

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

SEMINAR

Stereo kalibracija kamera s ribljim okom

Josip Milić

Voditelj: Izv. prof. dr. sc. Siniša Šegvić

Zagreb, travanj, 2016.

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Model stvaranja slike u kamerama s ribljim okom i pregled metoda za kalibraciju	2
2.1. Perspektivni model stvaranja slike	2
2.2. Radijalno simetrični model stvaranja slike	4
2.3. Kalibracija kamere s ribljim okom	5
2.3.1. Kalibracija kamera s ribljim okom pomoću uzorka	5
2.3.2. Auto-kalibracija kamera s ribljim okom	6
2.3.3. Funkcije izobličenja kamere s ribljim okom	7
3. Model stvaranja slike pomoću uparenih kamera s ribljim okom i stereo kalibracija	9
4. Implementacija stereo kalibracije kamera s ribljim okom	10
5. Zaključak	11
6. Literatura	12
7. Sažetak	13

1. Uvod

Percepcija struktura na temelju njihovih projekcija je trivijalna za ljude no ni nakon nekoliko desetljeća istraživanja u području spoznajne psihologije još nije potpuno jasno kako se ona ostvaruje. Zato ne iznenađuje činjenica da je njeno računalno ostvarenje vrlo složen problem. Računalni vid (engl. *Computer vision*, *Machine Vision*) je područje računarske znanosti koje se bavi tim problemom i razvija teorijske i algoritamske temelje pomoću kojih se korisna informacija može automatski izlučiti i analizirati i to iz pojedine slike, skupa slika ili iz slijeda slika uporabom računala opće namjene ili specijaliziranog računala. [3]

Razvoj računalnog vida je započeo još u 60-im godinama prošlog stoljeća, a popularizirao se početkom 2000-ih zahvaljujući, među ostalim razlozima, napretkom računalnih performansa, uređaja za digitalno snimanje i općenito računarske znanosti. Istraživači računalnog vida su razvijali i razvijaju matematičke postupke za prepoznavanje trodimenzionalnih struktura i prikaza objekata u slici. Danas zato imamo pouzdane postupke pomoću kojih se obavlja koristan automatiziran posao u djelatnostima koje nisu direktno vezane za računarsku znanost poput medicinske dijagnostike, očuvanje prometne sigurnosti i kontrole, strojne obrade i brojne druge. [4]

U posljednje vrijeme vrlo je snažan interes javnosti prema razvoju autonomnih vozila u kojima se postupci računalnog vida intenzivno koriste u kontekstu sigurnosti primjerice u situacijama u kojima se lidar ¹ uređaj ne snalazi. U takvim slučajevima postupci računalnog vida se koriste za navigaciju i nadziranje, i poželjno je imati što veće vidno polje. To se može ostvariti zrcalima i rotirajućim ili pokretnim kamerama, a najčešće se u praksi koriste kamere s ribljim okom koje ne zahtijevaju dodatnu opremu. Uparivanjem takvih kamera izrađuje se stereo sustav koji ima mogućnost izlučivanja 3-D informacija iz vidnog polja velike širine. One su korisne za detekciju zapreka u navigaciji ili za rekonstrukciju objekata u svrhu nadziranja. [1]

Pomoću *pin-hole* kamere se može dobro aproksimirati geometrija klasičnih kamera no ne i kamera s ribljim okom. Također, stereo rekonstrukcija takvih kamera se značajno razlikuje od rekonstrukcije s uobičajenim kamerama i manje spominje u literaturi. Cilj ovog seminara je objasniti model kamere s ribljim okom, model njezine stereo verzije i konačno potrebne postupke za ostvarenje stereo rekonstrukcije pomoću kamera s ribljim okom.

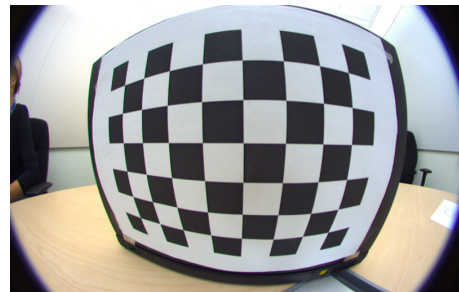
¹Lidar (spoj engleskih riječi svjetlost i radar, engl. *light* i *radar*) je tehnologija za mjerenje udaljenosti pomoću obasjavanja ciljne točke laserskom svjetlošću.

2. Model stvaranja slike u kamerama s ribljim okom i pregled metoda za kalibraciju

Ultra širokokutnim objektivom smatraju se svi objektivni koji sadrže sustav leća žarišne duljine značajno manje od uobičajene čime se postiže široko vidno polje (obično se sve oko 180° smatra ultra širokim). Takvi objektivni se nazivaju "riblji okom" (engl. *fish-eye² lens*) prvenstveno zbog svojeg specifičnog ispupčenog izgleda koje podsjeća na riblje oko (Slika 1 (a)). Najveći nedostatak takvih objektivni je prepoznatljivo vrlo jako radijalno izobličenje (Slika 1 (b)). Razumijevanjem uzroka izobličenja odnosno modela stvaranja slike u kamerama s riblji okom moguće je navedeno izobličenje ispraviti.



(a) Riblje oko



(b) Slika nastala pomoću kamere s riblji okom

Slika 1: Primjer ribljeg oka i slike

2.1. Perspektivni model stvaranja slike

Tipična perspektivna kamera može preslikavati točke u uskom polju vida ispred ravnine slike kamere. Perspektivna projekcija tzv. *pinhole* kamere se može opisati na sljedeći način:

$$r = f \tan(\theta) \quad (1)$$

gdje je θ kut između glavne (engl. *principal axis*) osi i upadajuće zrake (Slika 2). O je glavna točka (engl. *principal point*) koja je sjecište glavne osi i ravnine slike. f je žarišna duljina (engl. *focal length*), a r je udaljenost između točke slike i glavne točke. Standardni perspektivni model kamere preslikava sve točke scene M u jednu točku C koja se naziva optičkim centrom kamere. Linija koja spaja optički centar i točku scene presijeca ravninu slike u 2D točki m koja predstavlja koordinatu slike nastalu preslikavanjem točke M .

²Sam termin *fish-eye* je osmislio početkom 20. st. američki fizičar Robert W. Wood koji se bavio modeliranjem pretpostavke kako ribe vide pod vodom.

Vrijedi sljedeće:

$$\alpha m = PM \quad (2)$$

$P \in \mathbb{R}^{3 \times 4}$ je matrica projekcije, $M \in \mathbb{R}^4$ je homogenizirana točka scene, $m \in \mathbb{R}^3$ je homogenizirana točka slike i α je skalar. Koristeći homogenizirane koordinate jednačba 2 se može prikazati na sljedeći način:

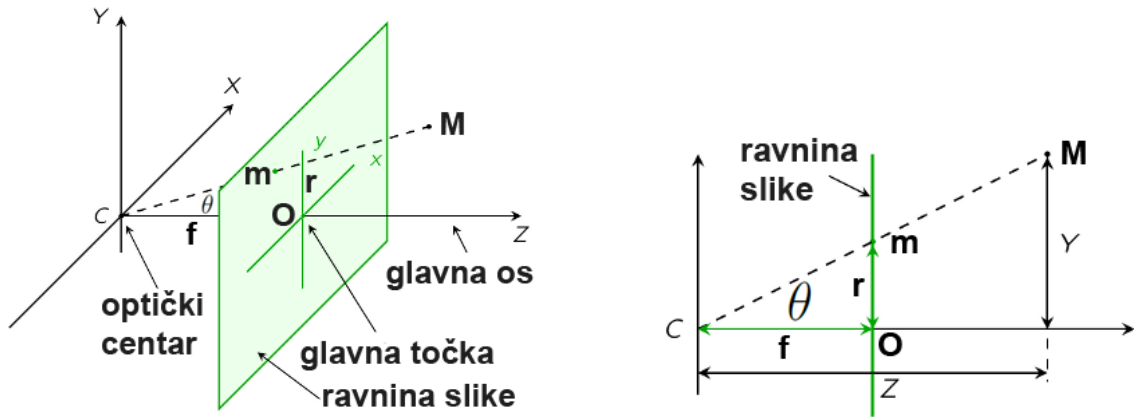
$$\alpha m = K[Rt]M \quad (3)$$

gdje je matrica projekcije dekomponirana u matricu intrinzičnih parametara K koja se naziva matrica kamere, i u matrice R (rotacija) i t (translacija) koje predstavljaju ekstrinzične parametre kamere. Matrica kamere:

$$K = \begin{bmatrix} f_x & x_\gamma & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

je matrica dimenzija 3×3 koja sadrži žarišne duljine duž x -osi i y -osi slike (f_x, f_y), iskrivljenost (engl. *skew*) γ između dvije osi slike i glavnu točku (u_0, v_0).

U ovom modelu možemo predstavljati samo scenu ispred kamere gdje su rubovi ravnine slike granice scene. To ograničava širinu vida perspektivne kamere na oko 60° . [2]



Slika 2: Perspektivni model kamere

2.2. Radijalno simetrični model stvaranja slike

Perspektivni model stvaranja slike ne odgovara za kamere s ribljim okom. Postoje različite vrste kamere s ribljim okom i mogu se se aproksimirati pomoću različitih projekcijskih modela:

$$r = 2f \tan(\theta/2) \quad (5)$$

$$r = 2f\theta \quad (6)$$

$$r = 2f \sin(\theta/2) \quad (7)$$

$$r = f \sin(\theta) \quad (8)$$

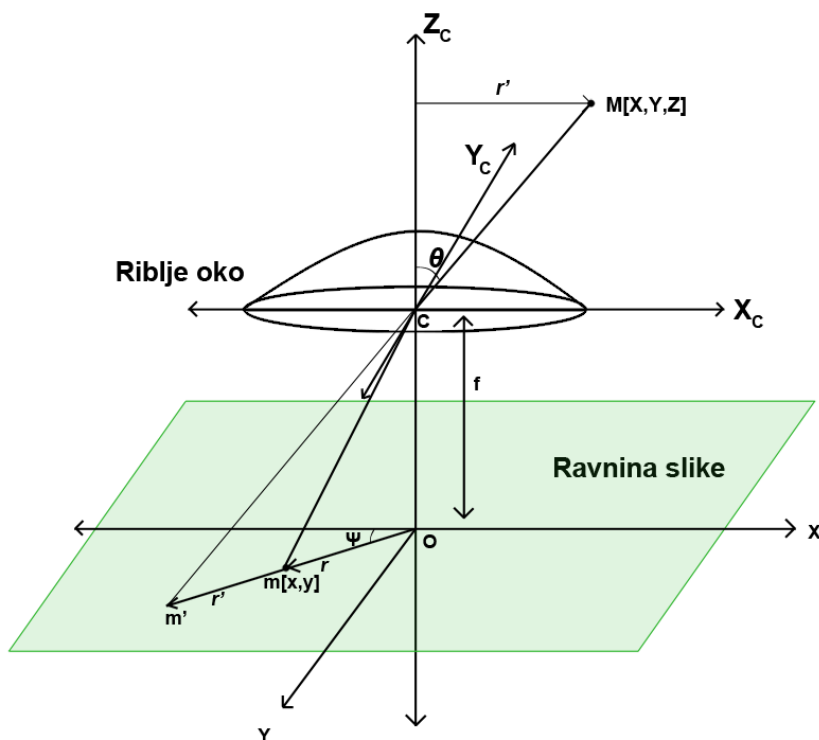
gdje je r radijalna udaljenost piksela od glavne točke i θ kut između upadajuće zrake i optičke osi (Slika 3). Jednadžbe 5 - 8 predstavljaju po redu stereografsku projekciju, ekvidistantnu projekciju, ekvisolidnu projekciju i ortogonalnu projekciju.

Općeniti model kamere s ribljim okom prikazan slikom 3. 3D točka prostora $M = [X, Y, Z]$ se preslikava u točku $m = [x, y]$. Također je prikazana točka m' koja prikazuje preslikavanje za perspektivni model. Slično kao i za perspektivne kamere, θ je kut zrake iz točke M prema centru C s glavnom osi. O je glavna točka ili centar ravnine slike. Udaljenost između glavne točke O i točke slike m je radijus r . Za radijalne modele vrijedi da je radijus r funkcija kuta α .

Time je definiran radijalno simetričan model stvaranja slike no u stvarnosti zbog nesavršene preciznosti izrade leća, a zbog toga i nesavršenosti samih leća, postoje odstupanja od tog modela. Zato je potrebno, osim uzeti u obzir idealni model, obaviti i postupak modeliranja projekcijskog modela za svaku kameru posebno. Taj postupak se naziva kalibracija kamere.

2.3. Kalibracija kamere s ribljim okom

Postoje različiti načini kalibracije kamere s ribljim okom. Oni se mogu općenito razvrstati u dvije kategorije: kalibracija pomoću uzorka (engl. *marker-based calibration*) i auto-kalibracija.



Slika 3: Model stvaranja slike pomoću kamere s ribljim okom

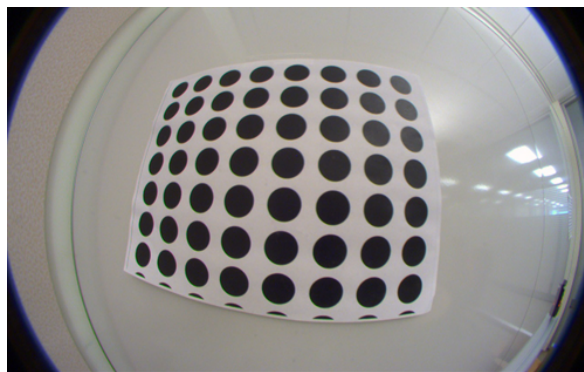
2.3.1. Kalibracija kamere s ribljim okom pomoću uzorka

Ove metode koriste kalibracijski uzorak i oznake (engl. *markers*) pomoću kojih dobivaju veze između točaka 3D prostora i njihovih projekcija na 2D ravnini slike kamere. Potrebno je koristiti manji broj slika poznatog objekta ili uzorka dobivenih pomoću kamere koja se kalibrira. Poznavajući navedene veze moguće je izračunati funkciju izobličenja (engl. *distortion function*) i druge parametre kamere s ribljim okom.

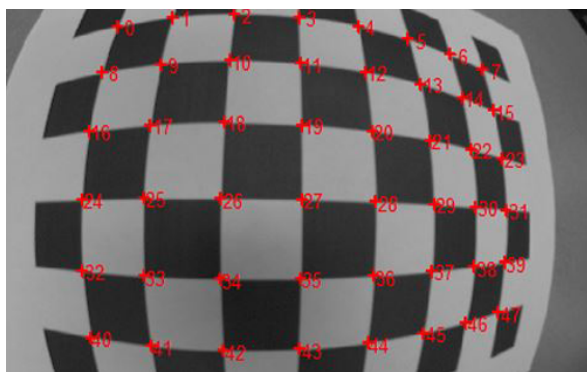
Sama kategorija metoda kalibracije pomoću uzorka se može podijeliti na podkategorije ovisno o vrsti korištenog uzorka: kalibracija pomoću 2D uzorka i 3D uzorka. Dvodimenzionalni uzorak koristi 2D planarni uzorak poznate geometrije (poznate su pozicije kontrolnih (specifičnih) točaka i udaljenosti između njih). Najčešće korišteni planarni uzorci su polje ispunjenih kvadrata u obliku šahovnice (Slika 4 a), gdje su kontrolne točke vrhovi kvadrata (Slika 4 c), i polje krugova (Slika 4 b), gdje su kontrolne točke centri krugova (Slika 4 d).



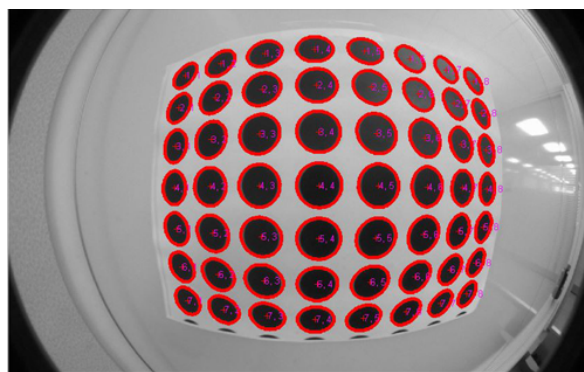
(a) Polje ispunjenih kvadrata



(b) Polje krugova



(c) Označeni vrhovi kvadrata



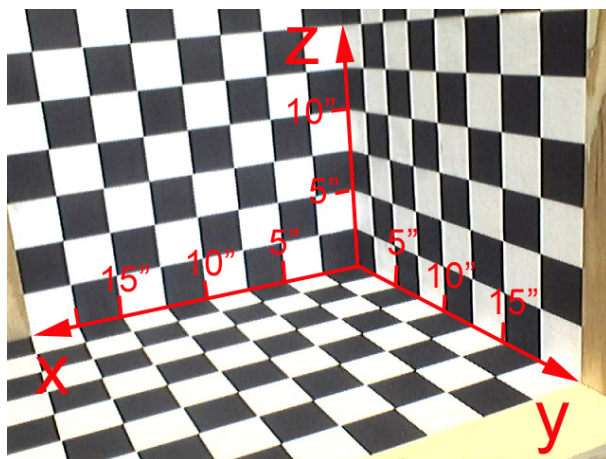
(d) Označeni rubovi i centroide krugova

Slika 4: Primjeri kalibracijskih uzoraka i njihove oznake (slike s prisutnim izobličenjem)

Nakon što je slika uzorka dobivena i kontrolne točke se odrede, izobličenje se modelira na temelju veza između pozicija kontrolnih točaka u slici i poznatih 3D točaka u okolini. Ovo omogućuje estimaciju intrinzičnih parametara kamere. Slika 5 prikazuje 3D kalibracijski uzorak. Koristi se metoda diskretne linearne transformacije (DLT) koja zahtijeva samo jednu sliku 3D uzorka. Kao i u planarnom uzorku kontrolne točke su kutovi kvadrata šahovnice na sve tri ravnine. Ovdje se može estimirati homografija između slike uzorka i originalnog kalibracijskog uzorka na temelju kontrolnih točaka. Rezultirajuća homografija se koristi za kalibraciju kamere i otkrivanje njezinih intrinzičnih parametara.

2.3.2. Auto-kalibracija kamera s ribljim okom

Metode auto-kalibracije se još nazivaju samo-kalibrirajuće metode jer se kalibracija vrši bez korištenja oznaka čiji je raspored poznat. Takve metode obično zahtijevaju više od jedne slike scene ili neke specifične detalje u strukturi same scene. Određene samo-kalibrirajuće metode koriste samo podudaranja točaka u više pogleda bez potrebe za 3D lokacijama točaka ili pozicijom kamere. Kod njih se funkcije izobličenja



Slika 5: 3D kalibracijski uzorak

estimiraju zajedno s ekstrinzičnim parametrima pokreta kamere između slika. Većina tih metoda se temelji na činjenici da centralne kamere podliježu epipolarnoj geometriji. Postoje i samo-kalibrirajuće linijske metode koje se temelje na detekciji ravnih linija u sceni. One detektiraju zaobljene linije na slici koje odgovaraju poznato definiranim ravnim linijama. Parametri izobličenja se mogu estimirati pronalaskom transformacije koja najbolje pretvara snimljene zaobljene linije u ravne linije. Glavni nedostatak takvih metoda je da se mogu dobiti samo intrinzični parametri kamere jer one ne mogu estimirati ekstrinzične parametre između dva pogleda kamere.

2.3.3. Funkcije izobličenja kamere s ribljim okom

U praksi se stvaranje slike pomoću kamere s ribljim okom ne podudara s idealnim projekcijskim modelom. Potrebne su dodatne funkcije koje modeliraju već opisano izobličenje. Model radijalnog izobličenja za planarne kamere koristi sljedeće jednadžbe:

$$D_x = x_d(k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots) \quad (9)$$

$$D_y = y_d(k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots) \quad (10)$$

$$r = \sqrt{x_d^2 + y_d^2} \quad (11)$$

(x_d, y_d) su koordinate izobličenje slike, r je radijalna udaljenost između centra i piksela izobličene slike i (D_x, D_y) su izobličenja (engl *distortions*) u smjeru X i Y-osi. U nekim postupcima se koristi samo jedan koeficijent k_1 u jednadžbama 9 i 10, ali time se mogu modelirati samo manja izobličenja za planarne kamere, ali ne i za kamere s ribljim okom zbog velikog radijalnog pomaka.

Postoje funkcije izobličenja razvijene posebno za kamere s ribljim okom:

- Polinomni model ribljeg oka

$$\theta = \sum_{i=1}^{\infty} k_n r^n = k_1 r + k_2 r^2 + \dots \quad (12)$$

r je radijalna udaljenost od glavne točke (centra slike) i θ je kut između upadajuće zrake i optičke osi (Slika 3). Za simuliranje izobličenja leća ribljeg oka smatra se adekvatnim korištenje četvrtog reda modela.

- Model polja vida FOV (engl. *Field Of View*)

$$r_d = \frac{1}{\omega} \tan^{-1} \left(2r_u \tan\left(\frac{\omega}{2}\right) \right) \quad (13)$$

ω je polje vida kamere u radijanima, r_d je radijalna udaljenost od glave točke u izobličenoj slici i r_u je radijalna udaljenost od glavne točke u planarnoj slici. FOV model se temelji na jednostavnom optičkom modelu kamere s ribljim okom.

- Transformacija ribljeg oka

$$r_d = s \ln(1 + \lambda r_u) \quad (14)$$

s je skalar, a λ kontrolira količinu izobličenja.

- Model diobe (engl *division model*)

$$r_d = \frac{(l + 1) \sin \theta}{l + \cos \theta} \quad (15)$$

θ je kut između upadajuće zrake i optičke osi kamere (Slika 3), a l parametar izobličenja.

3. Model stvaranja slike pomoću uparenih kamera s ribljim okom i stereo kalibracija

4. Implementacija stereo kalibracije kamera s ribljim okom

5. Zaključak

6. Literatura

- [1] Steffen Abraham and Wolfgang Förstner. Fish-Eye-Stereo Calibration and Epipolar Rectification. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 59(5):278–288.
- [2] Vinay Kashyap Takmul Purushothama Raju. Fisheye Camera Calibration and Applications. Master's thesis, Arizona State University, 2014.
- [3] Slobodan Ribarić. *Računalni vid, Prvo predavanje*. Fakultet elektrotehnike i računarstva, 2008.
- [4] Richard Szeliski. Computer vision: Algorithms and applications. pages 23–29. Springer, September 2010.

7. Sažetak