

REKONSTRUKCIJA OBJEKTA V OBLIKI OBLAKA TOČK

Martin Knap, Janez Lapajne

Povzetek

V nalogi je obravnavan postopek tridimenzionalne rekonstrukcije objektov na podlagi več zajetih slik. Za rekonstrukcijo je uporabljena metoda filtrirane povratne projekcije. Bistvo metode je rekonstrukcija oblike telesa iz slik, ki so zajete pri različnih kotih zasuka objekta. Velik poudarek je namenjen izgradnji in zasnovi sistema, saj je od njegove postavitve odvisna kakovost zajetih slik. Osredotočamo se predvsem na elemente, ki nam pomagajo pri čimboljši rekonstrukciji objekta v obliki oblaka točk. Prikazana je kalibracija sistema in preslikava slik v metrični koordinatni sistem. Predstavljena je uporabnost rekonstrukcije objektov in izvedba vzratnega inženirstva skeniranega objekta.

1 Uvod

V robotskem vidu in računalniški grafiki je 3D rekonstrukcija proces zajemanja oblike in videza realnega objekta. Proces je lahko dosežen z aktivnimi ali pasivnimi metodami. V nalogi je uporabljena pasivna FBP metoda (angl.: *Filtered Back-Projection*). Uporaba rekonstrukcije lahko določi profil 3D objekta oziroma koordinate katerikoli točke na tem profilu. Digitalna slika je v našem primeru vir informacij. Za dobro rekonstrukcijo je potrebno upoštevati vizualno dispariteto, osvetlitev, performance kamere in značilnosti scene. Uporabljeno kamero je potrebno ustrezno skalibrirati in merjene točke pretvoriti v metrični koordinatni sistem. Bolje kot je zastavljen zajem slik, ustrežnejši so končni rezultati. Dobro zajete slike olajšajo obdelavo. Rekonstrukcija objektov je uporabljena v različnih področjih raziskovanja. Med drugim v medicini, robotiki, računalniških igrah in v vzratnem inženirstvu [3, 4, 5].

2 Teoretično ozadje

2.1 Kalibracija

Pomagamo si z [2]. Pred začetkom izvedbe rekonstrukcije je potrebna geometrijska kalibracija sistema za zajem slik. Namen kalibracije je pridobitev parametrov toge preslikave, ki jih bomo

potrebovali kasneje v algoritmu 3D rekonstrukcije s filtrirano povratno projekcijo. Cilj je projekcija iz slikovnega v metrični koordinatni sistem. Referenčne točke kalibracijskega objekta (3D) najprej togo premaknemo na mesto rotirajoče mize. Nato sledi DLT (angl. *Direct Linear Transformation*) kalibracija med 3D točkami referenčnega kalibra $T_{ref,i} = (X_i, Y_i, Z_i)$ ter 2D naborom točk kalibra iz slikovnega koordinatnega sistema $t_{slik,i} = (x_i, y_i)$. Pri tem je $i = 1 \dots N$, kjer je $N = 8$. Pri DLT kalibraciji z razcepom na singularne vrednosti rešujemo sledeči sistem.

$$a = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 0 & 0 & 0 & -x_1 X_1 & -x_1 Y_1 & -x_1 Z_1 & 1 & 0 & -x_1 \\ 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & Z_1 & -y_1 X_1 & -y_1 Y_1 & -y_1 Z_1 & 0 & 1 & -y_1 \\ & & & & & & \vdots & & & & & \\ X_8 & Y_8 & Z_8 & 0 & 0 & 0 & -x_8 X_8 & -x_8 Y_8 & -x_8 Z_8 & 1 & 0 & -x_8 \\ 0 & 0 & 0 & X_8 & Y_8 & Z_8 & -y_8 X_8 & -y_8 Y_8 & -y_8 Z_8 & 0 & 1 & -y_8 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{p} = [r_{11} \ r_{12} \ r_{13} \ r_{21} \ r_{22} \ r_{23} \ r_{31} \ r_{32} \ r_{33} \ t_x \ t_y \ t_z] \quad (2)$$

$$a\mathbf{p}^T = 0 \quad (3)$$

Matrika a ima dimenzije 16×12 . Rešitev sistema predstavlja 12 parametrov toge preslikave, ki predstavljajo rotacijo r_{ij} ter translacijo t_k . Sledi še razcep na singularne vrednosti, kjer je rešitev sistema lastni vektor \mathbf{p} , ki mu pripada najmanjša lastna vrednost λ matrike $a^T a$. Rešitev dobimo z minimizacijo naslednjega izraza.

$$\|\mathbf{p}\|^2 = (a\mathbf{p})^T a\mathbf{p}, \quad \text{pogoj: } \mathbf{p}^T \mathbf{p} = 1 \quad (4)$$

Z Lagrange-ovim faktorjem λ dobimo izraz za minimizacijo, ki ga nato odvajamo po parametrih ter enačimo z nič.

$$L(\mathbf{p}) = \mathbf{p}^T a^T a \mathbf{p} - \lambda(\mathbf{p}^T \mathbf{p} - 1) \quad (5)$$

$$a^T a \mathbf{p} - \lambda \mathbf{p} = 0 \quad (6)$$

V izrazu 6 je torej λ lastna vrednost matrike $a^T a$, ki ji pripada lastni vektor $\mathbf{p} = \mathbf{e}_\lambda$. Ta nam da $L(\mathbf{e}_\lambda) = \lambda$, ki ima najmanjšo vrednost pri $\lambda = 0$.

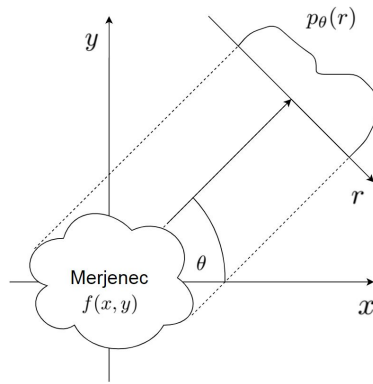
2.2 Filtrirana povratna projekcija

Pomagamo si z [1]. Jedro naloge predstavlja postopek FBP, ki je eden od temeljnih načinov rekonstrukcije pri slikanju z računalniško tomografijo na področju zdravstva. Idejo koncepta filtrirane povratne projekcije je najenostavneje predstaviti na 2D primeru, kjer 2D merjencu

$f(x, y)$ pri večih kotih θ zajamemo 1D prečne projekcije $p_\theta(r)$ [8, 9]. V koordinatnem sistemu, ki je prikazan na sliki 1 lahko projekcijo točke (x, y) na r zapišemo na sledeči način in posledično definiramo projekcijo $p_\theta(r)$.

$$x \cos \theta + y \sin \theta = r \quad (7)$$

$$p_\theta(r) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - r) dx dy \quad (8)$$



Slika 1: Filtrirana povratna projekcija.

Zajete projekcije so nato pretvorjene v frekvenčno domeno s pomočjo Fourier-ove transformacije $P_\theta(\omega)$ za vsak kot. Temu nato sledi filtriranje projekcij s frekvenčnim odzivom $|\omega|$, kar opisuje izraz 10.

$$P_\theta(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} p_\theta(r) e^{-i\omega r} dr \quad (9)$$

$$g_\theta(r) = \int_{-\infty}^{\infty} P_\theta(\omega) |\omega| e^{i2\pi\omega r} d\omega \quad (10)$$

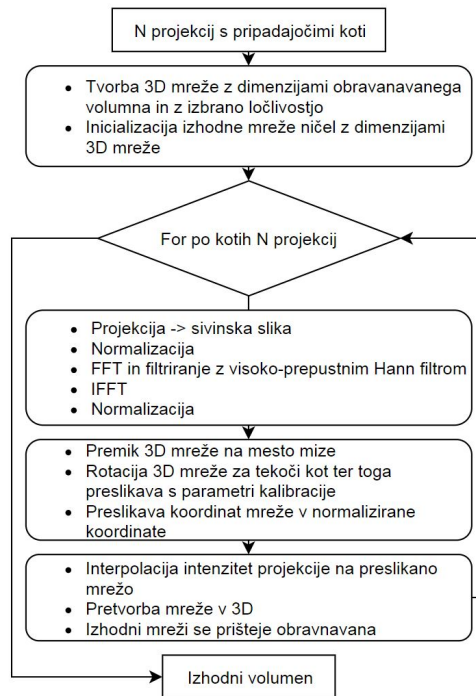
S filtriranjem se želimo znebiti visokih frekvenc v projekcijah in posledično pridobiti kvalitetnejšo rekonstrukcijo. Po filtriranju nato sledi še rekonstrukcija v $f'(x, y)$ in sicer tako, da filtrirane inverze Fourier-ove transformacije seštejemo po pripadajočih kotih in posledično dobimo rekonstruiran objekt.

$$f'(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi g_\theta(r) (x \cos \theta + y \sin \theta) d\theta \quad (11)$$

Ali v diskretni obliki, kjer je $\Delta\theta$ korak diskretizacije:

$$f'(x, y) = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=0}^{N-1} \Delta\theta_i g_{\theta_i}(x \cos \theta_i + \sin \theta_i) \quad (12)$$

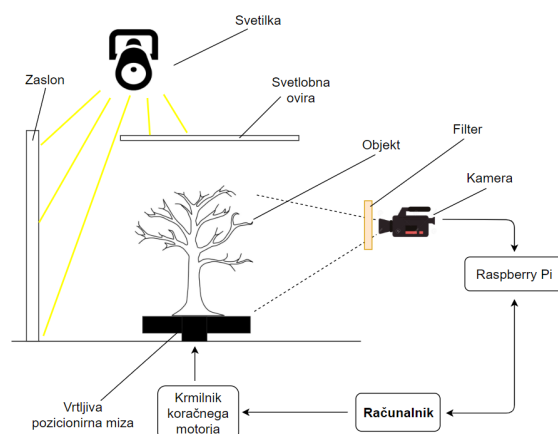
Za potrebe naloge je postopek razširjen v tretjo dimenzijo. Na spodnji sliki je prikazan diagram poteka uporabljenega FBP algoritma.



Slika 2: Diagram poteka FBP algoritma.

3 Zajem slik

Sistem s katerim smo izvajali rekonstrukcijo je blokovno prikazan na sliki 3. Objekt, ki ga želimo skonstruirati postavimo na vrtljivo pozicionirno mizo. Iz zgornje strani navzdol svetimo s homogeno, difuzno osvetlitvijo. Objekta direktno ne osvetljujemo, saj je namen osvetlitve predvsem osvetlitev ozadja z enakomerno intenziteto. Cilj je doseči čimvečjo razliko v intenziteti med opazovanim objektom in zaslonom. Za ta namen je med objekt in svetilko postavljena svetlobna ovira. Slike smo zajemali z Raspberry Pi kamero v osi na objekt in na osvetljeno ozadje. Pred kamero je dodan filter za namen filtriranja okoliške svetlobe.



Slika 3: Semioperacijska shema sistema.

Celoten proces zajemanja krmilnimo z računalnikom. Ta je žično povezan na krmilnik s katerim upravljamo rotirajočo pozicionirno mizo. Prav tako je računalnik brezžično povezan na Raspberry Pi. Ta zajete slike pošilja na računalnik. Objekt rekonstruiramo tako, da ga postavimo na predvideno mesto. Nato lahko pričnemo z zajemom slik. Najprej inicializiramo kamero na začetne vrednosti. Nastavimo ISO na 200, svetlost na 45 in resolucijo na 900x1000. Objekt obračamo po načrtanih zasukih. Po vsakem izvedenem zasuku posnamemo eno sliko, ki se nato brezžično prenese iz Raspberry Pi-ja na računalnik. Postopek ponavljamo dokler objekta ne poslikamo v rangu celotnega kroga. Zajete slike ob znanih kotih zasuka se kasneje uporabijo za 3D rekonstrukcijo. V tabeli 1 so zapisane vse glavne komponente, ki so zajete v postavljenem sistemu. Manjše komponente kot so vijaki in nosilci v tabeli niso zajeti.

Tabela 1: Komponente sistema.

Komponenta	Podrobnosti
Raspberry Pi	Raspberry Pi 3 Model B
Svetilka	Halogenska svetilka (12V)
Zaslon	Bela ravna plošča
Krmilnik	Fischertechnik stage control
Kamera	RP Cam V2-8 MP,1080p
Svetlobni filter	Ozkopasovni filter
Svetlobna ovira	Kartonasta zavesa
Pozicionirna miza	Fischertechnik rotary stage

Primer zajete slike obravnavanega objekta z opisanim sistemom je prikazan na sliki 4. S slike lahko vidimo dober kontrast objekta in precejšnjo razliko v barvi in svetlosti objekta proti ozadju.

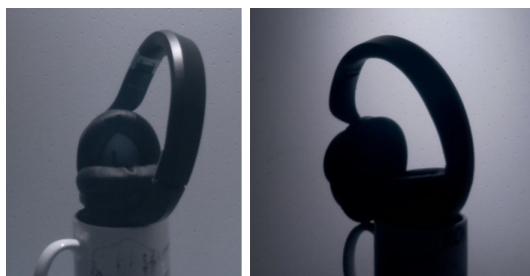


Slika 4: Zajeta slika.

4 Rezultati

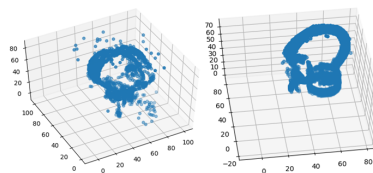
4.1 Vpliv kontrasta

Testirali smo kako svetlobna pregrada vpliva na rekonstrukcijo oblaka točk. Za ta namen smo vzeli enostaven objekt s stališča rekonstrukcije. Ta je prikazan na sliki 5. Na levi strani je prikazana slika objekta kjer svetlobne ovire nismo uporabili. Razvidno je, da se od objekta svetloba reflektivno odbija v kamero. Kamera to zazna kot svetlo intenziteto. Deli objekta, ki so tako osvetljeni se po svetlosti veliko ne razlikujejo od ozadja, na nekaterih delih pa so celo zaznani, kot svetlejši. Na desni strani je prikazana slika objekta, kjer svetlobno oviro uporabimo. Objekt je v tem primeru bistveno temnejši od ozadja.



Slika 5: Objekt: a) brez pregrade, b) s pregrado.

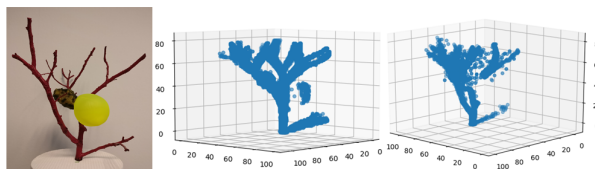
Na sliki 6 sta prikazana rezultata rekonstrukcij brez in z uporabo svetlobne ovire. Opazimo lahko, da je v primeru uporabljenе pregrade objekt bistveno lepše rekonstruiran. V primeru, ko zavese nismo uporabili nam odboji povzročajo napačno reprezentacijo objekta.



Slika 6: Rekonstrukcija: a) brez pregrade, b) s pregrado.

4.2 Število zajetih slik

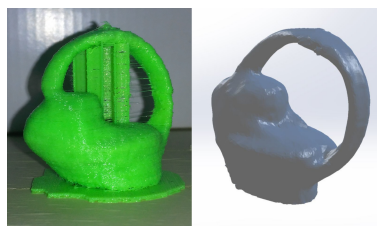
Dvakrat smo rekonstruirali isti predmet. Enkrat na podlagi 30 slik in drugič na podlagi 90 slik. Opazovali smo kako število zajetih slik vpliva na rekonstrukcijo. Na sliki 7 je čisto na levi strani prikazan skenirani objekt, na sredini objekt rekonstruiran na podlagi 90 slik in na desni objekt rekonstruiran na podlagi 30 slik. Vidimo, da dobimo boljšo obliko na podlagi večih slik. Za prikaz celotnega objekta v obeh primerih bi bilo potrebno prilagoditi meje upravljanja (angl.: *Thresholding*) prerezov 3D slike.



Slika 7: a) objekt, b) zajetih 90 slik, c) zajetih 30 slik.

4.3 Vzvratno inženirstvo

Vzvratno inženirstvo je proces, kjer na podlagi fizičnega objekta rekonstruiramo njegov model. Model smo dobili tako, da smo z rekonstrukcijo dobljen oblak točk uvozili v 3D modelirnik Solidworks. Tam smo z uporabo posebnih orodij iz točk površine predmeta dobili površino sestavljeno iz trikotnikov in posledično zaprli vse odprtine tako, da smo dobili zaprto površino. Nato je sledila interpolacija z namenom pridobive gladkejšje površine in transformacija v "trdnino" (angl.: *Solid*). Po opravljenih korakih smo imeli model v primerni obliki za izvoz v formatu `.stl`. Omenjeni format se nato uvozi v razslojevalnik (angl.: *Slicer*), ki napravi G-kodo 3D tiskalnika za tvorbo fizičnega modela. Na sliki 8 je na levi strani prikazan natisnjen objekt. Na desni strani je prikazan model pripravljen na tiskanje. Gre za objekt s slike 5.



Slika 8: a) model po tiskanju, b) lupina modela v modelirniku.

5 Zaključek

Tekom izvajanja naloge smo ugotovili da postopek 3D FBP rekonstrukcije dobro deluje pri popisu predmetov, ki ne vsebujejo majhnih detajlov (slika 7). Na kvaliteto rekonstrukcije močno vplivamo s številom zajetih slik ter z ustrezno osvetlitvijo, tako se znebimo črtastih artfektov, ki nastanejo s postopkom FBP. Pri tem pa je potrebno omeniti, da se čas rekonstrukcije močno poveča z večjim številom slik. S pojmom dobra osvetlitev pa mislimo velik kontrast med ozadjem ter slikanim predmetom. Uporabljen algoritem rekonstrukcije omogoča grobo dimenzijsko analizo, saj z upoštevanjem ločljivosti dobimo rekonstrukcijo v dimenzijah merjenca. Pri pretvorbi digitalnega modela v fizičnega smo ugotovili, da na kvaliteto rezultirajočega modela močno vpliva vrsta algoritma za izluščevanje točk površine iz 3D slike, transformacija oblaka točk v 3D model ter sam postopek 3D tiskanja.

6 Literatura

- [1] Ž. Špiclin, B. Likar, M. Burmen. *Predavanje pri predmetu - Biomedicinske slikovne tehnologije: Rekonstrukcija slik*, Univerza v Ljubljani, 2018.
- [2] Ž. Špiclin. *Predavanje pri predmetu - Robotski vid: Prileganje modelov na slike*, Univerza v Ljubljani, 2019.
- [3] Moons, Theo, Luc Van Gool. *3D reconstruction from multiple images part 1: Principles*, Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision 4.4: 287-404, 2010.
- [4] Vosselman, George, and Sander Dijkman. *3D building model reconstruction from point clouds and ground plans*, International archives of photogrammetry remote sensing and spatial information sciences 34.3/W4: 37-44, 2001.
- [5] Woodham, Robert J. *Photometric method for determining surface orientation from multiple images*, Optical Engineering. 19 (1): 138–141, 1980.
- [6] *Raspberry Pi 3, Model B V1.2 Technical Specifications*, RS Components, 20.9.2017.
- [7] *Fischertechnik Technical Specifications*, fischertechnik GmbH, 2016.
- [8] *Tomographic Reconstruction*, https://en.wikipedia.org/wiki/Tomographic_reconstruction Obiskano dne: 24.5.2019
- [9] M. Zvolský, E. Garutti, F. Grüner. *Zapiski - Tomographic Image Reconstruction: An Introduction*, URL: http://www.desy.de/~garutti/LECTURES/BioMedical/Lecture7_ImageReconstruction.pdf, Obiskano dne: 24.5.2019