brskalnikov (Mozilla Firefox, Google Chrome, Opera idr.).

V času razcveta pametnih telefonov in tabličnih računalnikov bi lahko bila virtualna gliptoteka aktualna aplikacija na prenosnih napravah, vendar so tehnologije 3D prikaza še v fazi razvoja. Določeni mobilni brskalniki že omogočajo WebGL (standardni brskalnik na operacijskem sistemu Android), za programe na mobilnih operacijskih sistemih pa je primeren vmesnik OpenGL ES (http://en.wikipedia.org/wiki/OpenGL_ES).

5.2.2 Izvedba projekta virtualne gliptoteke

Za izvedbo virtualne gliptoteke potrebujemo dve ločeni ekipi, in sicer vsebinsko in tehnično. Vsebinska bi pokrivala izbiro ustreznih skulptur in spomenikov z opisi in drugimi informacijami, tehnična pa bi poskrbela za 3D snemanje, 3D modeliranje ter izdelavo virtualne gliptoteke.

Cilj projekta

Cilji projekta so:

- 3D posneti in modelirati 20 večjih kipov in spomenikov v Sloveniji
- 3D posneti in modelirati 30 srednje velikih kipov in spomenikov v Sloveniji
- 3D posneti in modelirati 50 manjših kipov in spomenikov različnih slovenskih avtorjev za njihovo promocijo
- ustvariti in objaviti spletno virtualno gliptoteko
- ustvariti in objaviti virtualno gliptoteko kot mobilno aplikacijo za operacijski sistem Android in za mobilni operacijski sistem iOS

Večji kipi so tisti, za katere potrebujemo minimalno več kot 5 zajemov (angl. scan). Za srednje velike potrebujemo največ 5 ali manj zajemov, za majhne pa enega [51].

Minimalna oprema

Predpostavimo lahko, da je minimalna oprema za izvedbo projekta virtualne opreme naslednja:

- merilnik Artec MHT za snemanje 3D oblike in tekstur
- trije osebni računalniki (med njimi vsaj en prenosnik) za modeliranje posnetih 3D podatkov in z nameščenim programom Artec Studio 8

(na stacionarnih računalnikih se lahko medtem, ko Artec Studio izvaja dolgotrajne operacije, programira virtualna gliptoteka)

- vsaj dva osebna računalnika z nameščenim operacijskim sistemom Windows ali Linux za programiranje različice za splet in operacijski sistem Android
- vsaj en osebni računalnik z operacijskim sistemom Mac in licenco za programiranje iOS programov

Naloge ekip

Naloga vsebinske ekipe je izbrati in umestiti v kontekst 100 kipov in spomenikov različnih slovenskih avtorjev na območju Slovenije. Priskrbeti mora tudi dovoljenja in informacije o kipih in spomenikih, njihovih avtorjih ter pripadajočih umetnostnih obdobjih in kiparskih zvrsteh.

Naloge tehnične ekipe lahko razvrstimo v tri kategorije:

1. 3D snemanje kipov in spomenikov, ki jih je določila vsebinska ekipa
2. modeliranje posnetih kipov in spomenikov
3. izdelava virtualne ekipe za splet in operacijski sistem Android
4. vnašanje zbranih informacij vsebinske ekipe v podatkovno bazo virtualne gliptoteke

Čas in prostor 3D snemanja

Tehnična ekipa, ki bi snemala kipe in spomenike na terenu, se mora zavedati nekaterih omejitev [51]:

- močna svetloba ni primerna za merilnik MHT, zato je potrebno snemati ponoči, zgodaj zjutraj, v mraku ali med oblačnim vremenom
- potrebno je zagotoviti električni vir za prenosni računalnik in merilnik MHT

	Trajanje (h)	Trajanje (dan)	Strošek (€)
Snemanje skupaj	115	15	2650
Modeliranje skupaj	47.5	6	480
Programiranje	300	38	12000
Delo vsebinske ekipe	50	7	3000
SKUPAJ	512.5	65	18130

Tabela 5.1: Ocena trajanja in stroškov izvedbe virtualne gliptoteke.

- za večje kipe je potrebno zagotoviti pripomočke za nemoteno snemanje (stojala, lestve, mize, ročni meter itd.)

Ker so spomeniki in kipi razporejeni po celotnem območju Slovenije, potni stroški niso zanemarljivi.

Trajanje in stroški

Projekt izdelave virtualne gliptoteke bi trajal 52 dni, če ekipe ne bi delale istočasno. Če upoštevamo, da lahko vsebinska in tehnična ekipa svoje delo opravljata ločeno, se lahko število dni občutno zmanjša. Prav tako se lahko nekatere naloge tehnične ekipe izvajajo ločeno. Modeliranje kipov lahko poteka hkrati s snemanjem, saj so lahko prejšnji kipi že na voljo. Vsebinska ekipa lahko seznam izbranih kipov posreduje tudi preden pridobi vse potrebne informacije. Ogrodje virtualne gliptoteke pa se lahko programira preden so modeli kipov pripravljani.

Oceno trajanja in stroškov (NETO) lahko vidimo v tabeli 5.1. V oceni nismo upoštevali:

- potnih stroškov
- stroškov nakupa minimalne opreme
- davkov in drugih prispevkov

Vse predpostavke za oceno trajanja in stroškov lahko vidimo v tabelah B.1, B.2 in B.3.

Poglavje 6

Reprodukcija

Eden od ciljev digitalizacije kulturne dediščine je tudi možnost reprodukcije oz. kopiranja. Na področju kulturne dediščine se z reprodukcijami ukvarjajo restavratorji oz. konservatorji.

Ena prvih metod reprodukcije je bila s pomočjo pantografa, ki se je na začetku uporabljala za prepisovanje talnih oznak [65]. Pantograf je prenosni mehanizem, sestavljen iz paralelogramov. S pantografom sledimo vzorcu s premikanjem prve točke na eni strani, ki se nato na drugi strani izriše v povečani ali pomanjšani različici.

V kiparstvu se uporablja tridimenzionalna različica pantografa [61]. V principu je to držalo oz. roka z dvema kazalcema, ki se skupaj premikata. En kazalec se pomika po površini skulpture, drugi pa mu sledi. Držalo stoji na pivotnem mehanizmu ali žogi. S prilagoditvijo razdalje med kazalcema se določi velikost nove skulpture.

6.1 Kopistika

Kopistika je dejavnost izdelave kopije, ki začasno ali trajno zamenja original v prostoru, ki bi drugače izgubil svojo značilnost in pomen [47]. Kopije lahko imajo več funkcij, npr. kot eksponat, kot pripomoček pri muzejsko-pedagoškem programu. Ni nujno, da je kopija popolnoma enaka kot original.

Lahko je iz različnega materiala, lahko vsebuje razne spremembe ... Obstajata dva bolj prepoznavna principa v kopistiki: francoski (impresionističen) in avtentičen. Slednji ima v Sloveniji največ zagovornikov.

V Sloveniji obstaja več primerov zamenjave originalnih spomenikov s kopijami, npr. zamenjave kipcev kapel kalvarije v Šmarju pri Jelšah [39]. Kopije so ustvarili iz umetne smole s pomočjo kalupa na podlagi fotografij, največ iz leta 1913. Originale so spravili v muzej pod kalvarijo. Bolj odmeven primer pa je Robbov vodnjak [29], ki je bil leta 2005 umaknjen iz Mestnega trga v Ljubljani, leta 2006 pa ga je nadomestila nekoliko popravljena in dopolnjena kopija. Ker se je kopija vidno razlikovala od originala, se je v javnosti pojavila bojazen, da bo zameglila spomin na original. Originalni Robbov vodnjak je bil po letu 2008 umaknjen v Narodno galerijo, kopijo pa so ljudje počasi začeli sprejemati.

Obstaja vrsta pomislekov o primernosti kopij, vendar je nadomestitev s kopijo pogosto edini način zavarovanja ogrožene skulpture. Pojavlja se tudi vprašanje v povezavi z religijo. Verniki naj bi kopije ne doživljali enakovredno kot original, zato predlaga Ivan Bogovič [39] tudi blagoslov kopije, kakor je bil blagoslovljen original.

Pomemben je tudi faktor časa. Več kot je minilo časa od zamenjave originala s kopijo, manj je negotovih odzivov na ta dogodek.

Vendar pa kopistika predvideva, da je original ali vsaj njegov kalup na razpolago. V primeru kraj ali uničenja lahko rekonstruiramo spomenik mnogo enostavneje s pomočjo shranjenega 3D modela, ki smo ga pridobili še v času obstoja spomenika.

6.1.1 Metode kopistike

V osnovi lahko kopijo izdelamo na več načinov [47]. Lahko ustvarimo odlitek originalnega dela, lahko jo izdelamo z enakimi tehnikami, s katerimi je bil izdelan original, lahko izdelamo kopijo strojno s pomočjo laserja.

Če želimo ustvariti odlitek originalnega dela, moramo najprej pripraviti negativ oz. kalup. Primerni materiali za kalup so klej, vosek, poliuretanska

pena, poliester in silikon kavčuk [49]. Original zaščitimo, da med odstranjevanjem kalupa ne pride do poškodb, nato pa naneseemo izbran material. Pri pripravi odlitka oz. pozitiva so možni materiali mavec, alabaster, keramika, cement, epoksi smola, poliester itd.. V kalup vlijemo izbran material, in ko se strdi, odstranimo kalup (slika 6.1).

Pri strojno izdelani kopiji ni potreben noben poseg na originalu [47]. Objekt se posname s 3D merilnikom (običajno z laserjem), računalniško obdelava in nato z laserjem izreže iz enakega materiala kot je original ali katerega drugega.

6.2 Hitra izdelava prototipov

Zanimive so predvsem tehnologije hitre izdelave prototipov (angl. Rapid prototyping), ki avtomatizirano ustvarijo fizični objekt z uporabo 3D tiskalnikov ali posebnih laserjev. Tehnologije uporabljajo različne materiale, od jekla do plastike. Tehnologije hitre izdelave prototipov lahko temeljijo na [13]:

- tekočih snoveh (stereolitografija)
- trdih snoveh (ciljno nalaganje)
- prahu (3D tiskanje, selektivno lasersko sintranje)

Glavna prednost tehnologij hitre izdelave prototipov je, da omogočajo avtomatsko izdelavo objekta iz 3D modela, predstavljenega v različnih formatih, kot npr. formati STL, VRML itd.

6.2.1 Stereolitografija

Stereolitografsko orodje (angl. Stereolithography apparatus, SLA) je prvo komercialno orodje za hitro izdelavo prototipov [55].

Od dna proti vrhu se po slojih vlije tekoč akrilat (polimer, ki glede na svetlobo spreminja lastnosti). Vsak sloj sproti oblikuje laser. Ko je prototip zgrajen do konca, se ga še zgladi z ultravijolično svetlobo.



Slika 6.1: Kalup in odlitek. Vir: <http://www.thegnomonworkshop.com/store/product/291/Sculpture-5#.UEcab1IuF2M>

Orodja so lahko natančna do $\pm 100 \mu\text{m}$, debelina slojev pa lahko doseže $50 \mu\text{m}$ [35]. Naprava SLA 7000 podjetja 3D Systems izdeluje v delovnem prostoru $508 \times 508 \times 600 \text{ mm}^3$ [13].

6.2.2 Selektivno lasersko sintranje

Sintranje je proces izdelave izdelka iz prahu. Pri selektivnem laserskem sintranjem (angl. Selective laser sintering, SLS) se uporablja prah namesto tekočih materialov, kot jih uporabljamo npr. pri stereolitografiji. Prototip se izdelava s sintranjem prahu.

Nekateri uporabljeni materiali so poliester, polikarbonat, najlon, vosek, polivinil klorid (PVC), polipropen. Prah segrejemo na temperaturo, ki je malo višja od tališča materiala. Z laserjem nato segrejemo prah do temperature sintranja, in ko se strdi, nanesimo novo plast in postopek ponavljamo.

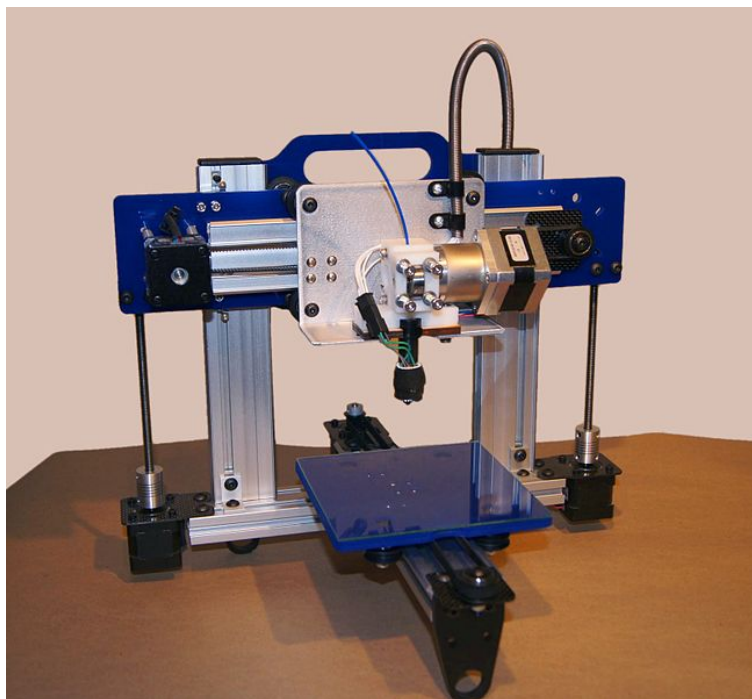
Dosežena natančnost je lahko do $51 \mu\text{m}$, debelina slojev pa do $76 \mu\text{m}$. Naprava VanguardTM si2TM SLS® podjetja 3D Systems izdeluje predmete v delovnem prostoru $370 \times 320 \times 445 \text{ mm}^3$.

6.2.3 Ciljno nalaganje

Ciljno nalaganje (angl. Fused deposition modelling, FDM) omogoča izdelavo kakovostnih prototipov, njegova velika prednost pa je uporaba različnih materialov.

Uporabljajo se podobni materiali kot pri selektivnem laserskem sintranju (najlon, ABS, polikarbonat in drugi plastični materiali). Posebna glava se premika horizontalno po osi x in y , da oblikuje vsak sloj. S temperaturno obdelavo pritrdi nov sloj na prejšnje. Nato se glava premakne v smeri osi z .

Natančnost prototipa je približno $\pm 127 \mu\text{m}$, sloji pa so debeline od $50 \mu\text{m}$ do $762 \mu\text{m}$. Naprava FDM Maxum podjetja Stratasys Inc. lahko izdeluje predmete velikosti do $600 \times 500 \times 600 \text{ mm}^3$.



Slika 6.2: Primer 3D tiskalnika. Vir: http://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing

6.2.4 3D tiskanje

Pri 3D tiskanju (angl. 3D printing, 3DP) delce prahu združujemo z uporabo nekega veznega materiala. Uporabljajo se različni materiali, kot je jeklo, keramika, za vezi pa plastični materiali ali silicijevi geli. Primer 3D tiskalnika vidimo na sliki 6.2.

Sloji so debeli $177\mu\text{m}$, natančnost pa dosega $\pm 127\mu\text{m}$. Naprava ZTM 810 3DP podjetja Z Corporation lahko izdeluje predmete do velikosti 500 x 600 x 400, naprava R10 system podjetja ProMetalTM pa do 1000 x 500 x 250 mm³

Tudi veliko podjetij v Sloveniji ponuja storitve 3D tiskanja. Večina spletnih strani nima priloženih cenikov, saj je cena odvisna od več dejavnikov, npr. velikosti. Primer slovenskega podjetja je 3Dprint.si, ki ima naslednje okvirne cene (www.3dprint.si/si/files/price-list.pdf, dostopano

24.8.2012):

- predmet velikosti kovanca - 10 €
- predmet velikosti skodelice - 150 €
- predmet velikosti 100 mm × 100 mm × 200 mm - 350 €

6.2.5 Problemi

Manjše replike predmetov kulturne dediščine se že ustvarjajo. Problem je pri večjih objektih, kot so kipi in spomeniki, saj so preveliki, da bi jih lahko 3D tiskalniki in druge naprave hitre izdelave prototipov ustvarile v polni velikosti. Za dva metra visok kip Vittorie Alata so ustvarili 30 cm veliko repliko iz stisnjene modela, velikega 3,5 milijonov trikotnikov v formatu STL [41].

Razvoj in izboljšava tehnologij hitre izdelave prototipov je intenzivno prisotna od izuma stereolitografskih orodij. Velikost izdelanih prototipov pa bi se naj kmalu občutno povečala [12].

Poglavje 7

Eksperimenti

7.1 3D snemanje in modeliranje

7.1.1 Skulpture iz Zavoda za kiparstvo

Na Zavodu za kiparstvo smo posneli 13 skulptur, od tega dve neuspešno zaradi merilniku neprimerne površine. Snemanje s pripravami je trajalo 5 ur. Skulpture smo nato modelirali v programu Artec Studio (opis programa je v prilogi A.13), ki je priložen merilniku. Uspešne modele smo vključili v virtualno gliptoteko.

Eksperiment je pokazal, koliko časa potrebujemo za snemanje manjših in srednje velikih skulptur (tabela 7.1). Če dovolj dobro ocenimo število zajemov, ki jih bomo potrebovali za popolno 3D modeliranje, lahko približno ocenimo čas trajanja snemanja in modeliranja.

7.1.2 Drevak

Drevak (slika 7.1) je tipična notranjska jezerska ladja. Dolg je 5,57 m, pri krmi je širok 0,93 m, pri premcu pa 0,67 m. Na sredini je visok približno pol metra. Je primer večjega in zahtevnega objekta za snemanje in modeliranje. Za pokritje površine celotnega drevaka smo potrebovali 48 zajemov.

Snemanje je potekalo na dvorišču v Tehniškem muzeju Slovenije. S pri-

	Število zajemov	Snemanje	Modeliranje	Porabljen čas	Porabljen čas na zajem
Kipec 1	7	50	84,02	134,02	16,75
Kipec 2	5	16	82,11	98,11	16,35
Kipec 3	3	14	78,40	92,40	30,80
Kipec 5	2	8	36,72	44,72	22,36
Kipec 7	3	9	34,99	43,99	14,67
Kipec 8	6	38	141,08	179,01	29,85
Kipec 9	1	3	36,41	39,41	39,41
Kipec 10	2	6	49,74	55,74	18,58
Kipec 11	3	10	52,07	62,07	20,69
Kipec 12	2	5	30,07	35,07	17,53
Kipec 13	4	18	93,55	111,25	22,31
SKUPAJ	38	197	719,17	916,17	22,66

Tabela 7.1: Časovna analiza meritev (vsi časovni podatki so v minutah).

pravami smo začeli ob 8:30, s snemanjem pa ob 9:30. Po površini drevaka smo nalepili raznobarven plastelin, ki nam je pozneje pomagal pri modeliranju, saj smo samo na ta način lahko ločili različne zajeme. Z merilnikom Artec MHT (priloga A.1) smo posneli notranjost ter nato še levi in desni bok posebej. Ko smo končali z zgornjim delom drevaka, smo ga obrnili in posneli še dno.

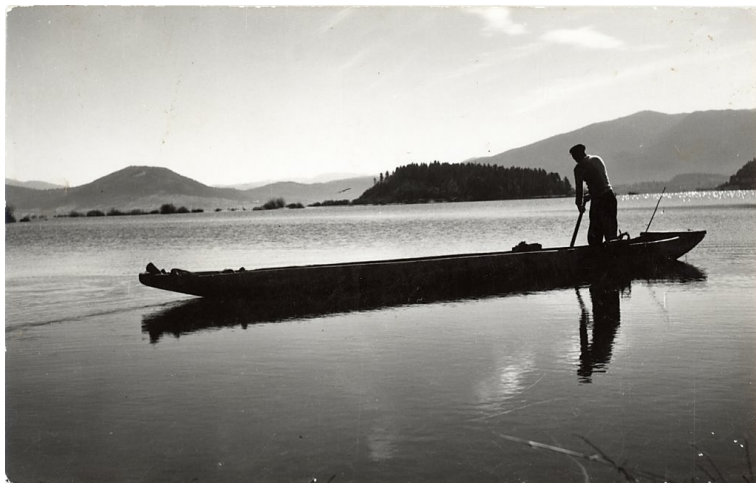
Zaradi velike časovne in prostorske kompleksnosti modeliranje še ni končano, smo pa že registrirali dno, kar lahko vidimo na sliki 7.2. V primeru, da bi pognali celovito registracijo (angl. global registration) dna drevaka, bi operacija zahtevala okoli 32 GB pomnilnika.

Eksperiment je pokazal, da lahko večji objekti povzročajo težave. V primeru, da imamo na voljo dovolj delovnega pomnilnika in procesorske moči, bi verjetno lahko velike objekte brez večjih težav uspešno modelirali.

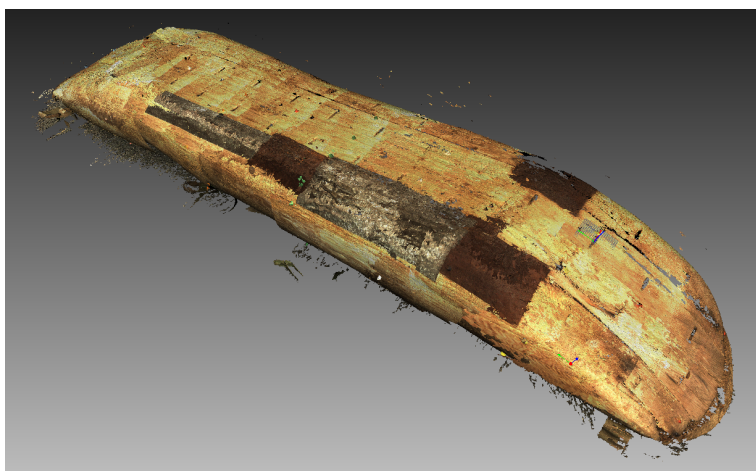
7.1.3 Spomenik Vratislavu Bedjaniču

Pred Fakulteto za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani je postavljenih več spomenikov. Za snemanje smo izbrali spomenik Vratislavu Bedjaniču, saj je bil najbolj dostopen z merilnikom in najbližji električnemu viru.

Vratislav Bedjanič [69] je bil redni profesor na Fakulteti za elektrotehni-



Slika 7.1: Drevak v uporabi. Vir: <http://stareslike.cerknica.org/2010/04/27/1960-jezero-drevak-razglednica/>



Slika 7.2: Ročno registrirano dno drevaka.



Slika 7.3: 3D model spomenika Vratislavu Bedjaniču (488160 oglišč, 971024 trikotnikov).

ko Univerze v Ljubljani. Bil je strokovnjak za električne stroje, elektrarne in zaščito elektroenergetskih naprav. Napisal je več strokovnih knjig ter strokovnih in znanstvenih člankov. Po njem je podjetje Iskra poimenovalo Bedjaničevo nagrado, ki se je podeljevala kot priznanje za najboljše doktorske disertacije, magistrska in diplomska dela na področju stikalne tehnike in avtomatizacije.

Predpriprava za snemanje je trajala eno uro, saj je bilo potrebno priskrbeti električni vir ter postaviti mize za snemanje višjih predelov. 3D snemanje je trajalo eno uro. Sproti smo preverjali pokritost površin v 3D modelu, za kar je bila potrebna sprotna ročna registracija zajemov. Posledično je modeliranje bilo hitro, 3D model v obliki triangulirane mreže smo dobili v enem dnevu. Rezultat je viden na sliki 7.3.

7.2 Primerjava tehnik 3D zajema podatkov

Spomenik Vratislavu Bedjaniču smo tudi fotografirali in posneli z napravo iPad 3. generacije, da bi s fotogrametrijo dobili 3D model. Fotogrametrija iz videoposnetka ni bila uspešna.



Slika 7.4: Rezultat fotogrametrije storitve hypr3d.

310 fotografij smo uredili (izločili neprimerne, obračali) in naložili na spletno storitev hypr3D (<http://www.hypr3d.com>). Spletna storitev je uporabila 41 fotografij, iz katerih je pridobila 3D model z 120714 točkami (slika 7.4). Če ga izvozimo v format OBJ, dobimo 100525 oglišč in 199979 trikotnikov.

Kljub velikemu številu slik, ki smo jih naložili, model ni popoln. Razlogov je lahko več, med njimi tudi slaba osvetlitev druge strani. Merilnik Artec MHT ni imel težav z osvetlitvijo. Če bi poskus ponovili v zaprtem prostoru, bi mogoče imeli drugačen rezultat. Prav tako je resolucija pridobljenega modela izjemno majhna, zato iz modela ne moremo pridobiti natančnih podatkov. Primerjavo velikosti lahko vidimo na sliki 7.5.

Področje fotogrametrije je v današnjem času zelo aktualno, zato lahko



Slika 7.5: Primerjava velikosti rezultata, pridobljenega z metodo fotogrametrije (svetlomoder model), in rezultata merilnika Artec MHT (rjav model).

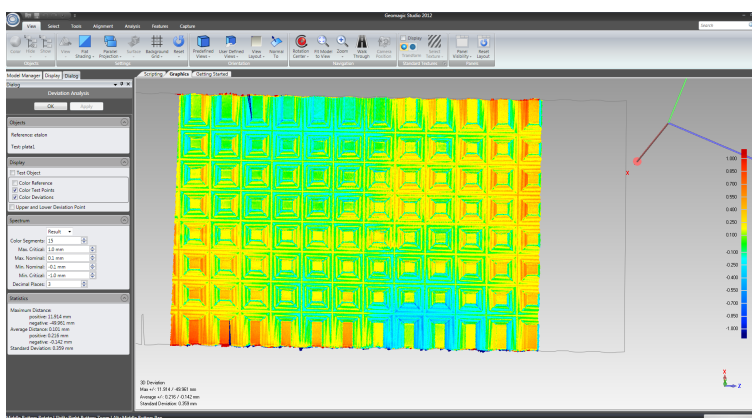
pričakujemo vedno boljše 3D izvedenotenje. Že brezplačna možnost fotogrametrije preko spletnih storitev je velik doprinos, obstajajo pa tudi komercialne rešitve, ki lahko dajejo boljše rezultate.

7.3 Analiza natančnosti merilnika Artec MHT

Na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani smo na Katedri za optodinamiko in lasersko tehniko preverjali natančnost merilnika Artec MHT. Z merilnikom smo posneli obliko znane površine in nato primerjali rezultat z idealnim modelom te iste površine.

Točkovna natančnost celotnega posnetega modela brez obrezovanja je 0,43 mm, natančnost posameznih globinskih slik pa je od 0,13 mm do 0,90 mm. Ker je natančnost višja na sredini modela (slika 7.6), smo obrezali robove in povečali natančnost od 0,10 mm do 0,20 mm (tabela B.4). Natančnost posameznih obrezanih slik je pod 0,1 mm (tabela B.5).

Posneta površina ni idealna za merilnik, saj ne vsebuje značilnih oblik, na katere bi se merilnik lahko oprijel, oblika površine pa je preveč enakomerna. V več poskusih snemanja je zato merilnik površino popačil in podaljšal. Zato



Slika 7.6: Standardna deviacija meritev celotnega modela. Svetlomodra barva pomeni standardno deviacijo okoli -0,25, zelena med -0,1 in 0,1, rumena pod 0,25, oranžna okoli 0,5, rdeča okoli 1. Avtor: Urban Pavlovčič.

smo najprej posneli okolico površine in jo nato obrezali ven med modeliranjem.

Dobljena natančnost merilnika izpolnjuje vsa pričakovanja. Napaka je dovolj majhna, da lahko rezultate uporabimo tako pri dokumentaciji kot tudi reprodukciji. Pri večjih objektih se napaka lahko povečuje, vendar v dopustnih mejah.

7.4 Primer virtualne gliptoteke

7.4.1 Opis aplikacije

Virtualno gliptoteko smo postavili na strežniški sistem Apache. Strežniška programska koda je napisana v jeziku PHP z ogrodjem CodeIgniter, pri odjemalcu pa se programska koda izvaja v programskem jeziku JavaScript (z uporabo knjižnic JQuery, JQuery UI in Three.js). Prikaz in videz upravljamo s tehnologijama HTML5 in CSS3 ter s pomočjo ogrodja YAML. Za podatke skrbi sistem za upravljanje podatkovne baze MySQL. Podrobnejši opis uporabljenih tehnologij lahko preberemo v prilogi A.

Datotečna struktura

Osnovni direktoriji aplikacije so:

- *app_data/* - vse programsko naložene datoteke (3D modeli, teksture, pdf, slike ...)
- *application/* - glavna logika aplikacije, podrejena ogrodju CodeIgniter
- *install/* - inštalacijske datoteke za postavitve osnovnega podatkovnega modela
- *static/* - statična vsebina aplikacije (datoteke JavaScript in CSS, knjižnice JQuery, JQuery UI, Three.js in YAML)
- *system/* - ogrodje Codeigniter

Struktura uporabniških zahtev

V spletnih aplikacijah uporabnik posreduje svoje zahteve z naslovi URL. V ogrodju CodeIgniter se naslovi URL direktno preslikajo v razrede in metode razredov (npr. zahtev *prikazi/o_gliptoteki* povzroči izvedbo razreda *Prikazi* in njegove metode *o_gliptoteki()*).

V virtualni gliptoteki uporabljamo naslednje razrede (kontrolerje) za interpretacijo zahtevkov:

- *Ajax* - interpretacija zahtevkov AJAX
- *Izvedi* - manipulacija uporabniške seje (prijava uporabnika, napredno iskanje), nalaganje datotek
- *Prenos* - prenašanje datotek iz direktorija app-data/
- *Prikazi* - izgradnja seznamov, prikaz statičnih vsebin (pomoč, o gliptoteki ...)
- *Sifranti* - delo s šifranti (uporabniki, avtorji, obdobja, kategorije, modeli)

Podatkovni model

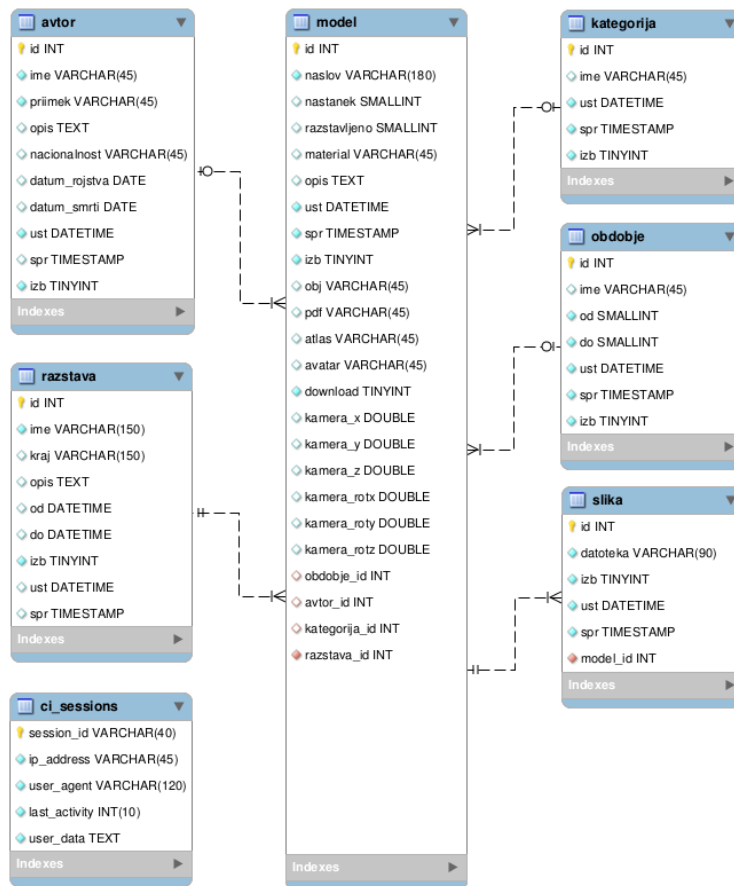
Podatkovni model lahko vidimo na sliki 7.7, opis atributov pa v prilogi C.1.

Uporabniške vloge

Aplikacija pozna 3 uporabniške vloge:

1. anonimen uporabnik (ogled avtorjev in modelov, iskanje)
2. urednik (ustvarjanje in urejanje modelov, avtorjev, obdobj in kategorij)
3. administrator (ustvarjanje in urejanje uporabnikov)

Pravice so strukturirane po slojih. To pomeni, da ima urednik poleg svojih pravic še vse pravice anonimnega uporabnika, administrator pa vse uredni-kove pravice.



Slika 7.7: Podatkovni model virtualne gliptoteke

Prikaz in manipulacija 3D podatkov

Za prikaz in manipulacijo 3D podatkov uporabljamo knjižnico Three.js. Za prikaz modela poženemo naslednja ukaza:

```
// inicializacija prikaza in nalozitev modela s teksturami
kas.three.load(lokacijaModela, lokacijaTekstur);
kas.three.animate(); // zagon animacije
```

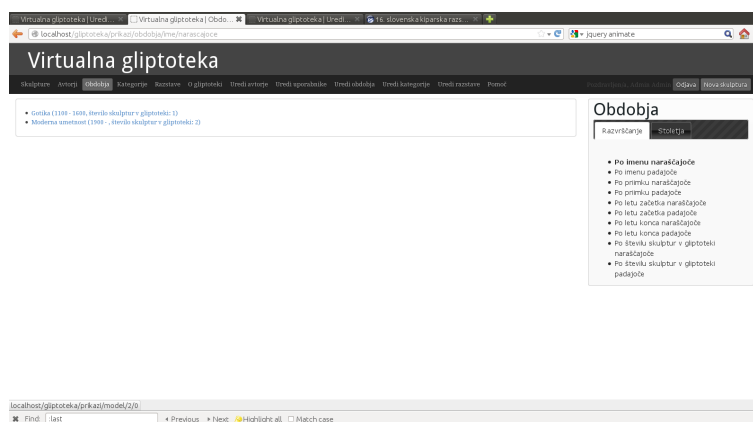
Funkcija *kas.three.load()* inicializira sceno, kamero, luč, kontrole za manipulacijo in prikazovalnik. V sceno naloži model v formatu OBJ in nanj veže teksture v obliki atlasa. Funkcija *kas.three.animate()* požene animacijo:

```
requestAnimationFrame(kas.three.animate);
if(kas.three.controls) kas.three.controls.update();
```

Z uporabo razreda *THREE.TrackballControls* po sceni premikamo kamero glede na gibanje miške, ki jo upravlja uporabnik. Z levim miškinim gumbom objekt rotiramo in z desnim ga premikamo po sceni. Z držanjem miškinega kolesčeka model približujemo ali oddaljujemo.

V aplikaciji je mogoče tudi posneti 3D model in uporabiti posneto sliko za prikaz v seznamih:

```
// pridobitev slike iz HTML elementa canvas
var slk = kas.three.renderer.domElement.toDataURL("image/png");
$.ajax({ // posredovanje slike strežniku
  url: kas.lib.url.url("ajax/model2avatar/" + mid),
  type: "POST",
  data: {
    slika: slk.replace(/^data:image\/(png|jpg);base64/, " ")
  },
  dataType: "text",
  complete: function(odg) {
    if(odg.status == 200) {
      var odgovor = JSON.parse(odg.responseText)
      kas.lib.kom.alert(odgovor.sporocilo);
    } else kas.lib.kom.alert("Napaka!");
  }
});
```



Slika 7.8: Seznam obdobj in manipulacija seznama.

7.4.2 Funkcionalnosti aplikacije

Virtualna gliptoteka je spletna aplikacija, zato si jo lahko ogledujemo s katerikoli brskalnikom, ki podpira vmesnik WebGL. Omogoča ogled in iskanje 3D modelov skulptur iz Zavoda za kiparstvo.

Uporabniški vmesnik sestoji iz glave, noge in dveh modulov (slika 7.8). V glavi strani je glavni meni, obrazec za prijavo pri anonimnih uporabnikih ter gumba za odjavo (*Odjava*) in ustvarjanje skulpture (*Nova skulptura*) za urednike in administratorje. Levi modul je namenjen za prikazovanje vsebine (to so lahko sezname, 3D model skulpture, itd.), desni pa za manipulacijo vsebine (dodatna navigacija, iskanje, urejanje). V primeru, da vsebina ne potrebuje dodatne manipulacije, se levi modul razširi čez celoten zaslon, desni pa izgine.

Navigacija

Vsak anonimen uporabnik vidi v glavnem meniju, ki je pod naslovom, naslednje povezave:

- Skulpture
- Avtorji

- Obdobja
- Kategorije
- Razstave
- O gliptoteki
- Pomoč

Uredniki vidijo štiri dodatne povezave v navigaciji:

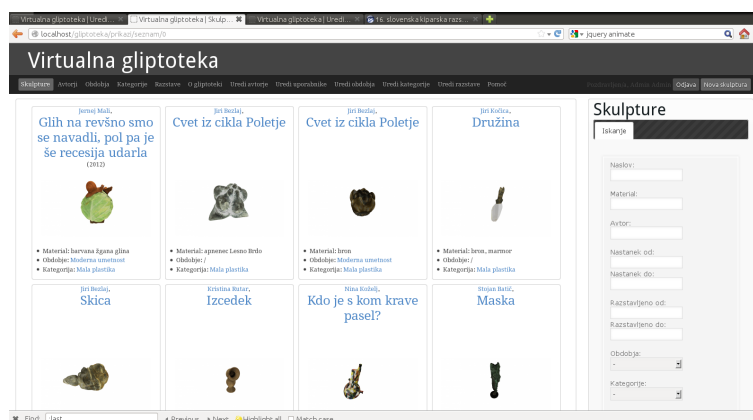
- Uredi avtorje
- Uredi obdobja
- Uredi kategorije
- Uredi razstave

Administratorju se v glavnem meniju pojavi še povezava *Uredi uporabnike*.

Seznam skulptur

Virtualna gliptoteka omogoča pregled vsebine skozi več seznamov. Osnovni seznam skulptur (slika 7.9) je dostopen s klikom na povezavo *Skulpture* v glavnem meniju. V obliki mreže se v levem modulu pojavijo skulpture s predstavitvenimi slikami in osnovnimi podatki. S klikom na naslov skulpture ali njegovo predstavitveno sličico se pojavi njegov 3D model, osnovne informacije in podatki o avtorju.

V desnem modulu lahko uporabljamo obrazec za iskanje. Iskanje poženemo tudi s klikom na kategorijo ali obdobje skulpture. Če želimo prikaz podatkov o avtorju, kliknemo na avtorjevo ime.



Slika 7.9: Seznam skulptur.

Ogled skulpture

Skulpturo vidimo v levem modulu (slika 7.10), kjer jo lahko z miško približujemo, oddaljujemo, premikamo in obračamo. V desnem modulu so nam na voljo podatki o skulpturi in podatki o avtorju. V primeru, da imamo uredniške ali administratorske pravice, vidimo tudi jeziček *Uredi* za urejanje.

Poleg ogleda lahko model prenesemo tudi na računalnik v formatu OBJ, če je funkcionalnost omogočena, in v formatu PDF, če je naložen.

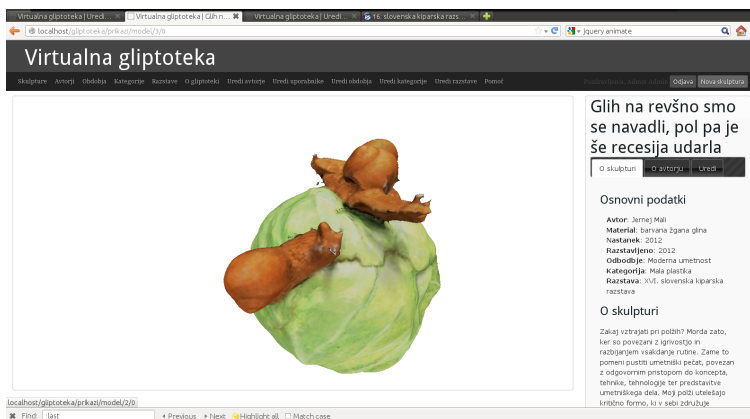
Ostali sezname

V aplikaciji si lahko ogledamo tudi seznam avtorjev, obdobij, kategorij in razstav. V vsakem od naštetih seznamov nas klik na element preusmeri na iskanje skulptur. V desnem modulu lahko izberemo preferenčen način razvrščanja ali pa si ogledamo okrnjen seznam glede na izbrano stoletje.

Uredniške funkcije

Naloga urednika v virtualni gliptoteki je vnašanje novih skulptur, urejanje in posodabljanje obstoječih ter vnašanje novih avtorjev, obdobij, kategorij in razstav.

Novo skulpturo lahko ustvarimo na katerikoli strani s klikom na gumb



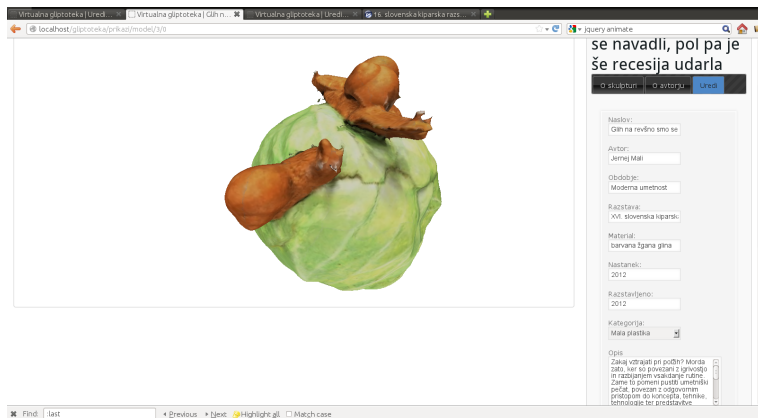
Slika 7.10: Ogljed skulpture.

Nova skulptura v zgornjem desnem kotu okna. Pojavi se nam dialog, v katerega vnesemo ime skulpture. Operacijo potrdimo s klikom na gumb *Ustvari*. Aplikacija nas preusmeri na stran za ogled skulpture (slika 7.11), kjer lahko nato v zavihku *Uredi* dopolnimo podatke o modelu. Model naložimo s pritiskom na gumb *Naloži OBJ*, njegove teksture pa s klikom na gumb *Naloži atlas tekstur*. V primeru, da nimamo na voljo 3D modela skulpture, lahko naložimo poljubno število fotografij (*Naloži sliko*). Te nadomestijo 3D model pri prikazu. Če se 3D model naknadno naloži, slik ni več mogoče pregledovati.

Poleg nalaganja modela in tekstur lahko naložimo tudi predstavitevno sliko (avatar) (*Naloži avatar*) in naložimo dokument PDF (*Naloži PDF*), posnamemo predstavitevno sliko (*Posnamo avatar*) ter shranimo približno pozicijo 3D modela (*Shrani približno pozicijo*). Vsi gumbi za delo s skulpturo so na dnu zavihka *Uredi*.

Administratorske funkcije

Administrator virtualne gliptoteke lahko opravlja vsa uredniška opravila, ima pa tudi nalogo vnašati in urejati uporabnike (urednike) v sistemu.



Slika 7.11: Urejanje skulpture.

Poglavje 8

Sklepne ugotovitve

V času, ko se poskuša digitalizirati čim več različnih vsebin, postaja aktualno tudi vprašanje kulturne dediščine. Skozi diplomsko delo smo spoznali možnosti digitalizacije od začetnega 3D snemanja do pridobitev, ki jih digitalizacija prinaša.

Rezultati so pokazali, da so 3D merilniki, kot je npr. Artec MHT, dovolj zmogljivi in natančni za namene dokumentiranja in reprodukcije. Na voljo imamo različne merilnike za različne namene, z njimi pa lahko 3D posnamemo izredno majhne, srednje velike in ogromne objekte, prav tako pa tudi zgradbe in večja območja (merilniki TOF). 3D merilniki so tudi cenovno vedno bolj dostopni, npr. Microsoft Kinect.

Ko imamo enkrat oblak točk, ga lahko pretvorimo v izbran matematični model. Poznamo površinske modele, ki so primerni za 3D prikazovanje in predstavitev, ter volumetrične, ki pa se uporabljajo predvsem za probleme umetne inteligence. Program Artec Studio omogoča enostavno pretvorbo oblaka točk v triangulirane mreže, ki zahtevajo veliko manj prostora v pomnilniku. 3D modele je mogoče tudi reproducirati. S sodobnimi tehnikami hitre izdelave prototipov lahko 3D modele neposredno 3D natisnemo.

Modele lahko nato kompresiramo in arhiviramo, poenostavljamo za prenos podatkov po omrežju ter avtorsko zaščitimo. Lahko jih vključimo v zbirko podatkov, kjer lahko iščemo po oblikah, izvajamo avtomatsko klasifikacijo

ipd. Zbirke podatkov lahko ponudijo zanimivo vsebino tudi za širšo publiko, npr. z virtualno gliptoteko. Z njenim osnutkom smo dokazali, da jo je mogoče s pomočjo sodobnih spletnih tehnologij tudi izdelati.

Literatura

- [1] “Experimentation of structured light and stereo vision for underwater 3d reconstruction,” *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, št. 66, zv. 4, str. 508–518, 2011.
- [2] P. Arias, J. Herráez, H. Lorenzo, and C. Ordóñez, “Control of structural problems in cultural heritage monuments using close-range photogrammetry and computer methods,” *Computers & Structures*, št. 83, zv. 21–22, str. 1754 – 1766, 2005. Dostopno na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045794905001094>
- [3] “Artec L,” Artec Group. Dostopno na: http://www.artec3d.com/3d_scanners/artec-l
- [4] “Artec MHT,” Artec Group. Dostopno na: http://www.artec3d.com/3d_scanners/artec-mht
- [5] F. Bernardini and H. Rushmeier, “The 3d model acquisition pipeline,” in *Computer Graphics Forum*, št. 21, zv. 2. Wiley Online Library, 2002, str. 149–172.
- [6] E. Berndt and J. Carlos, “Cultural heritage in the mature era of computer graphics,” *Computer Graphics and Applications, IEEE*, št. 20, zv. 1, str. 36–37, 2000.
- [7] I. Biederman, “Human image understanding: Recent research and a theory,” *Computer vision, Graphics, and image processing*, št. 32, zv. 1, str. 29–73, 1985.

-
- [8] F. Blais *et al.*, “Review of 20 years of range sensor development,” *Journal of Electronic Imaging*, št. 13, zv. 1, 2004.
- [9] W. Boehler and A. Marbs, “3d scanning and photogrammetry for heritage recording: a comparison,” *Proceedings of the 12th International Conference on Geoinformatics*, 2004, str. 291–298.
- [10] W. Böhler and G. Heinz, “Documentation, surveying, photogrammetry.”
- [11] Q. C. and G. Brice, “Salvage and the underwater cultural heritage,” *Marine Policy*, št. 20, zv. 4, str. 337–342, 1996.
- [12] A. Carrion, “Technology forecast on ink-jet head technology applications in rapid prototyping,” *Rapid Prototyping Journal*, št. 3, zv. 3, str. 99–115, 1997.
- [13] C. Chua, K. Leong, and C. Lim, *Rapid prototyping: principles and applications*. World Scientific Pub Co Inc, 2003.
- [14] P. Cignoni, C. Montani, and R. Scopigno, “A comparison of mesh simplification algorithms,” *Computers & Graphics*, št. 22, zv. 1, str. 37–54, 1998.
- [15] B. Feilden, “Conservation and tourism,” *Proceedings of the International Scientific Symposium, International Council on Monuments and Sites (ICOMOS) 10th General Assembly on Cultural Tourism, Colombo, Sri Lanka*, 1993, str. 37–41.
- [16] R. B. Fisher and K. Konolige, “Range sensors,” *Springer Handbook of Robotics*, B. Siciliano and O. Khatib, ured. Springer Berlin Heidelberg, 2008, str. 521–542. Dostopno na: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-30301-5_23
- [17] D. Forsyth and J. Ponce, *Computer vision: a modern approach*. Prentice Hall Professional Technical Reference, 2002.

- [18] A. Gaspari, "Minimalni standardi podvodnih arheoloških raziskav: izhodišča in smernice," Ministrstvo za kulturo RS, Projektna študija, 2010.
- [19] A. Gaspari and M. Erič, ured., *POTOPLJENA PRETEKLOST: arheologija vodnih okolij in raziskovanje podvodne kulturne dediščine v Sloveniji*. Didakta, 2012.
- [20] A. Grün, F. Remondino, and L. Zhang, "Photogrammetric reconstruction of the great buddha of bamiyan, afghanistan," *The Photogrammetric Record*, št. 19, zv. 107, str. 177–199, 2004. Dostopno na: <http://dx.doi.org/10.1111/j.0031-868X.2004.00278.x>
- [21] N. Haddad, "From ground surveying to 3d laser scanner: A review of techniques used for spatial documentation of historic sites," *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 2011.
- [22] N. Iyer, S. Jayanti, K. Lou, Y. Kalyanaraman, and K. Ramani, "Three-dimensional shape searching: state-of-the-art review and future trends," *Computer-Aided Design*, št. 37, zv. 5, str. 509–530, 2005.
- [23] A. Jaklič, A. Leonardis, and F. Solina, *Segmentation and recovery of superquadrics*. Springer, 2000, št. 20.
- [24] B. Jähne, H. Haußecker, and P. Geißler, ured., *Handbook of Computer Vision and Applications. Vol. 1 - Sensors and Imaging*. Academic Pr, 1999.
- [25] B. Jähne, H. Haußecker, and P. Geißler, ured., *Handbook of Computer Vision and Applications. Vol. 2 - Signal Processing and Pattern Recognition*. Academic Pr, 1999.
- [26] M. Kampel and R. Sablatnig, "Rule based system for archaeological pottery classification," *Pattern recognition letters*, št. 28, zv. 6, str. 740–747, 2007.

- [27] R. Kawai, A. Yamashita, and T. Kaneko, "Three-dimensional measurement of objects in water by using space encoding method," *Robotics and Automation, 2009. ICRA '09. IEEE International Conference on*. IEEE, 2009, str. 2830–2835.
- [28] K. Khoshelham and S. Elberink, "Accuracy and resolution of kinect depth data for indoor mapping applications," *Sensors*, št. 12, zv. 2, str. 1437–1454, 2012.
- [29] M. Klemenčič and M. L. Kiker, ured., *Robbov vodnjak: zgodba mestnega simbola*. Narodna galerija, 2010.
- [30] J. Kočica, S. Kokot, and A. Srakar, ured., *Gliptoteka: razvojna možnost kiparstva v Ljubljani*. Zavod za kiparstvo, 2007.
- [31] S. Lee and K. Kwon, "Robust 3d mesh model hashing based on feature object," *Digital Signal Processing*, 2012.
- [32] A. Levin, R. Fergus, F. Durand, and W. T. Freeman, "Image and depth from a conventional camera with a coded aperture," MIT, 2007.
- [33] U. Pavlovič, M. Jezeršek, A. Gorkič, H. Kosler, and J. Možina, "Izmera objektov kulturne dediščine z rotacijskim laserskim profilomerom," *Ventil*, št. 16, zv. 2, str. 146–151, 2010.
- [34] J. Peng, C. Kim, and C. Jay Kuo, "Technologies for 3d mesh compression: A survey," *Journal of Visual Communication and Image Representation*, št. 16, zv. 6, str. 688–733, 2005.
- [35] D. Pham and R. Gault, "A comparison of rapid prototyping technologies," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, št. 38, zv. 10-11, str. 1257–1287, 1998.
- [36] S. Philipp-Foliguet, M. Jordan, L. Najman, and J. Cousty, "Artwork 3d model database indexing and classification," *Pattern Recognition*, št. 44, zv. 3, str. 588–597, 2011.

-
- [37] M. Pieraccini, G. Guidi, and C. Atzeni, "3d digitizing of cultural heritage," *Journal of Cultural Heritage*, št. 2, zv. 1, str. 63–70, 2001.
- [38] F. Pozzi, "Comparison of 3d measurement techniques in cultural heritage application: user point of view," *3D Data Processing Visualization and Transmission, 2002. Proceedings. First International Symposium on*. IEEE, 2002, str. 762–765.
- [39] D. Prešeren, ured., *Vračanje izvornih podob: restavratorski posegi*, iz Dnevi evropske kulturne dediščine. Zavod za varstvo kulturne dediščine, 2004.
- [40] P. Roth and M. Winter, "Survey of appearance-based methods for object recognition," *Graz University of Technology, Tech. Rep. ICG-TR-01/08*, 2008.
- [41] G. Sansoni and F. Docchio, "3-D optical measurements in the field of cultural heritage: the case of the vittoria alata of Brescia," *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, št. 54, zv. 1, str. 359–368, 2005.
- [42] G. Sansoni, M. Trebeschi, and F. Docchio, "State-of-the-art and applications of 3d imaging sensors in industry, cultural heritage, medicine, and criminal investigation," *Sensors*, št. 9, zv. 1, str. 568–601, 2009.
- [43] R. Sebesta, *Programming the World Wide Web*. Pearson Addison Wesley, 2005.
- [44] J. Seidelin, *HTML5 Games: Creating Fun with HTML5, CSS3, and WebGL*. Wiley, 2011.
- [45] M. Shah, *FUNDAMENTALS OF COMPUTER VISION*, 1997.
- [46] L. Shapiro and G. Stockman, *Computer Vision*. Prentice Hall, 2001.
- [47] *Priručnik: muzejska konzervatorska in restavratorska dejavnost*, Skupnost muzejev Slovenije, 2011.

- [48] F. Solina, "Računalniški vid nekdanj in danes," *Proceedings of the conference ROSUS 2006 Maribor*, 2006, str. 3–12.
- [49] A. Sotler, "Izdelava kopij polihromirane plastike," Diplomaska naloga, Univerza v Ljubljani, Akademija za likovno umetnost, 1989.
- [50] R. Szeliski, *Computer vision: algorithms and applications*. Springer-Verlag New York Inc, 2010.
- [51] Ž. Stopinšek, *Priročnik za uporabo merilnika Artec MHT*, september 2012. Dostopno na: <http://eprints.fri.uni-lj.si/1800>
- [52] N. White, *Archaeology for dummies*. For Dummies, 2008.
- [53] A. Yamashita, S. Ikeda, and T. Kaneko, "3-d measurement of objects in unknown aquatic environments with a laser range finder," *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on*. IEEE, 2005, str. 3912–3917.
- [54] A. Yamashita, R. Kawanishi, T. Koketsu, T. Kaneko, and H. Asama, "Underwater sensing with omni-directional stereo camera," *Computer Vision Workshops (ICCV Workshops), 2011 IEEE International Conference on*. IEEE, 2011, str. 304–311.
- [55] X. Yan and P. Gu, "A review of rapid prototyping technologies and systems," *Computer-Aided Design*, št. 28, zv. 4, str. 307–318, 1996.
- [56] W.-B. Yang, M.-B. Chen, and Y.-N. Yen, "An application of digital point cloud to historic architecture in digital archives," *Advances in Engineering Software*, št. 42, zv. 9, str. 690–699, 2011. Dostopno na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965997811001128>
- [57] Q. Yue, "Studies on designs for sustainable development of cultural heritage protection and tourism from perspectives of new interactive and real 3d display technology," *Computational Intelligence and Design (ISCID), 2010 International Symposium on*, št. 1. IEEE, 2010, str. 140–143.

-
- [58] J. Zara and P. Slavík, "Cultural heritage presentation in virtual environment: Czech experience," *Database and Expert Systems Applications, 2003. Proceedings. 14th International Workshop on*. IEEE, 2003, str. 92–96.
- [59] "3D scanner." Dostopno na: http://en.wikipedia.org/wiki/3D_scanner
- [60] "3D/Animation." Dostopno na: http://www.adobe.com/devnet/flash/3d_animation.html
- [61] "Enlarging and reducing sculpture (3d pantograph)." Dostopno na: http://www.keropiansculpture.com/enlarging_machine.html
- [62] "Kaj je kulturna dediščina." Dostopno na: <http://www.zvkds.si/sl/varstvo-kulturne-dediscine/o-kulturni-dediscini/kaj-je-kulturna-dediscina/>
- [63] "KinectFusion project page." Dostopno na: <http://research.microsoft.com/en-us/projects/surfacerecon/>
- [64] "NextEngine 3D laser scanner." Dostopno na: <http://www.nextengine.com/products/scanner/specs>
- [65] "Pantograf." Dostopno na: <http://en.wikipedia.org/wiki/Pantograph>
- [66] "RIEGL USA." Dostopno na: <http://www.rieglusa.com/index.html/>
- [67] "Three.JS." Dostopno na: <http://mrdoob.github.com/three.js/>
- [68] "Voksel." Dostopno na: <http://en.wikipedia.org/wiki/Voxel>
- [69] "Vratislav Bedjanič." Dostopno na: http://sl.wikipedia.org/wiki/Vratislav_Bedjani%C4%8D

Priloge

Dodatek A

Uporabljena tehnologija

A.1 Merilnik Artec 3D MHT

Artec 3D MHT (slika A.1) je 3D merilnik, ki poleg 3D podatkov zajema tudi teksturo objekta. Deluje po principu bele svetlobe tako, da objekt osvetli z znanim vzorcem in na podlagi deformacije vzorca izračuna tridimenzionalno obliko objekta. Je hiter in zajema s hitrostjo do 15 okvirjev na sekundo.

Merilnik je primeren za objekte v velikosti človeške noge, vendar je z njim mogoče posneti tudi večje objekte.



Slika A.1: Merilnik Artec MHT. Vir: [4]

A.2 Javascript

Javascript je interpretiran programski jezik, ki se izvaja na strani odjemalca. Omogoča interaktivnost spletnih strani.

A.3 PHP

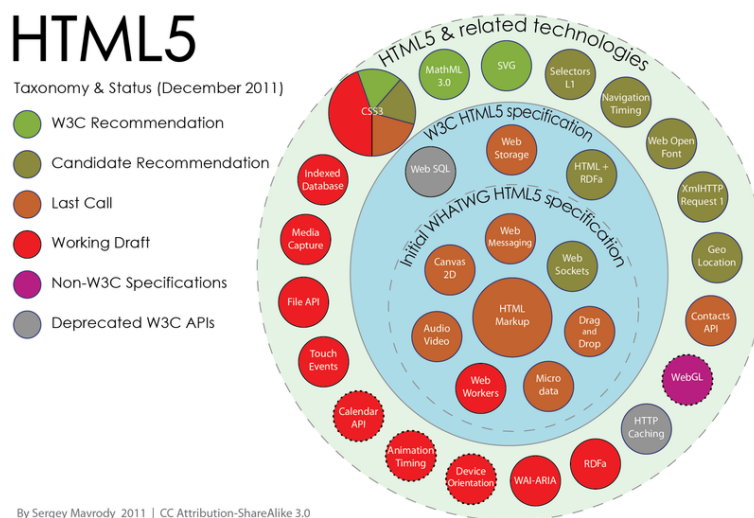
PHP (PHP Hypertext Preprocessor) je interpretiran programski jezik, ki se izvaja na strežniku. Je eden najbolj priljubljenih jezikov za spletno programiranje. Izhaja iz jezika PERL, vendar je objektno naravnan. Sintaksa je podobna programskemu jeziku C.

A.4 HTML5

Tehnologija HTML5 je nova različica standarda HTML, ki jo pripravljata konsorcija W3C in WHATWG [44] in je še vedno v izdelavi. Poleg uvajanja novih elementov in atributov za lažje in preglednejše programiranje, imajo pripravljene tudi elemente za standardizirano predvajanje glasbe in video-posnetkov. V ožjem okviru standarda se definira označevalni jezik HTML, v širšem okviru pa se standard povezuje z zanimivimi novimi tehnologijami. Pripravljajo se različni vmesniki za vektorsko in 3D grafiko, npr. WebGL in umerljiva vektorska grafika (angl. Scalable Vector Graphics, SVG) ter drugi standardi, npr. CSS3 za izgled spletne strani in MathGL za zapis matematičnih izrazov. Več o razvoju in taksonomiji lahko vidimo na sliki A.2.

A.5 CSS3

CSS3 je nova različica kaskadnih stilskih podlog (angl. Cascading Style Sheets, CSS), ki omogoča nove oblike dostopa do elementov HTML in nove oblike manipulacije zgloda.



Slika A.2: Razvoj in taksonomija standarda HTML5 decembra 2011. Vir: <http://en.wikipedia.org/wiki/HTML5>

A.6 Apache2

Apache2 je odprtokodna strežniška programska oprema, ki jo podpira The Apache Foundation. Je izjemno priljubljen strežniški sistem, saj je prilagodljiv (preko vrste konfiguracij in modulov) in podpira popularne programske jezike (PHP, Python, Perl ...).

A.7 MySQL

MySQL je sistem za uporabljanje podatkovnih baz. Implementira relacijsko podatkovno bazo, do katere dostopamo z jezikom SQL.

A.8 JQuery

JQuery je popularen vmesnik v programskem jeziku JavaScript, ki omogoča lažje in preglednejše programiranje, uporabne funkcije, večbrskalniško podporo in zanimive dodatke (npr. JQuery UI).

Primer uporabe vmesnika:

```
// Dostop do elementa
var elt1 = document.getElementById("iskanje").
    getElementsByClassName("ym-form")[0];
// Dostop do istega elemnta z uporabo vmesnika JQuery
var elt2 = $("#iskanje_ym-form")[0];
```

Dokumentacijo najdemo na naslovu <http://jquery.com/>.

A.9 JQuery UI

JQuery UI je knjižnica v jeziku JavaScript, ki dopolnjuje knjižnico JQuery z množico dodatkov, npr.:

- posebni efekti
- samo dokončevanje besed
- dialogi

Dokumentacijo najdemo na naslovu <http://jqueryui.com/>.

A.10 YAML

YAML je knjižnica v kaskadnem jeziku CSS, ki ponuja rešitve za pogoste oblikovalske naloge, npr. postavitev strani, oblikovanje obrazcev itd. Je podprta na vseh večjih brskalnikih in uporablja nove tehnologije HTML5 in CSS3. Omogoča uporabo tem. Dokumentacijo najdemo na naslovu <http://www.yaml.de/>.

A.11 Three.js

Three.js [67] je JavaScript knjižnica za enostavno delo s 3D modeli. Omogoča prikaz 3D modelov s platnom (element canvas v standardu HTML5), preko

SVG ali preko vmesnika WebGL. Vsebuje objekte in funkcije za manipulacijo scene in 3D modelov, enostavno nalaganje 3D modelov v različnih formatih (npr. OBJ, COLLADA), enostavno izdelavo iger ipd. Dokumentacijo najdemo na naslovu <http://mrdoob.github.com/three.js/docs/50/>.

A.12 CodeIgniter

CodeIgniter je ogrodje, napisano v jeziku PHP. Zgleduje se po vzorcu model-pogled-kontrolnik (angl. model-view-controller, MVC), kjer je strogo ločena programska logika za delo s podatki, delo s prikazom ter interpretacijo zahtev in usmerjanje. Vsebuje vrsto različnih knjižnic za hitro programiranje spletnih strani. Dokumentacijo najdemo na naslovu http://codeigniter.com/user_guide/.

A.13 Artec Studio

Artec 3D Studio verzije 8 je uradna priložena aplikacija poleg merilnika MHT. Omogoča zajemanje 3D podatkov z napravo, urejanje oblaka točk, ročno in avtomatsko poravnavo zajetih podatkov, registracijo zajetih podatkov, post-procesiranje, lepljenje tekstur in uvažanje v znane formate datotek.

Dodatek B

Tabele

	Trajanje (h)	Trajanje (dan)	Strošek (€)
Snemanje manjših kipov	25	4	250
Snemanje srednje velikih kipov	30	4	600
Snemanje velikih kipov	60	8	1800
Modeliranje manjših kipov	12.5	2	130
Modeliranje srednje velikih kipov	15	2	150
Modeliranje velikih kipov	20	3	200

Tabela B.1: Ocena trajanja in stroškov snemanja in modeliranja.

	Postavka (€/h)
Ura vsebinske ekipe	20
Ura snemanja	10
Ura modeliranja	10
Ura programiranja	10

Tabela B.2: Urne postavke za delo vsebinske ekipe, 3D snemanje, modeliranje in programiranje.

	Ocena
Število zajetih manjših kipov	50
Okviren čas snemanja manjšega kipa	30 min
Okviren čas modeliranja manjšega kipa	15 min
Število potrebnih oseb v snemalni ekipi za manjše kipe	1
Število zajetih srednje velikih kipov	30
Okviren čas snemanja srednje velikega kipa	60 min
Okviren čas modeliranja srednje velikega kipa	30 min
Število potrebnih oseb v snemalni ekipi za srednje velike kipe	2
Število zajetih velikih kipov	20
Okviren čas snemanja velikega kipa	180 min
Okviren čas modeliranja velikega kipa	60 min
Število potrebnih oseb v snemalni ekipi za velike kipe	3
Okvirna ocena števila ur programiranja	300
Okvirna ocena števila ur dela vsebinske ekipe	50
Število ur dela na dan	8
Število ljudi v vsebinski ekipi	3
Število ljudi za modeliranje	1
Število programerjev	4

Tabela B.3: Predpostavke pri projektu izvedbe virtualne gliptoteke.

	Standardna deviacija (mm)
Model 1	0,21559
Model 2	0,09407
Model 3	0.10451

Tabela B.4: Odstopanja v obrezanih celotnih meritvah.

	Standardna deviacija (mm)
Slika 1	0,077257
Slika 2	0,064927
Slika 3	0,056316
Slika 4	0,029410
Slika 5	0,036016
Slika 6	0,082910
Slika 7	0,054753
Slika 8	0,058218
Slika 9	0,080548

Tabela B.5: Odstopanja v posameznih obrezanih globinskih slikah.

Dodatek C

Virtualna gliptoteka

C.1 Podatkovni model

Tabele *avtor*, *kategorija*, *model*, *obdobje*, *razstava* in *slika* imajo štiri osnovne attribute:

- *id* - identifikacijska številka vrstice v tabeli
- *ust* - datum in ura vnosa v tabelo
- *spr* - datum in ura zadnje spremembe
- *izb* - ali je vnos izbrisan

Tabela *ci_sessions* je tabela za upravljanje z brskalniškimi sejami in je pomembna za potrebe ogrodja CodeIgniter.

Specifični atributi tabele *avtor* so:

- *ime*
- *priimek*
- *opis* - avtorjeva biografija ipd.
- *nacionalnost*

- *datum_rojstva* - datum rojstva
- *datum_smrti* - datum smrti

Specifični atributi tabele *kategorija* so:

- *ime* - ime kategorije

Specifični atributi tabele *model* so:

- *naslov* - naslov dela
- *nastanek* - leto nastanka dela
- *razstavljeno* - leto prve predstavitve v javnosti
- *material* - uporabljen material
- *opis* - opis dela
- *obj* - ime datoteke v formatu OBJ
- *pdf* - ime datoteke v formatu PDF
- *atlas* - ime datoteke, v kateri so teksture modela v formatu OBJ
- *avatar* - ime datoteke, v kateri je predstavljena slika (avatar) modela
- *download* - ali je mogoč prenos modela v formatu OBJ
- *kamera_x*, *kamera_y*, *kamera_z* - pozicija kamere v sceni
- *kamera_rotx*, *kamera_roty*, *kamera_rotz* - rotacija kamere v sceni
- *obdobje_id*, *avtor_id*, *kategorija_id*, *razstava_id* - tuji ključi

Specifični atributi tabele *obdobje* so:

- *ime* - naziv obdobja
- *od* - približno leto pričetka obdobja

- *do* - približno leto konca obdobja

Specifični atributi tabele *razstava* so:

- *ime* - ime razstave
- *kraj* - lokacija razstave
- *opis* - opis razstave
- *od* - datum začetka
- *do* - datum konca

Specifični atributi tabele *slika* so:

- *datoteka* - ime datoteke, v kateri je slika
- *model_id* - tuji ključ