

# UPORABA RAČUNALNIŠKEGA VIDA PRI ANALIZI UMETNIŠKIH DEL

seminarska naloga pri predmetu  
VIZUALNE INFORMACIJE V  
INFORMACIJSKIH SISTEMIH

**Avtor:** Peter Peer

**Mentor:** prof. dr. Aleš Leonardis

V Ljubljani, 20.12.2000

# Kazalo

<b>Povzetek</b>	<b>3</b>
<b>1 Uvod</b>	<b>4</b>
1.1 Analiziranje umetniških del s pomočjo 2D in 3D metod računalniškega vida . . . . .	4
1.2 Organizacija seminarske naloge . . . . .	6
<b>2 Analiziranje miniaturnih portretov</b>	<b>6</b>
<b>3 Projekt Michelangelo</b>	<b>11</b>
<b>4 Zaključek</b>	<b>16</b>
<b>A Analiziranje miniaturnih portretov - implementacija</b>	<b>18</b>
A.1 Osnova za iskanje potez . . . . .	18
A.2 3D interpretacija najdenih potez . . . . .	19
<b>Literatura</b>	<b>21</b>

## Slike

1	Miniaturni portret . . . . .	6
2	Postopek analiziranja miniaturnih portretov [17] . . . . .	8
3	a) shema glave, b) prileganje elips, c) zanimive regije . . . . .	9
4	Matematični model obraza . . . . .	10
5	Skeniranje Davida . . . . .	12
6	Rezultat metode Pol-linearni detektor vertikalnih linijskih sledi	19
7	Primer najdenih potez . . . . .	20
8	Rezultat 3D interpretacije najdenih potez . . . . .	20

## Povzetek

V seminarski nalogi so predstavljene 2D in 3D metode računalniškega vida, ki tako ali drugače pomagajo pri postopku analize umetniških del.

Predstavljena je polavtomatska metoda analiziranja miniaturnih portretov, ki so jo razvili na TU Wien [11, 16, 17, 18]. Metoda je zasnovana kot orodje za pomoč umetnostnim zgodovinarjem pri klasifikaciji miniaturnih portretov. Sistem izkorišča dejstvo, da vsak umetnik s potezami čopiča na sliki pusti nekakšen osebni podpis. Avtorji želijo tako s pomočjo metod računalniškega vida vzpostavimo mnenje o stilu avtorjev. Tako bi lahko klasificirali nepodpisana dela in odkrili ponaredbe. (V dodatku A je opisana implementacija algoritma za iskanje potez, ki predstavlja temelj za iskanje potez v sistemu za analiziranje miniaturnih portretov.)

V drugem delu seminarske naloge je predstavljen Projekt Michelangelo [12, 20], katerega tehnični cilj je predvsem rekonstrukcija velikih kipov; doseči natančnost, ki ustreza analizi uporabljenega orodja in ustvariti realen model, torej zajeti odbojnost materiala. Njihov sistem vsebuje globinski skener, ki deluje na osnovi laserske triangulacije, globinski skener, ki deluje na osnovi časa vrnitve (ang. *time-of-flight*), digitalne kamere za zajemanje slik in programsko opremo za zajemanje, poravnavo, spajanje in pregled zajetih podatkov in ustvarjenih modelov.

# 1 Uvod

Pod pojmom analiza umetniških del razumemo iskanje značilnosti umetniškega dela, na podlagi katerih lahko sklepamo o lastnostih tega umetniškega dela. Cilj postopkov analize umetniških del je zelo raznovrsten: določanje letnice nastanka, izvor materiala, določanje avtorja, določanje stila avtorja, določanje načina dela avtorja, določanje uporabljenega orodja, določanje restavracijskega procesa, itd. Z novo tehnologijo ti postopki postajo vedno bolj točni, želje pa so usmerjene v (vsaj delno) avtomatizacijo postopkov. In tukaj nastopi računalniški vid. Kot stranski učinek pa se je ciljem dodala tudi (3D) digitalna rekonstrukcija. Analiza umetniških del in digitalna rekonstrukcija sta res dva različna cilja, a danes je eden izmed ciljev digitalne rekonstrukcije tudi izdelati modele, ki lahko služijo kot osnova analizi umetniških del. Razlogov za analiziranje umetniških del na osnovi digitalne rekonstrukcije je več, a najpomembnejša sta:

- originalno umetniško delo je predragoceno in preobčutljivo za željeno analiziranje, tako da lastniki ne dovolijo potrebnega fizičnega kontakta z delom in
- digitalna rekonstrukcija je načeloma dosegljiva kjerkoli in komurkoli.

V seminarski nalogi so predstavljene 2D in 3D metode računalniškega vida, ki tako ali drugače pomagajo pri postopku analize umetniških del.

## 1.1 Analiziranje umetniških del s pomočjo 2D in 3D metod računalniškega vida

Velikokrat se zgodi, da določena umetniška dela niso podpisana, torej avtor ni znan. Težko je tudi reči, ali gre za original ali ponaredek. V ta namen analize del se uporablja več tehničnih metod, s pomočjo katerih umetnostni zgodovinarji določijo starost del, ohranjenost del in izvor uporabljenih materialov. Pri analizi slik se uporabljajo metode kot so:

- analiza z X-žarki
- analiza z infra-rdečimi žarki
- digitalna radiografija
- računalniška tomografija
- analiza barv
- itd.

Vse te metode pa ne povedo nič o osebnem stilu avtorja dela, torej ne delajo relacije med lastnostmi dela in umetnikom.

Na podlagi dejstva, da vsak umetnik s potezami čopiča na sliki pusti nekakšen osebni podpis, pa lahko s pomočjo metod računalniškega vida postavimo tudi mnenje o stilu avtorjev. Tako lahko klasificiramo nepodpisana dela in odkrijemo ponaredbe.

V nadaljevanju si bomo zato ogledali **polavtomatsko** metodo analiziranja miniaturnih portretov, ki so jo razvili na TU Wien [11, 16, 17, 18]. Metoda je zasnovana kot orodje za pomoč umetnostnim zgodovinarjem pri klasifikaciji miniaturnih portretov. Zanimivo pri tem delu je, da kljub cilju določitve avtorja miniaturnega portreta v literaturi nisem našel skoraj nič o prizadevanjih avtorjev o dejanski avtomatski klasifikaciji na podlagi najdenih lastnosti procesiranih miniaturnih portretov. Tako tudi ni na voljo podatek o klasifikacijski točnosti sistema, ki bi operiral s tako dobljenimi podatki. Izpostavljeno je zgolj dejstvo, da razviti sistem pomaga umetnostnim zgodovinarjem pri klasifikaciji.

Tukaj pridejo do izraza predvsem postopki 2D računalniškega vida, čeprav avtorji že načrtujejo uporabo 3D modela človeške glave<sup>1</sup>, s pomočjo katerega naj bi izboljšali rezultate sistema. 2D postopki pridejo do izraza tudi pri opisovanju stila avtorja. Takšen primer je na primer opisovanje umetniških kompozicij z oblikovnimi slovniciami [8, 10]. Izločanje oblikovnih pravil slovnice zahteva mnogo znanja, predpostavk in izkušenj, umetniška dela pa so navadno preveč bogata in raznolika, da bi dovoljevala samodejno odkrivanje zgradbe umetniške kompozicije. A veljalo bi poskusiti — mogoče bi za začetek poskušali sestaviti sistem, ki bi samodejno ali vsaj interaktivno odkrival zgradbo enostavnih umetniških kompozicij (veliko pravilnih likov znotraj slike, uniformne barve segmentov, ipd.), na primer mešanih kolažev priznanega sodobnega slovenskega umetnika Lojzeta Spacala. Naslednji način opisovanja umetniške kompozicije bi lahko temeljil na pravilu zlatega reza [5].

3D postopki pa pridejo do izraza pri analizi kipov in zgradb. Cilj teh postopkov je seveda najprej rekonstrukcija, ko pa imamo enkrat rekonstrukcijo narejeno, pa lahko svoje moči osredotočimo na analizo tega modela in se tako izognemo neposrednemu kontaktu z umetniškim delom, ki je največkrat tako ali tako prepovedan. Eden izmed zelo popularnih projektov, ki se ukvarja z rekonstrukcijo, je t.i. Projekt Michelangelo [12, 20], katerega tehnični cilj je predvsem rekonstrukcija velikih kipov; doseči natančnost, ki ustreza analizi uporabljenega orodja in ustvariti realen model, torej zajeti odbojnost materiala. Tudi o tem si bomo več pogledali v nadaljevanju.

---

<sup>1</sup>To informacijo sem našel v poročilih o sestankih avtorjev:  
<http://www.prip.tuwien.ac.at/Research/ArtHistory/News.html/>,  
povezava *Meeting protocols*.

## 1.2 Organizacija seminarske naloge

V naslednjem poglavju je opisan postopek analiziranja miniaturnih portretov [11, 16, 17, 18], ki temelji na 2D metodah računalniškega vida. V poglavju 3 je opisan postopek 3D digitalne rekonstrukcije projekta Michelangelo [12, 20]. Sledi zaključek. V dodatku A je opisana implementacija algoritma za iskanje potez, ki predstavlja temelj za iskanje potez v sistemu za analiziranje miniaturnih portretov.

## 2 Analiziranje miniaturnih portretov

Avstrijska kraljeva družina je imela preko 600 miniaturnih portretov (slika 1) članov družine, ki so živeli v drugih državah. Ti portreti so bili povprečno veliki  $8 \times 6$  cm in so imeli podobne lastnosti, kot današnje identifikacijske fotografije (fotografije na osebnih izkaznicah). V primeru teh slik, ki so narejene v akvarelni tehniki z uporabo točkastih in linijskih potez, človeku ni težko razbrati določenih fizičnih (mehaničnih) lastnosti: barvni odtenki, dolžina potez, kot potez, relacija med potezami, ipd. Vhodna slika v sistem [11, 16, 17, 18] zajema le obraz celotnega portreta, saj se tam skriva bistvena informacija o lastnostih avtorja. Ta je velika  $572 \times 768$  slikovnih elementov.



Slika 1: Miniaturni portret

Analizo portreta, na podlagi katere vzpostavimo relacijo med avtorjem in umetniškim delom, lahko razdelimo v štiri hierarhične klasifikacijske korake:

1. klasifikacija portreta na podlagi uporabljenih barv
2. klasifikacija portreta na podlagi oblike zanimivih regij portreta (na primer oči)
3. klasifikacija portreta na podlagi potez in
4. določitev avtorja (možnih avtorjev).

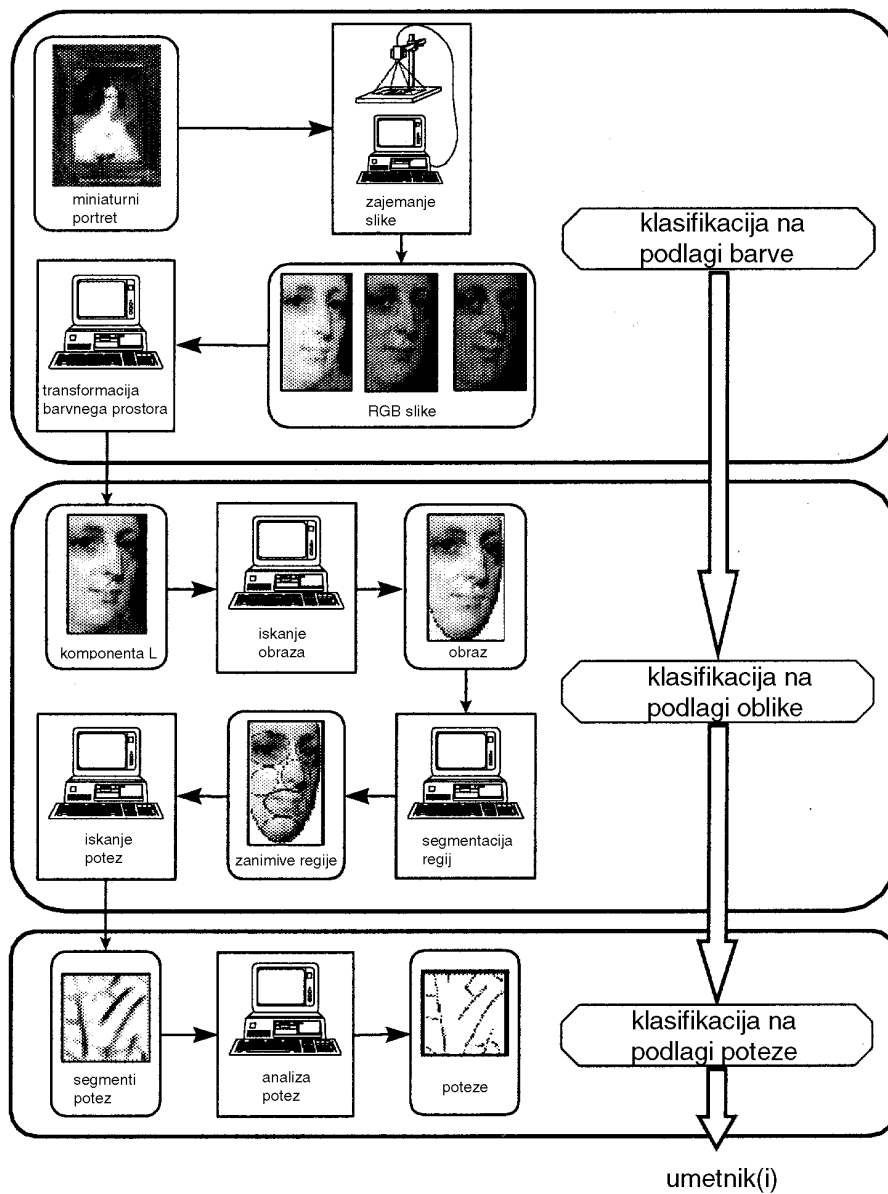
Ta globalni model tipa od zgoraj navzdol (ang. *top-down*) je znotraj posameznega koraka razširjen z modelom tipa od spodaj navzgor (ang. *bottom-up*).

Iz slike 2 so razvidni posamezni koraki znotraj omenjenega hierarhičnega modela, katerega končni cilj je zelo zmanjšati število možnih avtorjev umetniškega dela:

1. **Zajemanje slik:** Ker je barvna informacija zelo pomembna, je le ta zakodirana s 24. biti (*true color* : barvni prostor RGB –  $3 \times 8$  bitov). Temu primerna mora biti seveda tudi strojna oprema, s pomočjo katere zajemamo slike: kamera CCD in digitalizator. V času zajemanja je osvetlitev konstantna.
2. **Klasifikacija na podlagi barve:** Umetnostni zgodovinarji klasificirajo avtorje (tudi) na osnovi uporabljenih barv oziroma t.i. barvnega tona. To informacijo izrabijo pri prvem koraku grobe, a avtomatske klasifikacije: izračunajo povprečno vrednost RGB obraza.
3. **Transformacija barvnega prostora:** S tem korakom zagotovijo takšen vhod v nadaljni postopek, ki omogoča hitro iskanje značilke slike oziroma obraza. Ker je procesiranje barvne slike časovno preveč potratno, hkrati pa ne obstaja toliko metod, ki omogočajo iskanje značilke na podlagi barv, izvršijo transformacijo barvne slike v sivinsko sliko. Ker pa pri transformaciji zahtevamo, da ne izgubimo preveč informacije, posebej tiste, ki se odraža v potezah avtorjev umetniških del, se izvrši transformacija iz barvnega prostora RGB v barvni prostor HLS<sup>2</sup>. Kanal L (*lightness*) namreč zagotavlja ohranitev informacije (intenzitetna vrednost barvne slike), ki je pomembna za iskanje potez.
4. **Označitev obraza:** Ker se pomembne specifične informacije o avtorju nahajajo v območju obraza, se najprej izvrši segmentacija obraza od ozadja. Motiva za segmentacijo sta dva: zmanjšanje časovne kompleksnosti in postavitve temeljev za iskanje t.i. zanimivih regij (na primer oči, nosa in ust). Ta segmentacija je veliko lažja od standardnih metod iskanja obrazov, saj avtor ustvarja obraze na podlagi standardnega modela obraza. Avtorji namreč uporabljajo shemo, ki so se jo naučili med pridobivanjem prakse o risanju obrazov. To še posebej velja za miniaturne portrete, kjer je stil risanja bolj shematičen kot realen. Avtorji miniaturnih portretov uporabljajo eliptično shemo (slika 3a), ki določa obliko in orientacijo glave, lokacijo oči, nosa, ličnic, itd.

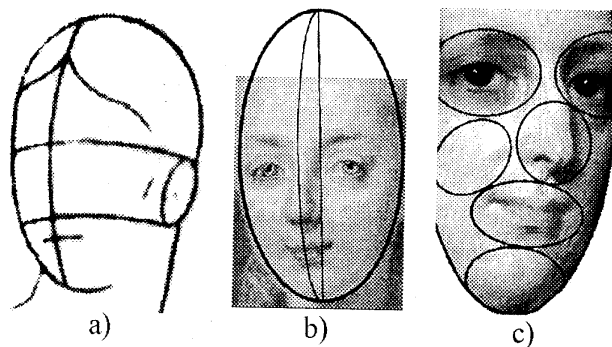
---

<sup>2</sup>Bralec si lahko postopek transformacije ogleda na naslovu svetovnega spleta:  
[http://www.robo.mein.nagoya-u.ac.jp/~niimi/color-space/COL\\_26.htm](http://www.robo.mein.nagoya-u.ac.jp/~niimi/color-space/COL_26.htm) ali  
<http://chromecow.electrondreams.com/LLab/ColorSpaceConversion.htm>,  
lahko pa pogleda tudi v [7].



Slika 2: Postopek analiziranja miniaturnih portretov [17]





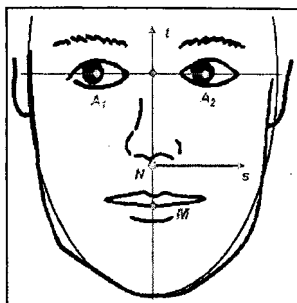
Slika 3: a) shema glave, b) prileganje elips, c) zanimive regije

Njihov pristop predvideva, da lahko glavo opišejo z elipsoidom, katerega glavna os je vzporedna s slikovno ravnino. Projekcija elipsoida na slikovno ravnino nam da elipso – konturo obraza, ki je invariantna glede na rotacijo elipsoida okoli glavne osi. Z drugo elipso opišejo presek elipsoida s t.i. ravnino simetrije obraza – gre za elipso, ki leži v smeri nosa. Obe elipsi nastavijo ročno tako, da določijo goriščni točki [2] (str. 234) in točko, ki leži na elipsi [13]. Druga elipsa si deli glavno os s prvo, njena manjša os pa je orientirana glede na orientacijo obraza. Na sliki 3b lahko vidimo elipso konture obraza, elipso simetrije in glavno os elipsoida.

5. **Segmentacija regij:** Ker se struktura poteze razlikuje na posameznih področjih obraza, se v nadaljnjem koraku izvrši segmentacija obrazne elipse na zanimive regije. Struktura potez se na primer močno razlikuje pri primerjavi regije oči z regijo ličnice. Temu botrujeta predvsem razliki v obliki in osvetlitvi. Pri segmentaciji izhajajo iz elipse obraza in elipse simetrije. Informacijo o rotaciji elipse obraza uporabijo za določitev eliptičnih regij oči, nosa, ust, brade in ličnic (slika 3c).
6. **Klasifikacija na podlagi oblike:** Segmentacija obraza sedaj omogoča primerjanje portretov na osnovi regija z regijo. Avtorji portretov imajo shematičen pristop k modeliranju podrobnosti obraza. Na primer nekateri avtorji rišejo oči kroglaste oblike, drugi spet eliptične oblike. To dejstvo uporabljajo pri klasifikaciji portretov glede na obliko regij.
7. **Iskanje potez in njihova analiza:** En način segmentacije potez je vsekakor uporaba standardnih postopkov iskanja robov. Vendar ti ne dajejo željenega rezultata, zato pri iskanju potez uporabljajo model poteze. Ta je določen z dolžino, širino, ukrivljenostjo, itd. Rezultat iskanja potez je množica slik delov potez, najdenih v različnih ori-

entacijah. Ti deli so združeni v celotne poteze na podlagi podobnosti ukrivljenosti in orientacije sosednjih delov potez. (Dodatek A.)

8. **Klasifikacija potez:** Poteze lahko razdelimo na dve množici: takšne, ki so odvisne od avtorja (lastnosti avtorjeve “pisave”) in takšne, ki niso odvisne od njega, torej takšne, ki so del splošnega delovnega procesa (lastnosti zaradi dane osvetlitve, oblike in 3D vtisa obraza). Odgovor na vprašanje : “Ali je lokalna struktura potez odraz individualnih lastnosti avtorja ali delovnega procesa?”, iščejo v analizi najdenih potez. V ta namen uporabljajo matematični referenčni model človeškega obraza (slika 4), ki je povezan z informacijo vsebovano v miniaturnem portretu<sup>3</sup>. Referenčni model ima podobne lastnosti kot



Slika 4: Matematični model obraza

model, ki se uporablja pri razpoznavanju obrazov [9] in se ga da transformirati, če je to potrebno. Tako je na primer možno primerjati tudi regijo človeškega lica enega portreta z regijo človeškega lica drugega portreta, pa čeprav je na enem portretu oseba v frontalnem položaju, na drugem pa ni. Ta matematični referenčni model služi kot osnova za model individualnih lastnosti avtorja, ki je predstavljen z množico parametrov: množica uporabljenih barv, oblika oči, povprečna dolžina potez, širina potez, ukrivljenost potez, itd. Tako je avtorju pripisana množica karakterističnih parametrov, ki jih primerjajo med seboj z različnimi merami podobnosti.

Čeprav je podan dokaj grob opis delovanja sistema, je njegova kompleksnost očitna. Narava vhodnih podatkov je 2D, kar opravičuje rabo 2D metod računalniškega vida.

Pri zajemanju slike realnega sveta vedno izgubimo pomembno informacijo — tretjo dimenzijo in tako je raba 2D metod računalniškega vida

<sup>3</sup>Na sliki 4 so predstavljene štiri karakteristične točke obraza v parametričnem prostoru  $(s, t) \in S \times T$ : N — nos, M — usta,  $A_1$  — desno oko in  $A_2$  — levo oko, ki so geometrijsko povezane s korespondenčnimi točkami v 3D koordinatnem sistemu preko homomorfne transformacije:  $\varphi(s, t) = (x(s, t), y(s, t), z(s, t))$  [16].

upravičena. Dejstvo je tudi, da so 2D metode potrebne kot predprocesiranje vhodnih podatkov za marsikatere 3D metode. Kot dokaz te trditve si oglejmo knjigo avtorjev E. Trucco, A. Verri, z naslovom *Introductory techniques for 3-D computer vision* (Uvod v 3D računalniški vid) [19], v kateri je opisanih veliko 2D metod, pa čeprav, kot je razvidno iz naslova knjige, knjiga govori o 3D metodah.

2D metode torej predstavljajo pomembno znanje tudi za prihodnost.

### 3 Projekt Michelangelo

Sam projekt v trenutni fazi nima toliko opraviti z analizo umetniških del, temveč s kar se da natančno rekonstrukcijo [12, 20], ki pa je osnova za analizo. Zato je prav, da si ogleđamo uporabljene metode računalniškega vida, s pomočjo katerih avtorji sistema zgradijo rekonstrukcijo, ki omogoča analiziranje.

Njihov sistem vsebuje globinski skener, ki deluje na osnovi laserske triangulacije, globinski skener, ki deluje na osnovi časa vrnitve (ang. *time-of-flight*), digitalne kamere za zajemne slike in programsko opremo za zajemanje, poravnavo, spajanje in pregled zajetih podatkov in ustvarjenih modelov. S sistemom želijo digitalizirati obliko in barvo velikih objektov pod standardnimi, zunanjimi, torej nelaboratorijskimi pogoji. Za občutek velikosti naj navedem podatek, da je največji kip, ki so ga skenirali, Michelangelov David (slika 5), ki je visok 517 cm, model pa vsebuje 2 milijardi poligonov in 7000 barvnih slik. Pri tem so uporabili dinamičen obseg velikosti 20.000:1, kar sicer ni veliko za računalniški model, je pa ogromno za velikost modela. Iz podanega obsega sledi, da se dinamično spreminja ločljivost (torej tudi napaka pri oceni globine) glede na velikost objekta: tako je na primer pri velikosti objekta 5 m dosežena ločljivost 0.25 mm, pri velikosti objekta 10 m je dosežena ločljivost 0.5 mm in pri velikosti 1 m je dosežena ločljivost 0.05 mm. Tako so dosegli ločljivost 0.25 mm, kar je dovolj, da se na modelu odražajo sledi uporabljenega orodja, kar nam lahko v fazi analize pove način dela umetnika. Na podlagi zajetih barvnih slik so izračunali odbojnost vsake površinske točke kipa. S tem naj bi zagotovili pravilno osvetlitev modela ob upodabljanju. Ta informacija je zelo pomembna tudi za analizo. Na primer za kip Davida velja, da je prekrit z različnimi materiali, ki so jih uporabljali pri restavracijah. Ta informacija nam lahko veliko pove o zgodovini kipa in potrebnih nadaljnjih korakih restavracije, zato so kip skenirali ob beli in ultraviolečni osvetlitvi. Nedokončani kipi pa nam lahko podajo drugačno informacijo. Ker so spodnji deli sledi orodja na kipu svetlejši od okolice, kar je posledica lomljenja kristalov marmorja, bi mogoče lahko z analizo razbrali informacijo o načinu dela avtorja: kako je držal orodje in kako močno je udarjal.

Na kratko si oglejmo celoten postopek gradnje oziroma delovanja sis-



Slika 5: Skeniranje Davida

tema:

- **Načrtovanje skenerja.** Dva glavna strojna dela sistema sta skener z lasersko triangulacijo in velik pomični oder. Cilji sistema so bili zahtevni: ločljivost manjša od milimetra, zajemanje iz varne razdalje (za kip) in doseči vrh kipa David. Tukaj so morali rešiti naslednje probleme:
  - Ločljivost glede na vidno območje, jasnost potez z orodjem in velikost dobljenih podatkov: večja je ločljivost, manjše je vidno območje, velikost podatkov pa naraste preko obvladujočih meja, pri manjši ločljivosti pa so poteze zbrisane.
  - Odmik (skenerja od kipa) glede na bazno črto laserja: zaradi lastnosti laserja, da ohranja raven žarek na velikih razdaljah, so imeli dokaj proste roke pri začetnih nastavitvah odmika, vendar pa je večji odklon botroval tudi daljši bazni črti, to pa pomeni povečanje učinka napake kalibracije in vibracij pomičnega odra.
  - Problem zaradi optičnih lastnosti marmorja: čeprav je marmor rahlo barvan in navadno difuzen, je njegova sestava problematična, saj vsebuje gosto razporejene transparentne kristale, ki povzročijo,

da se laserski žarek ne odbije od površine, pač pa pride do pod-površinskega raztresa žarka. Materiali, uporabljeni pri restavraciji, in nepolirani kipi omilijo ta problem, ki botruje napaki v odčitavanju globine.

- Odmik pri zajemanju barvne informacije: ker v času nastajanja sistema ni obstajala prenosljiva rešitev za hkratno zajemanje globinske in barvne informacije, so se odločili za zajemanje barvne informacije v ločenem obhodu kipa. To je pomenilo, da niso več vezani na odmik, ki so si ga zadali pri zajemanju globinske informacije. Zaradi problematičnega postopka prestavljanja sistema in ker so se želeli izogniti problemu kalibracije barva-globina, so se odločili, da odmik ohranijo.
- Ločljivost barvne informacije: pri postopku konverzije barvne informacije v odbojnost uporabljajo površinske normale sestavljenega modela. Ker je točnost te konverzije odvisna od točnosti teh normal, so se odločili, da uporabijo isto ločljivost kot pri zajemanju globinske informacije. S tem so hkrati poenostavili svojo predstavitev modelov; barvno informacijo so shranili kot par *ena barva - en trikotnik* in ne kot teksturo dela mrežnega modela. Seveda je pri zajemanju barve potrebno nadzorovati tudi osvetlitev.
- Zaradi lastnosti skenerja, da deluje dobro le, če žarek pada na površino pravokotno, je moral biti pomični oder zelo fleksibilen in neobčutljiv na premike skenerja. S tem so bili postavljeni tudi temelji za ponovljivost postopkov, torej tudi kalibracije.

• **Način skeniranja** lahko razdelimo v dva osnovna koraka:

- operater najprej ročno nastavi pomični oder, nato pa interaktivno nastavi meje območja zajemanja,
- zažene se skripta za avtomatsko skeniranje zarisane območja.

Glede na način združevanja delnih modelov s postopkom poravnave, so pri skeniranju morali biti pazljivi tudi na zadostno količino prekri-vajočih se podatkov med, na kipu, sosednjimi zajetimi območji. Ta korak je potreben, ker niso točno kalibrirali premikov. Zaradi dela na terenu so morali najti način kompenzacije ambientne svetlobe, zato so vsako barvno sliko zajeli dvakrat: enkrat brez dodatne osvetlitve in drugič z njo. Ko so ti dve sliki odšteli, so dobili sliko, na kateri se je odražala zgolj dodatna osvetlitev. Največja pomanjkljivost te faze je pomanjkanje avtomatskega načrtovanja zajemanja podatkov. Vendar, medtem ko se novejša metode načrtovanja zajemanja podatkov osredotočene na problem: *Katerih n zajemanj naj opravimo, če imamo*

delno zgrajen 3D model?, njih bolj zanima rešitev problema: *Kako lahko zapolnimo (podatkovne) luknje 3D modela?*

- **Procesiranje zajetega materiala.** Najprej si oglejmo postopek procesiranja globinskih slik, nato pa še postopek barvanja modela oziroma določitve odbojnosti.

Procesiranje globinskih slik se začne s poravnavo vseh podatkov v skupni koordinatni sistem:

- Najprej je operater interaktivno, s translacijo in rotacijo, približno poravnal nove zajete podatke z že prej zajetimi.
- Nato je operater izbral podatke nekega zajemanja, ki so v veliki (največji) meri prekrivali novo zajete podatke in nad temi podatki zagnal algoritem ICP (*Iterative Closest Point*) [1], ki izboljša ročno poravnavo. ICP poišče sovpadajoče točke na dveh mrežnih modelih tako, da izračuna transformacijo, ki minimizira vsoto kvadratov razdalj med temi pari točk. Postopek se ponavlja dokler ni izpolnjen pogoj konvergence: mrežna modela sta dovolj dobro poravnana ali pa presežemo dovoljeno število iteracij.
- Po končanem skeniranju celotnega kipa so avtomatsko poiskali vsak par znatno prekrivajočih se podatkov, jih izolirali od ostalih podatkov in nad njimi, s ciljem poiskati vzajemno poravnavo, pognali ICP. Za vsako poravnavo so shranili transformacijo med tema množicama podatkov in spisek sovpadajočih parov točk.
- Ti spiski so bili nato uporabljeni kot omejitve algoritma za iterativno relaksacijo, ki zagotovi globalno poravnavo ob enakomerni porazdelitvi napake med pare poravnjav. Osnovna ideja relaksacije je, da se dopusti sovpadajočim točkam nekega spiska poljubna povezava s sovpadajočimi točkami drugih spiskov (kot da so sovpadajoče točke spiskov medsebojno neodvisne), nato pa se pari reorganizirajo na podlagi razširjanja omejitev [6, 14].

Navadno se globalna poravnava dela s posplošenim ICP (vsaka množica podatkov (eno zajemanje) je korakoma poravnana z vsemi sosednjimi podatki, postopek pa se iterativno ponavlja dokler ne skonvergira), vendar ta postopek zahteva, da so vsi podatki shranjeni v spominu računalnika. Pri zgornjem postopku morajo biti v spominu shranjeni le spiski sovpadajočih točk.

Poravnavi sledi združevanje, to je rekonstrukcija površin iz množice poravnanih podatkov. Pri tem uporabijo t.i. Volumsko metodo in Oblikovanje prostora. Osnova Volumske metode [4] je izračun utežene predznačene razdalje vsake točke  $\mathbf{x}$  do najbližje globinske slike. S kombinacijo predznačenih razdalj  $d_1(\mathbf{x}), d_2(\mathbf{x}), \dots, d_n(\mathbf{x})$  in uteži  $w_1(\mathbf{x})$ ,

$w_2(\mathbf{x}), \dots, w_n(\mathbf{x})$ , dobljenih iz globinskih slik 1.. $n$ , dobimo za vsak volumski element (voxel) kumulativno predznačeno funkcijo razdalje  $D(\mathbf{x})$  in kumulativno utežnostno funkcijo  $W(\mathbf{x})$ . Te funkcije so vpisane v (diskretno) 3D mrežo, površino pa rekonstruirajo na podlagi iskanja vrednosti  $D(\mathbf{x}) = 0$ . Nato metodo Oblikovanje prostora uporabijo za zapolnitev lukenj v modelu. Osnova rekonstrukcije je odstranjevanje najmanjših 3D elementov (voxel) iz regij, ki ne pripadajo objektu [3]. Da lahko z algoritmom za združevanje obdelajo zajeto količino podatkov, so podatke razdelili na bloke in jih sprocesirali neodvisno.

Cevovod barvnega procesiranja pa so sestavljali naslednji koraki:

- Odštevanje zajetih slik ob dodatni osvetlitvi in brez nje.
- Popravljanje slike zaradi geometrijskih popačenj, kromatičnih posebnosti in radiometričnih efektov s podatki pridobljenimi ob kalibraciji sistema.
- Izločanje slikovnih elementov, ki niso bili vidni iz pozicije kamere in pozicije luči hkrati, če pa je trikotnik modela bil viden hkrati iz pozicije kamere in pozicije luči, pa so projicirali trikotnik na sliko kamere in mu pripisali barvo, ki so jo našli na tem mestu barvne slike.
- Izračun odbojnosti iz pripisane barve na osnovi površinske normale sestavljenega modela; inverzen izračun osvetlitve, znan tudi pod imenom razsenčenje (ang. *de-shading*).
- Vsak trikotnik modela pa se je navadno prelikal v več slik in ker niso imeli opravka z idelanimi Lambertovimi ploskvami, si izračunane odbojnosti niso bile povsem enake, zato so morali uporabiti določena pravila zaupanja v izračunane odbojnosti in jih ustrezno združiti v eno samo vrednost.

Izhod cevovoda je bila trojica odbojnosti RGB za vsak trikotnik modela. Zaradi načina izračuna odbojnosti z uporabo normale pa naletimo na dva problema: izračuni so občutljivi na šum vsebovan v normalah in geometrijske podrobnosti, ki jih pri skeniranju ne moremo zajeti, ne bodo vstopali v izračun. Zaradi tega moramo pri analizi modela biti pozorni na odbojnost, ki ni povsem identična odbojnosti pravega kipa; na primer pri proučevanju lastnosti marmorja.

- **Prikazovanje zajetih podatkov.** Zaradi načina skeniranja, točneje zaradi določanja naslednjega dela kipa, ki ga bodo zajeli, so morali v spomin naložiti celoten 3D model in mu sproti dodajati zajete podatke. Ker gre za ogromno količino zajetih podatkov (dve milijardi poligonov), so morali sestaviti tudi postopke za rokovanje s temi modeli:

- Podatke so shranili v obliki globinskih slik in ne mreže poligonov. Njihov format datoteke, ki hrani globinsko sliko, je sestavljen iz tabele 16-bitnih vrednosti globine in glave datoteke, ki vsebuje potrebne informacije za preslikavo teh vrednosti v 3D točke. Te slike so nato še zakodirali s postopkom *run-length*. Tako so podatki, potrebni za rekonstrukcijo kipa Davida, zasedli 2GB spomina namesto 36 GB spomina, kolikor bi ga bilo potrebnega, če podatki ne bi bili kodirani in bi bili predstavljeni s 3D točkami in spiski indeksov.
- Ker nobena delovna postaja danes ne more prikazati 2 milijardi poligonov v realnem času, so uporabili piramide globinskih slik.
- Razvili so pregledovalnik za hitro pregledovanje modela na osnovi upodabljanja točk, ki z navadnim strojnim pospeševalnikom omogoča pregledovanje modela velikosti več sto milijonov poligonov v realnem času.

## 4 Zaključek

Iskanje vizualnih informacij je zelo zahteven postopek, tako prostorsko kot časovno. V seminarski nalogi sem izpostavil nekatere postopke računalniškega vida, ki se uporabljajo (tudi) pri analizi umetniških del. Zaključimo lahko, da so tako 2D metode kot 3D metode pomembne za avtomatsko oziroma polavtomatsko analiziranje umetniških del.

Pri nas je danes zelo veliko govora o Robovem vodnjaku: pusti ga, prestavi ga, zaščiti ga, vse je minljivo, ipd. mnenja. Mogoče bi računalnikarji pristavili svoje mnenje: poskeniraj ga - zdaj za znanstvene namene, nekoč za naslednje generacije.

Eden izmed stranskih produktov projekta Michelangelo je tudi 3D zbirka 1163. delov zemljevida Forma Urbis Romae, velikanskega marmornega zemljevida starega Rima. Ta se je v preteklosti razletel in sestaviti to 3D sestavljanko bi lahko bil pravi izziv. Najprej bi bila potrebna analiza delov zemljevida, nato njihova sinteza, na koncu pa bi lahko naredili tudi analizo celotnega zemljevida, saj naj bi le ta povedal veliko o življenju ljudi v tedanjem Rimu.

S stalnim avtomatskim nadzorom sprememb na kipu bi lahko tudi avtomatsko določali restavracijski proces, da ne govorim o množici statističnih podatkov, ki bi se tako nabrali.

Z digitalno reprodukcijo umetniških del pa se bomo mi vsi srečali še z mnogimi problemi, od tehničnih, pa do povsem birokratskih:

- ustvarjanje navideznih muzejev
- ustvarjanje fizičnih reprodukcij



- geometrijski izračuni - analize
- avtorske pravice
- vodni žig kot sredstvo zaščite
- učinkovito pregledovanje digitalnih reprodukcij
- iskanje po reprodukcijah
- ipd.

Za konec pa izpostavimo še nekaj problemov, s katerimi se srečujejo raziskovalci s področja računalniškega vida, ko gre za takšno ali drugačno obdelavo umetniških del:

- klasifikacija umetniškega dela (na primer po avtorju)
- ugotavljanje pristnosti umetniškega dela
- načrtovanje skenerja za zajemanje podatkov ob nelaboratorijskih pogojih dela
- analiziranje 3D reprodukcij umetniških del
- ipd.

## A Analiziranje miniaturnih potretov - implementacija

Pri tem delu me je pritegnil predvsem postopek iskanja potez, saj se s čim podobnim še nisem srečal, zato sem se odločil, da implementiram osnovni del iskanja potez in razgradim ta korak še globlje.

Kot omenjeno, pa tako dobljeni podatki ne služijo kot vhod v nek klasi-fikacijski sistem, ki bi "svetoval" avtorstvo miniaturnega portreta, temveč je klasifikacija na podlagi dobljenih podatkov prepuščena umetnostnim zgodov-inarjem.

### A.1 Osnova za iskanje potez

Avtorji sistema iščejo poteze po Rosenfeldovi metodi Pol-linearni detektor sledi (ang. *semilinear streak-detector*) [15]. Oglejmo si, kako deluje metoda, če želimo najti vertikalne linijske sledi debeline  $2t$ :

- Vhodno sliko  $f$  povprečimo z oknom velikosti  $2t \times 2t$  (pomen parametra  $t$  bo razložen v nadaljevanju). Navadno se uporabi okno velikosti  $2 \times 2$ :

$$f_a(x, y) = \frac{1}{4}[f(x, y) + f(x + 1, y) + f(x, y + 1) + f(x + 1, y + 1)].$$

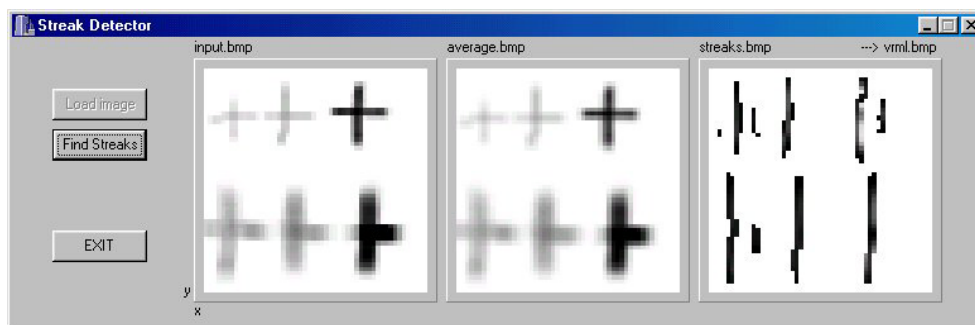
- Pol-linerani detektor sledi se sedaj ravna po naslednji enačbi:

$$h_V = \begin{cases} -[f_a(x, y + 1) + f_a(x, y) + f_a(x, y - 1)] + \\ \frac{1}{2}[f_a(x - 1, y + 1) + f_a(x - 1, y) + f_a(x - 1, y - 1) + \\ f_a(x + 1, y + 1) + f_a(x + 1, y) + f_a(x + 1, y - 1)], \\ \text{če } f_a(x, y + 2t) + f_a(x, y) + f_a(x, y - 2t) < \\ f_a(x - 2t, y + 2t) + f_a(x - 2t, y) + f_a(x - 2t, y - 2t) \\ \text{in} \\ f_a(x, y + 2t) + f_a(x, y) + f_a(x, y - 2t) < \\ f_a(x + 2t, y + 2t) + f_a(x + 2t, y) + f_a(x + 2t, y - 2t) \\ 255, \text{ sicer} \end{cases}$$

V zgornji enačbi uporabljamo v pogoju odmik za  $2t$ , kar pomeni, da delamo primerjavo med sosednjimi, vendar neprekrivajočimi se povprečji. Na sliki 6 je prikazan rezultat opisane metode. Podajmo lastnosti metode:

- Metoda najmočneje označi sledi debeline  $2t$ , odziva pa se tudi na druge debeline (med 0 in  $6t$ ), ki pa so ustrezno šibkejši.
- Metoda je občutljiva na sledi, ki se le malo razlikujejo od ozadja. Očitne (temne) sledi na vhodni sliki so na končni sliki svetlejšje, a še vedno očitne.

- Iz lastnosti Pol-linearosti sledi, da se metoda odziva na izolirane točke, ne pa tudi na t.i. stopničaste robove (ang. *step edge*).



Slika 6: Rezultat metode Pol-linearni detektor vertikalnih linijskih sledi

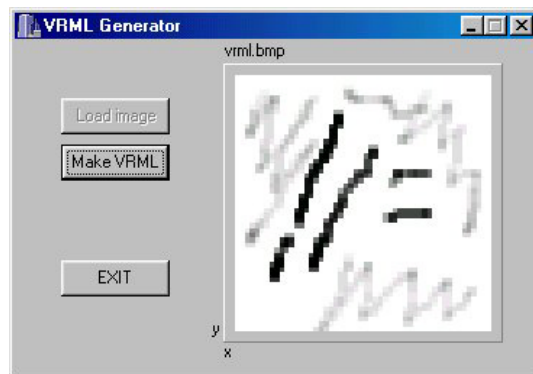
Avtorji sistema uporabljajo podoben pristop v štirih orientacijah ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ). Rezultate združijo v eno sliko, ki jim predstavlja rezultat iskanja (detekcije) potez.

## A.2 3D interpretacija najdenih potez

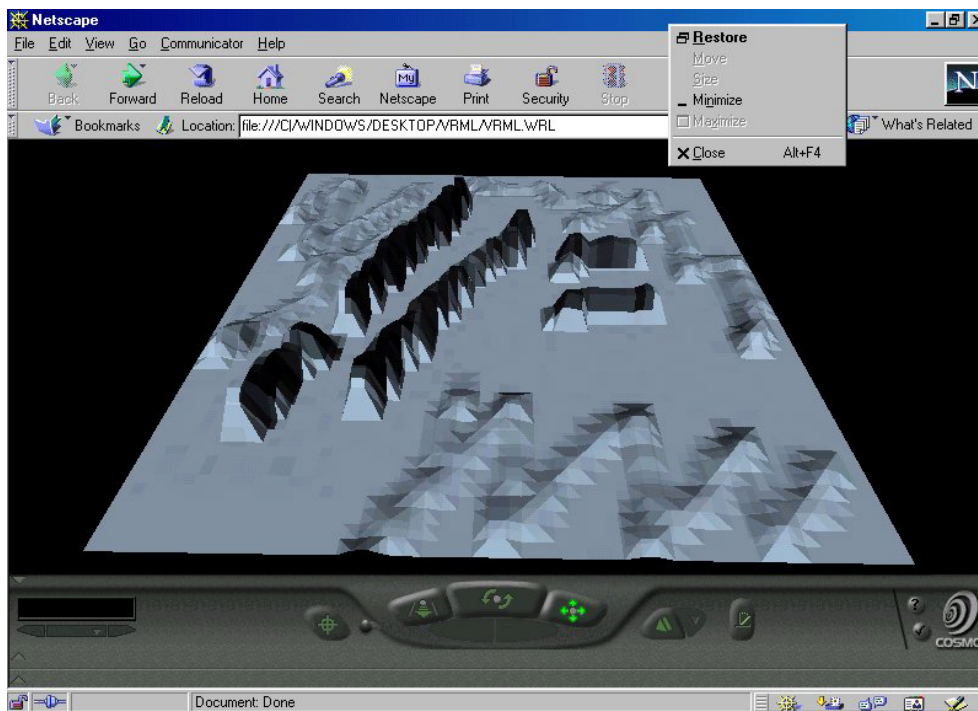
Slika najdenih potez pravzaprav vsebuje le segmente potez, saj križanje in prekrivanje potez botrujeta nepravilnemu oziroma nezaželenemu delovanju zgornje metode. Torej je potrebno te segmente ustrezno povezati, da dobimo celotne poteze, kot si jih človek predstavlja s pomočjo interpolacije. V tem koraku izračunajo tudi dodatne parametre, kot so dolžina, debelina in ukrivljenost, ki služijo kot vhod pri klasifikaciji. Pri tem moramo seveda pričakovati, da bodo nekatere poteze (vsaj delno) prekrivale druge poteze, zato avtorji, z namenom pravilnega povezovanja segmentov potez, interpretirajo izhod zgornje metode kot ravnino v 3D prostoru, kjer je višina določena z intenziteto vrednostjo.

Na sliki 8 je prikazana 3D interpretacija najdenih potez s slike 7.

Avtorji nato izračunajo lokacijo točk, katerih vrednost ukrivljenosti je pozitivna in visoka, hkrati pa imajo lokalno maksimalno višino. Nato povežejo tako dobljene točke na osnovi Evklidske razdalje. Za večjo natančnost povezovanja segmentov potez pa uporabljajo tudi informacijo o usmerjenosti in barvi potez.



Slika 7: Primer najdenih potez



Slika 8: Rezultat 3D interpretacije najdenih potez

## Literatura

- [1] P. J. Besl, N. D. McKay, A method for registration of 3-D shapes, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 14, No. 2, str. 239-256, Feb. 1992.
- [2] J. N. Bronštejn, K. A. Semendjajev, *Matematični priročnik*, prevedel A. Žabkar, Tehniška založba Slovenije, Ljubljana, 1988.
- [3] G. Cross, A. Zisserman, Surface reconstruction from multiple views using aparent countours and surface texture, *NATO ARW, Confluence of Computer Vision and Computer Graphics*, 1999, Ljubljana, Slovenia.
- [4] B. Curless, M. Levoy, A Volumetric Method for Building Complex Models from Range Images, *SIGGRAPH'96*, str. ?-?.
- [5] M. Emmer (Ed.), *The Visual Mind: Art and Mathematics*, A Leonardo Book, The MIT Press, 1993.
- [6] O. Faugeras, *Three-Dimensional Computer Vision: A Geometric Viewpoint*, MIT Press, 1993.
- [7] J. D. Foley, A. van Dam, S. K. Feiner, J. F. Hughes, *Computer Graphics: Principles and Practice*, Addison-Wesley, New York, 1990.
- [8] J. Gros, F. Solina, Opisovanje umetniških kompozicij z oblikovnimi slovniciami, *Elektrotehniški vestnik*, letnik 59, številka 5, str. 314-320, 1992, Ljubljana, Slovenija.
- [9] M. S. Kamel, H. C. Shen, A. K. C. Wang, T. M. Hong, R. I. Campeanu, Face recognition using perspective invariant features, *Pattern Recognition Letters*, Vol. 15, str. 877-883, 1994.
- [10] J. L. Kirsch, R. A. Kirsch, Computers Viewing Artists at Work, *Proceedings of the NATO Advanced Workshop on Syntactic and Structural Pattern Recognition*, str. ?-?, Barcelona, 1986.
- [11] W. G. Kropatsch, M. Eder, P. Kammerer, Finding Strokes of the Brush in Portrait Miniatures, v: F. Solina, W. G. Kropatsch (Eds.), *Visual Modules, Proc. of the 19th ÖAGM and 1st SDRV Workshop*, Schriftenreihe der OCG, Band 81. R. Oldenburg, Wien-München 1995, str. 257-265.
- [12] M. Levoy, K. Pulli, B. Curless, S. Rusinkiewicz, D. Koller, L. Pereira, M. Ginzton, S. Anderson, J. Davis, J. Ginsberg, J. Shade, D. Fulk, The Digital Michelangelo Project: 3D Scanning of Large Statues, *SIGGRAPH 2000*, str. ?-?.

- [13] X. Li, N. Roeder, Face contour extraction from front-view images, *Pattern Recognition*, Vol. 28, No. 8, str. 1167-1179, 1995.
- [14] N. Pavešić, *Razpoznavanje vzorcev*, 2. razširjena izdaja, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, 2000.
- [15] A. Rosenfeld, A. C. Kak, *Digital Picture Processing*, second edition, Vol. 2, Academic Press, Inc., 1982.
- [16] R. Sablatnig, P. Kammerer, E. Zolda, Structural Analysis of Paintings Based on Brush Strokes, v: *Proc. of SPIE Scientific Detection of Fakery in Art*, San Jose, USA, SPIE-Vol. 3315, str. 87-98, 1998.
- [17] R. Sablatnig, P. Kammerer, E. Zolda, Hierarchical Classification of Painted Portraits Using Face- and Brush Stroke Model, v: A. K. Jain, S. Venkatesh, B. C. Lovell (Eds.), *Proc. of the 14th Int. Conf. on Pattern Recognition*, Vol. I, str. 172-174, 1998.
- [18] I. Tastl, R. Sablatnig, W. G. Kropatsch, Model-Based Classification of Painted Portraits, v: A. Pinz (Ed.), *Pattern Recognition 1996, Proc. of the 20th ÖAGM-Workshop*, Schriftenreihe der OCG, Vol. 90, str. 237-249, Oldenburg, Wien, München, 1996.
- [19] E. Trucco, A. Verri, *Introductory techniques for 3-D computer vision*, Prentice Hall, 1998.
- [20] Creating Virtual Sculpture:  
<http://dailyrevolution.org/tuesday/michaelangelo.html>.