Model kamere

Računarski vid

Momir Adžemović
momir.adzemovic@gmail.com

Istraživačka stanica Petnica

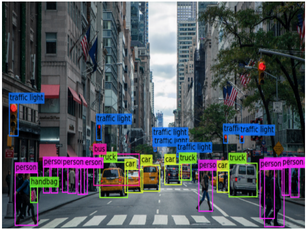
O meni

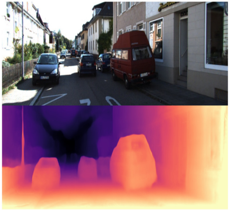
- Saradnik u nastavi i master student na Matematičkom fakultetu u Beogradu
- Istraživač u oblasti mašinskog učenja u Everseen-u u Beogradu

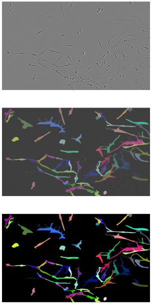
Računarski vid

Računarski vid (*eng. Computer Vision*) je „automatizovani“ proces izvlačenja informacija iz slika.

- Pozicija i orijentacija kamere
- Uklananje distorzije sa slika
- Detekcija objekata
- Prepoznavanje objekata
- Estimacija dubine/udaljenosti na slikama







Kako funkcioniše kamera?

Neophodno je da poznajemo neke osnovne pojmove iz linearne algebre i analitičke geometrije.

- Vektori i matrice
- Koordinatni sistem
- Afine i projektivne transformacije

Osnove analitičke geometrije

Vektori

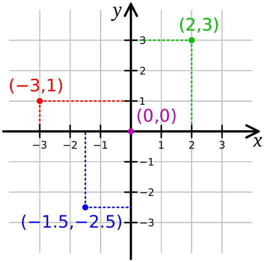
- **Vektor** je klasa ekvivalencije usmerenih duži. Svaka klasa ekvivalencije je određena pravcem, smerom i intenzitetom
- U ovom slučaju je dovoljno da vektor posmatramo kao niz skalara (vrednosti), a sama formalna definicija nam nije neophodna
- Primeri:
  - (2, 3)
  - (1.3, 10.3)
  - (13, 10, 2)
  - (1, 1, 1, 1, ..., 1)
  - (-2, 3)

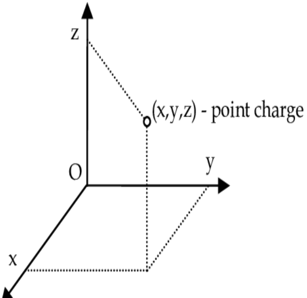
Vektori - Osnovne operacije i pojmovi

- Sabiranje: $(2, 3) + (1, 1) = (3, 4)$
- Oduzimanje: $(2, 3) - (1, 1) = (1, 2)$
- Množenje skalarom: $5 * (2, 3) = (10, 15)$
- Nula vektor: $(0, 0)$ (neutral za sabiranje i oduzimanje)
- Skalarni proizvod: $(2, 3) \cdot (4, 2) = 2 * 4 + 3 * 2 = 14$

Tačke

- Tačke (koordinate) u ravni (2D) i prostoru (3D) možemo da predstavljamo vektorima
- Da li nam je jedan vektor dovoljan da opišemo tačku?
  - Sama vrednost (2, 3) nam ne znači puno ako ne znamo u odnosu na šta gledamo
  - Neophodno je da definišemo centar našeg sistema koordinata
  - Tada svaki vektor predstavlja rastojanje od centra koordinatnog sistema po svakoj od osa
  - **Kartezijev koordinatni sistem**





Matrice

- Matrica je tabela skalara
- Pogodna za opisivanje matematičkih objekata i njihovih osobina
- Matrica ima $N \times M$ skalara, gde je N broj redova, a M broj kolona

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} -1 & 3 & 1 \\ 4 & 5 & 10 \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} 0 & 1.2 & 1 \\ 1 & -2 & 1.1 \end{bmatrix}$$

Matrice - Osnovne operacije i pojmovi

Sabiranje:

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 10 & -3 & 1 \\ -3 & 2 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 11 & -1 & 4 \\ 1 & 7 & 7 \end{bmatrix}$$

Oduzimanje:

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \end{bmatrix} \text{-} \begin{bmatrix} 10 & -3 & 1 \\ -3 & 2 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -9 & 5 & 2 \\ 7 & 3 & 5 \end{bmatrix}$$

Množenje skalarom:

$$3 \times \begin{bmatrix} 10 & -3 & 1 \\ -3 & 2 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 30 & -9 & 3 \\ -9 & 6 & 3 \end{bmatrix}$$

Matrice - Osnovne operacije i pojmovi (2)

Množenje po elementima:

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 10 & -3 & 1 \\ -3 & 2 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10 & -6 & 3 \\ -12 & 10 & 6 \end{bmatrix}$$

Nula matrica (neutral za sabiranje i oduzimanje):

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Matrice - Osnovne operacije i pojmovi (3)

Množenje:

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \\ 5 & 6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 22 & 28 \\ 49 & 64 \end{bmatrix}$$

Postupno:

$$\begin{bmatrix} 1 * 1 + 2 * 3 + 3 * 5 & 1 * 2 + 2 * 4 + 3 * 6 \\ 4 * 1 + 5 * 3 + 6 * 5 & 4 * 2 + 5 * 4 + 6 * 6 \end{bmatrix}$$

- Polje *[i, j]* u rezultujućoj matrici se dobija kao skalarni proizvod *i*-tog reda i *j*-te kolone
- Množenjem matrice dimenzije $N \times M$ i $M \times K$ se dobija matrica dimenzije $N \times K$
- Množenje je definisano samo ako se broj kolona leve matrice i broj redova desne matrice poklapa!

Matrice - Osnovne operacije i pojmovi (4)

Množenje matrica nije komutativno (zamenom mesta operanada se ne dobija uvek isti rezultat):

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \\ 5 & 6 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9 & 12 & 15 \\ 19 & 26 & 33 \\ 29 & 40 & 51 \end{bmatrix}$$

- Zamenom redosleda operadana u opštem slučaju može da se dobija nedefinisana operacija
- Primer: Množenje matrica dimenzija (10, 2) i (2, 3) je definisano, ali (2, 3) i (10, 2) nije

Matrice - Transponovane matrice

Transponovana matrica A^T matrice A se dobija zamenom kolona i redova:

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \\ 5 & 6 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix}$$

Kvadratne matrice

Matrica je kvadratna ako ima jednak broj redova i kolona

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 2 & 10 \\ 3 & 4 & 30 \\ 5 & 6 & 100 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 100 \end{bmatrix}$$

- Množenjem dve kvadratne matrice iste dimenzije dobijamo kvadratnu matricu iste dimenzije
- Ako permutujemo operadne, množenje je i dalje definisano (ali operacija i dalje nije komutativna)

Kvadratne matrice - Neutral i inverz za množenje

Za kvadratne matrice postoji neutral za množenje:

$$I_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \qquad A \times I = I \times A = A$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1*1+2*0 & 1*0+2*1 \\ 3*1+4*0 & 3*0+4*1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{bmatrix}$$

Takođe može postoji i inverz (ali i ne mora) za kvadratnu matricu:

$$A \times A^{-1} = A^{-1} \times A = I$$

Matrice koje nemaju inverz su **singularne**

Vektori kao specijalni slučajevi matrica

Vektore možemo da posmatramo kao specijalan slučaj matrica dimenzije $N \times 1$

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 \\ 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1.2 \\ 3.3 \end{bmatrix}$$

Možemo i da množimo vektore matricama:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 \\ 3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 \\ 2 \end{bmatrix}$$

U slučaju da vektori predstavljaju tačke, onda množenjem tih vektora matricama vršimo transformaciju tačaka u prostoru

Afine transformacije u ravni

Koordinatni sistem slika

Koordinatni sistem slike se posmatra od gornjeg levog ugla, gde je y osa orijentisana ka dole:

- Koordinata $(0, 0)$ u gornjem levom uglu odgovara zelenoj tački (centru koordinatnog sistema slike)
- Tačka u donjem desnom uglu ima koordinatu $(H - 1, W - 1)$, gde je $H \times W$ rezolucija slike

Linearne transformacije

Linearna funkcija u jednoj dimenzija je funkcija oblika:

- $f(x) = a \cdot x + b$
- Primer:
  - $f(x) = 2 \cdot x + 3$,
  - $f(4) = 2 \cdot 4 + 3 = 11$

U ravni (2D prostor) možemo da izvršimo transformaciju korišćenjem dve funkcije f i g:

- $\hat{x} = f(x, y) = a \cdot x + b \cdot y + t_x$
- $\hat{y} = g(x, y) = c \cdot x + d \cdot y + t_y$

Gde su x i y koordinate pre transformacije (f, g), a $\hat{x}$ i $\hat{y}$ koordinate nakon transformacije.

Linearne transformacije (2)

- $\hat{x} = f(x, y) = a \cdot x + b \cdot y + t_x$
- $\hat{y} = g(x, y) = c \cdot x + d \cdot y + t_y$

Kombinaciju (f, g) možemo kompaktnije da zapišemo pomoću vektora i matrica:

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \cdot x + b \cdot y + t_1 \\ c \cdot x + d \cdot y + t_2 \end{bmatrix}$$

Prethodnu formulu nazivamo **transformacija koordinata tačaka u ravni**, a vektor (t_x, t_y) nazivamo vektorom translacije

Određivanje transformacije na osnovu uparenih tačaka

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix}$$

Koliko uparenih tačaka (x, y) i $(\hat{x}, \hat{y})$ nam je neophodno da odredimo komponente transformacije?

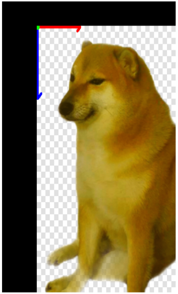
- Imamo 6 parametara (6 nepoznatih)
- Svaki par uparenih tačaka (x, y) i $(\hat{x}, \hat{y})$ nam daje dve jednačine (jednu po x i jednu po y koordinati)
- To znači da nam je potrebno da imamo 3 para uparenih tačaka

Translacija

Translacija predstavlja pomeranje tačke za vektor $T = (t_x, t_y)$

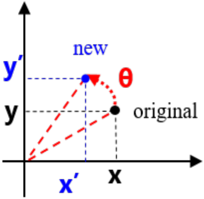
$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x + t_x \\ y + t_y \end{bmatrix}$$

Primer: Translacija slike za vektor $(100, 200)$:



Rotacija

Rotacija je malo komplikovanija, ali i dalje možemo da izvedemo formulu pomoću trigonometrije



$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos\theta & -sin\theta \\ sin\theta & cos\theta \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

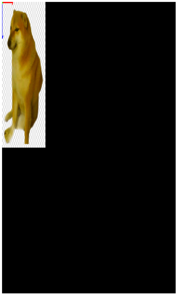
Rotacija oko tačke

- Prethodni primer je rotacija oko koordinatnog početka koji se nalazi u gornjem levom uglu
- Ako želimo da rotiramo oko centra slike, moramo da pomerimo centar u koordinatni sistem, izvršimo transformaciju i onda vratimo centar na prvobitnu poziciju

Skaliranje

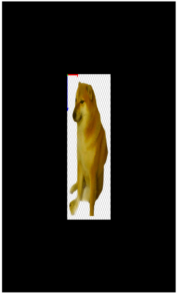
- Skaliranje menja dimenzije objekata na sceni.
- Ukoliko je podjednako skaliranje po x i po y osi, onda se ta transformacija zove *homotetija*.

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_x & 0 \\ 0 & \lambda_y \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \qquad S_{\lambda_x, \lambda_y} = \begin{bmatrix} \lambda_x & 0 \\ 0 & \lambda_y \end{bmatrix}$$



Skaliranje oko tačke

- Isto kao i rotacija oko tačke, možemo da izvršimo skaliranje u odnosu na center slike umesto gornji levi ćošak



Refleksija

Varijante:

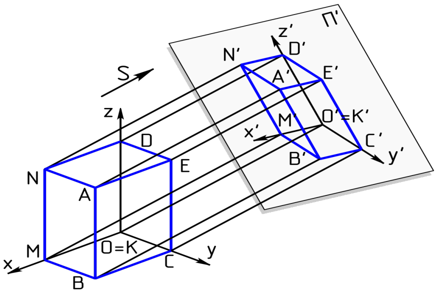
- Refleksija oko x ose
- Refleksija oko y ose
- Refleksija oko koordinatnog početka (kompozicija prethodna dva)
- Refleksija oko tačke (centra slike)

$$R_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \qquad R_y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \qquad R_o = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

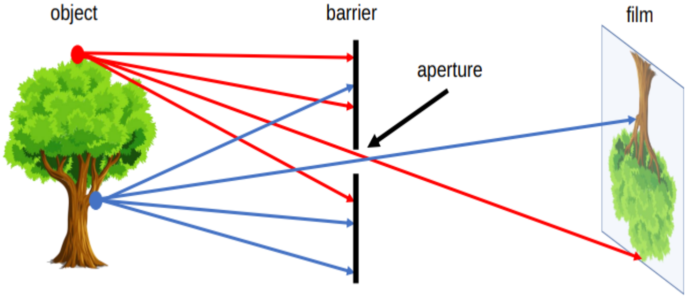
Model kamere kroz rupicu
(*Pinhole Camera Model*)

Projekcija

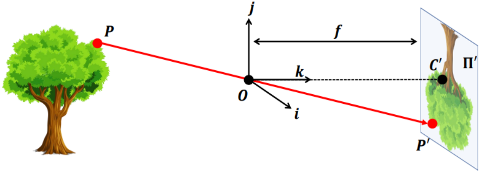
- Projekcija je preslikavanje jednog prostora dimenzije N u prostor dimenzije manje od N
- Primer: Preslikavanje objekta iz stvarnog sveta (3D) na sliku (2D)



Model kamere kroz rupicu



Model kamere kroz rupicu - Formalna reprezentacija



- Kamera se nalazi u koordinatnom početku O referentnog koordinatnog sistema *(i, j, k)*
- Centar slike C' se nalazi na osi k na udaljenosti f od tačke O
- Tačka $P(x, z, y)$ je tačka u realnom svetu koja se projektuje u tačku $P'(\hat{x}, \hat{y})$ na slici

Model kamere kroz rupicu - Veza između P i P'

- Neka je tačka P'' dobijena projekcijom tačke P na osu k
- Trouglovi $\triangle P'P''O$ i $\triangle P'C'O$ su slični
- Dobijamo sledeću jednakost: $P''O : OC' = PP'' : P'C'$
- Sledeće važi: $P''O = z$, $OC' = f$, $PP'' = y$, $P'C' = \hat{y}$
- Odatle sledi: $z : f = y : \hat{y}$ tj. $\hat{y} = \frac{y}{z} \cdot f$
- Analogno važi i: $\hat{x} = \frac{x}{z} \cdot f$

Ako su nam poznate koordinate tačke P, C' i vrednost f, onda možemo da odredimo i tačku P'

Model kamere kroz rupicu - Udaljenost od kamere

- $\hat{y} = \frac{y}{z} \cdot f$, $\hat{x} = \frac{x}{z} \cdot f$
- Što je z veće (što je objekat u stvarnom svetu dalji) to su koordinate $\hat{x}$ i $\hat{y}$ manje (to je objekat na slici manji)

Model kamere kroz rupicu - Kompaktan zapis preslikavanja

Da li možemo da preslikavanje P u P' napišemo kompaktno preko množenja matrice?

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x}{z} \cdot f \\ \frac{y}{z} \cdot f \end{bmatrix} = \mathrm{M} \times \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

U ovakvom obliku ne možemo. Možda ako promenimo format nekih tačaka?

Homogene koordinate u 2D

- **Homogena tačka** koja odgovara tački (x, y) u ravni je $(x, y, 1) \widetilde{=} \alpha \cdot (x, y, 1)$
- Homogene tačke imaju skup osobina koje ih čine pogodnije za rad u odnosu na tačke Kartezijevog koordinatnog sistema
- U projektivnoj geometriji se uglavnom radi sa homogenim koordinatama, jer na elegantan način predstavljamo vezu između stvarnog sveta i projektivne ravni

Homogene koordinate u 2D - Osobine

- Za fiksirano α geometrijski smisao izraza $\alpha(x, y, 1)$ je skup tačaka na pravi koje se slikaju u istu tačku na projektivnoj ravni (slici)
- Homogene koordinate možemo jednostavno preslikavamo u „obične“ koordinate:
  - Primer: $A_h = (a, b, c)$
  - $x = \frac{a}{c}$
  - $y = \frac{b}{c}$
  - Šta ako je $c = 0$? Tada kažemo da se ta tačka nalazi u beskonačnosti.
- U Projektivnog geometriji se sve paralelne prave seku u beskonačnosti

Model kamere kroz rupicu - Osnovni oblik

Da li možemo da preslikavanje P u P' napišemo kompaktno preko množenja matrice?

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ 1 \end{bmatrix} = \alpha \cdot \begin{bmatrix} x \cdot f \\ y \cdot f \\ z \end{bmatrix} = \mathrm{M} \times \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

- Vrednost za α je $\frac{1}{z}$ kada uporedimo sa prethodnim jednačinama
- Lako se proverava da M (matrica kamere) ima sledeći oblik

$$\mathrm{M} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Model kamere kroz rupicu - Pikseli

- Prethodni oblik matrice kamere ne uzima u obzir da je slika predstavljana pikselima (kvadratićima), a stvarni svet je u centimetrima
- Neophodno je da uvedemo preslikavanje kao razmera piksela i centimetara
- Ta razmera nije nužno ista po x i po y osi (pikseli ne moraju da budu kvadratići)
- Definišemo te vrednosti kao r_x i r_y

$$\mathrm{M} = \begin{bmatrix} f \cdot r_x & 0 & 0 \\ 0 & f \cdot r_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Model kamere kroz rupicu - Translacija koordinatnog početka slike

- Do sada smo pretpostavljali da se koordinatni početak slike nalazi u samom centru slike
- Kao što smo videli, na računarima se uglavnom tako ne predstavljaju slike, već se uzima levi gornji (donji) ćošak
- U odnosu na taj ćošak, sve tačke koje se projektuju na sliku su translirane za vektor (c_x, c_y) do centra C'
- Prednost homogenih koordinata je što translaciju možemo kompaktnije da zapišemo u okviru 3×3 matrice

$$\mathrm{M} = \begin{bmatrix} f \cdot r_x & 0 & c_x \\ 0 & f \cdot r_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Model kamere kroz rupicu - Unutrašnji parametri

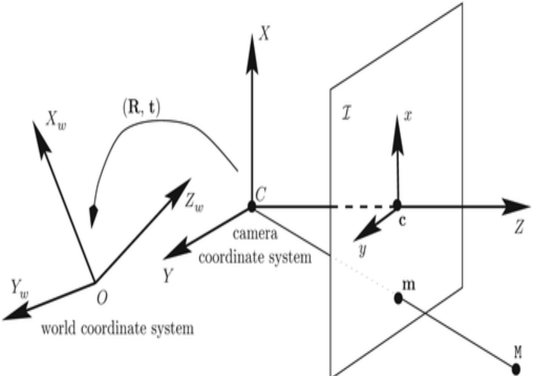
$$M = \begin{bmatrix} f \cdot r_x & s & c_x \\ 0 & f \cdot r_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- Parameter s je parameter smicanja (uglavnom teži nula kod kamera)
- Prethodna matrica predstavlja pojednostavljeni oblik unutrašnje parametre kamere (ne uzimamo u obzir distorziju)
- Unutrašnji parametri su dovoljni u situacijama kada se koordinatni sistem kamere i stvarnog sveta poklapaju
- To je veoma jaka pretpostavka i skoro nikada ne važi

Model kamere kroz rupicu - Spoljašnji parametri

Preslikavanje koordinatnog sistema stvarnog sveta u koordinatni sistem kamera možemo da izvedemo kompozicijom rotacije R i translacije T

- Transliramo koordinatni početak kamere u koordinatni početak stvarnog sveta
- Modifikujemo orijentaciju rotacijom



Kompozicija transformacija i množenje matrica

Kompoziciju transformacija možemo da izvedemo množenjem odgovarajućih matrica transformacija (kompozicija rotacije i translacije):

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 3 \\ 0 & 1 & 4 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} cos\frac{\pi}{3} & -sin\frac{\pi}{3} & 0 \\ sin\frac{\pi}{3} & cos\frac{\pi}{3} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos\frac{\pi}{3} & -sin\frac{\pi}{3} & 3 \\ sin\frac{\pi}{3} & cos\frac{\pi}{3} & 4 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Model kamere kroz rupicu - Spoljašnji parametri (2)

- Pretpostavljamo da su nam poznate koordinate P_{cam} kamere u stvarnom koordinatnom sistemu i da nam je poznata rotacija koja dovodi orijentaciju koordinatnog sistema stvarnog sveta u koordinatni sistem kamere
- Primenom translacije -P_{cam} dovodimo koordinatni početak kamere u koordinatni početak stvarnog sveta
- Primenom rotacije nakon toga usklađujemo orijentacije
- Primenom matrice M nakon toga vršimo projekciju na sliku

$$K = R \times T_{-P_{cam}}$$

- Napomena: Ove transformacije su u 3×3 dimenzije
- Da bi se translacija u 3D svetu svela na množenje matrica moraju da se koriste homogene koordinate za prostor (vektori dužine 4)

Model kamere kroz rupicu - Konačan oblik matrice kamere

Konačan oblik jednačine kamere:

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ 1 \end{bmatrix} = M \times R \times T_{-P_{cam}} \times \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}$$

- M je matrica unutrašnjih parametara
- R i $T_{-P_{cam}}$ su spoljašnji parametri
- Matrica $M \times R \times T_{-P_{cam}}$ je matrica dimenzije 3×4

Kalibracija kamere

Kalibracija kamare je proces dobijanja unutrašnjih i spoljašnjih parametara kamere tj. dobijanja matrice kamere K

- Matrica K ima $3 \times 4 = 12$ parametara (11 ako p_{34} fiksiramo na 1)
- Dekomponovana matrica se sastoji iz M (5 parametra), R (3 parametra) i $T_{-P_{cam}}$ (3 parametra)

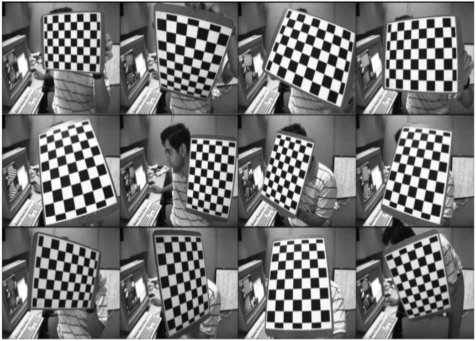
$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}$$

- Za svaki par uparenih tačaka iz stvarnog sveta i slike imamo 2 jednačine
- Ako imamo 11 nepoznatih paramatera, onda nam je potrebno barem 11 jednačina (6 parova) - DLT algoritam

Kalibracija kamere - Zengova metoda

Zengova metoda nam omogućava da izvršimo kalibraciju kamere korišćenjem slike šahovske table

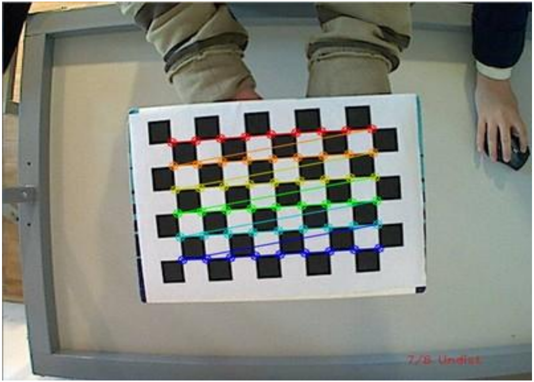
- Kao osnovu koristi DLT algoritam
- Glavna pretpostavka je da su sve tačke na slici u istoj ravni
- Neophodno je barem 3 slika istih rezolucija iz različitih uglova (što više to bolje)



Kalibracija kamere - Zengova metoda (2)

Zašto šahovska tabla?

- Jednostavno je da se detektuju unutrašnji čoškovi zbog velike kontrasti
- Kao dodatna olakšica za detekciju je unos dimenzije same šahovske (u odnosu na unutrašnje uglove)



Literatura

- Stanford CS231A: Computer Vision, From 3D Reconstruction to Recognition (Winter 2022)
- Programming Computer Vision with Python, Jan Erik Solem
- Multiple View Geometry in Computer Vision, Richard Hartley, Andrew Zisserman
- Geometrija za informatičare, Tijana Šukilović, Srđan Vukmirović