

INTEGRACIJA IN KALIBRACIJA STROJNEGA VIDA V SISTEMU Z ROBOTSKO MANIPULACIJO

Tomaž KORITNIK, Darko KORITNIK
DAX d.o.o.

POVZETEK

Strojni vid je v industrijskih robotskih aplikacijah standardno orodje in večina proizvajalcev robotov ponuja svoje rešitve, ki so integrirane v robotsko razvojno okolje. Zaradi tega je te sisteme praviloma preprosto kalibrirati, uporabljati in nastavljeni. Če želimo v sistemu združiti strojni vid in robot različnih proizvajalcev, pa je treba izvesti kalibracijo po računskem postopku, ki je odvisen od konfiguracije kamere in robota. Prispevek prikazuje kalibracijo fiksne kamere za zajem planarne lege objektov in odjem z robotom s pomočjo inverzne homogene transformacije ter kalibracijo s psevdoinverzno matriko.

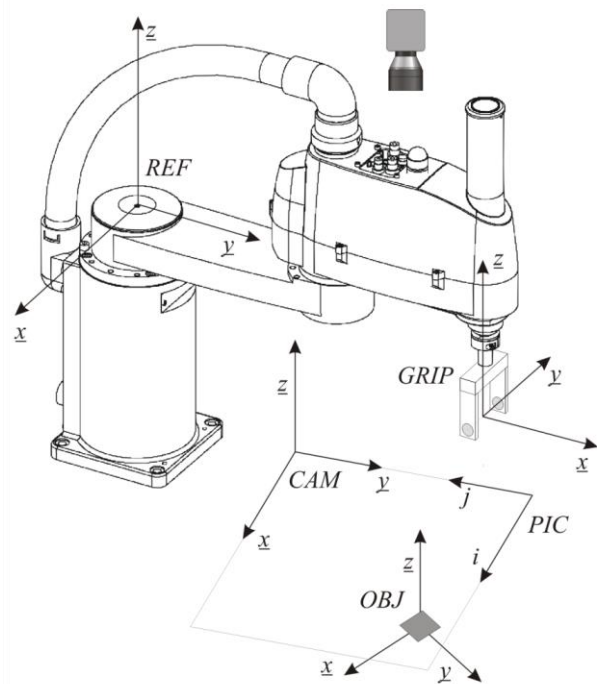
1. UVOD

Uporaba strojnega vida v povezavi z robotsko manipulacijo je standardna rešitev, ki od uporabnika ob predpostavki, da obvladuje obe področji, ne zahteva posebnih dodatnih znanj, saj proizvajalci robotskih sistemov v večini primerov poskrbijo za nizkonivojsko integracijo, ki preko intuitivnega vmesnika omogoča hitro kalibriranje, programiranje in nastavljanje ter preprosto uporabo v novem razvojnem okolju. Če želimo v sistemu združiti nekompatibilne komponente za manipulacijo in vid, pa moramo integracijo izvesti po računskem postopku, ki sledi neposredno iz geometrijskega opisa problema. Glavni poudarek pri robotskem vidu je na razpoznavanju objektov ali vzorcev ter njihovih leg v prostoru. Poleg obdelave same slike je torej bistvena umeščenost slikovnega področja v delovno območje robotskega manipulatorja. Kamero je treba kalibrirati glede na robot, kar pomeni podati odgovor v matematičnem zapisu na vprašanje, kje leži in kakšno je slikovno področje kamere glede na manipulator.

V kontekstu avtomatizacije prevladujejo planarni problemi, torej razpoznavanje objektov na znani ravnini/globini, robotska manipulacija s pomočjo strojnega vida pa predstavlja del rešitve praviloma časovno občutljivega in dragega procesa manipulacije in transporta objektov iz neurejenih stanj v urejene in definirane lege.

2. GEOMETRIJSKI OPIS

Medsebojno lego objektov v prostoru opišemo tako, da vsakemu objektu določimo lasten koordinatni sistem, ki je vedno fiksni glede na objekt. Medsebojna lega objektov je enaka medsebojni legi njihovih koordinatnih sistemov. Koordinatne sisteme postavimo kot kaže slika 1.



Slika 1: Postavitev koordinatnih sistemov.

Referenčni koordinatni sistem REF je fiksiran v prostoru, lahko ga postavimo kamorkoli, najbolj priročno ga je postaviti v koordinatno izhodišče baze robota. Robotsko orodje označimo s sistemom GRIP, ki predstavlja vrh kinematične verige robotske roke, lego objekta pa s sistemom OBJ. Sedaj vključimo še lego kamere. Ta za kalibracijo ni bistvena, bolj pomembna je lega slikovnega področja, zato v njegovo koordinatno izhodišče postavimo sistem CAM. Ti sistemi so vsi desnosučni in v enakih enotah (mm). Koordinatni sistem slike nekalibriranega slikovnega področja ima za enoto slikovni element in ima po konvenciji izhodišče v zgornjem levem kotu slike, označimo ga s PIC.

$${}^A H_{\underline{B}} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & x \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{en. 1})$$

Za opis medsebojne lege koordinatnih sistemov bomo uporabili homogene transformacije [1]. V prikazanem primeru imajo vse matrike enako obliko (en. 1), ki je nekoliko poenostavljena glede na splošno, saj so osi z vseh koordinatnih sistemov vzporedne in je torej za opis vseh medsebojnih rotacij dovolj samo en kot α okrog osi z. Medsebojne lege koordinatnih sistemov v homogenem zapisu so enostavno izražene kot multiplikacija homogenih transformacij:

$${}^i H_{\underline{n}} = \prod_i^{n-1} {}^i H_{i+1} {}^{i+1} H_{i+2} \dots {}^{n-1} H_n, \quad (\text{en. 2})$$

Preko kalibrirane kamere lahko izrazimo lego objekta, ki je znana le kameri, tudi v referenčnem koordinatnem sistemu robota:

$${}^{REF} H_{\underline{GRIP}} = {}^{REF} H_{\underline{CAM}} {}^{CAM} H_{\underline{PIC}} {}^{PIC} H_{\underline{OBJ}} {}^{OBJ} H_{\underline{GRIP}} \quad (\text{en. 3})$$

Dana postavitev omogoča poenostavitvi:

- Izmed vseh leg orodja GRIP nas zanima le tista, ko orodje prime želen objekt OBJ; takrat sta legi GRIP in OBJ poravnani

(istoležna sistema) in transformacija med njima dobi obliko enotske matrike.

- Razlika med sistemoma CAM in PIC je vedno le v predznaku ($j \rightarrow -y$) ter faktorju skaliranja med slikovnimi elementi in milimetri, ki ga enostavno izračunamo samo enkrat (npr. z meritvijo znane milimetske dimenzije objekta v slikovnih elementih), zato za sistem slike lahko privzamemo kar CAM.

Z upoštevanjem poenostvitev se en. 3 skrči v:

$${}^{REF} H_{\underline{OBJ}} = {}^{REF} H_{\underline{CAM}} {}^{CAM} H_{\underline{OBJ}} \quad (\text{en. 4})$$

3. KALIBRACIJA Z INVERZNO HOMOGENO TRANSFORMACIJO

Teoretično najenostavnejša pot do kalibrirane kamere sledi kar direktno iz en. 4; objekt postavimo na poljubno mesto v vidno polje kamere. Če to storimo z robotom, lahko neposredno odčitamo lego vrha robota v trenutku, ko ta odloži objekt in dobimo ${}^{REF} H_{\underline{OBJ}}$. To omogoča vsak uporabniški vmesnik za vodenje robotov in v splošnem dobimo 3 koordinate za pozicijo ter 3 za rotacijo. V prikazanem primeru gre za 3 koordinate pozicije in en kot rotacije okrog osi z. Nato robot umaknemo iz vidnega polja in lego odloženega objekta zajamemo s kamero ter tako dobimo ${}^{CAM} H_{\underline{OBJ}}$. Zdaj sta znani 2 od treh matrik iz en. 4 in ${}^{REF} H_{\underline{CAM}}$ izrazimo kot:

$${}^{REF} H_{\underline{CAM}} = {}^{REF} H_{\underline{OBJ}} {}^{CAM} H_{\underline{OBJ}}^{-1} \quad (\text{en. 5})$$

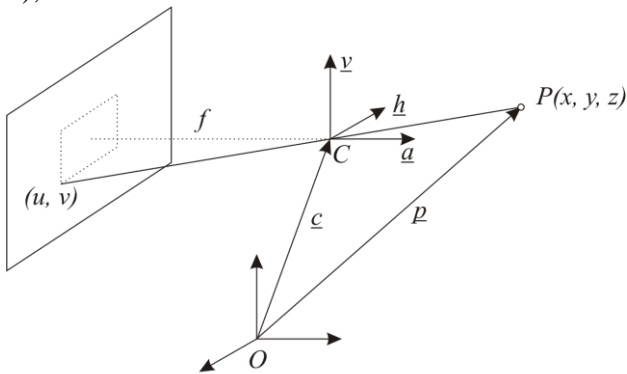
To je matematični odgovor na vprašanje, kje leži slikovno področje kamere glede na robot. Vprašanju, kakšno je to področje, pa je zadoščeno s podatkom o skaliranju med slikovnimi elementi in milimetri, ki je neposredno odvisen od goriščne razdalje uporabljenega objektiva in oddaljenosti od delovne ravnine.

Za kalibracijo smo uporabili geometrijsko rešitev, ki izhaja iz opisa sistema, ki je natanko determiniran, kar pomeni, da vsebuje le natanko toliko informacije, kot je nujno potrebno za rešitev. Ker ni redundance, ne vemo kako točna

in natančna je dobljena rešitev. Potrebno je torej pazorno in natančno pozicioniranje robota in objekta ter zanesljiv algoritem za določitev lege objekta glede na kamero. Velikost pogreškov se opazi šele ob uporabi rešitve, ko dobljeno matriko uporabimo v obratni smeri za preračun lege objekta OBJ iz sistema CAM v sistem REF in spremljamo pogreške robota glede na dejansko lego objektov. Najbolj teoretično preprosta rešitev se ne izkaže kot najbolj praktično uporabna.

4. KALIBRACIJA S PSEVDONINVERZNO MATRIKO

Pri kalibraciji poizkušamo najti sistem, ki bo poleg rešitve vseboval tudi redundantno informacijo o tem, kako dobra je dobljena rešitev. Kamero lahko opišemo kot vektorski model (slika 2),



Slika 2: Vektorski model kamere.

preslikavo med koordinatami kamere in točko v prostoru pa v matrični obliki [2]:

$$[u, v, 1] \cdot \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} = w'''(x, y, 1), \quad (\text{en. 6})$$

Če to matrično enačbo zapišemo kot sistem in vstavimo izraženo konstanto w''' , dobimo:

$$\begin{aligned} u_i S_{11} + v_i S_{21} + S_{31} - u_i x_i S_{13} - v_i x_i S_{23} - S_{33} x_i &= 0, \\ u_i S_{12} + v_i S_{22} + S_{32} - u_i y_i S_{13} - v_i y_i S_{23} - S_{33} y_i &= 0, \end{aligned} \quad (\text{en. 7})$$

Sistem spet zapišemo v matrični obliki:

$$\begin{bmatrix} u_1 & v_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_1 x_1 & -v_1 x_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_n & v_n & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_n x_n & -v_n x_n \\ 0 & 0 & 0 & u_1 & v_1 & 1 & -u_1 y_1 & -v_1 y_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & u_n & v_n & 1 & -u_n y_n & -v_n y_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{11} \\ S_{21} \\ S_{31} \\ S_{12} \\ S_{22} \\ S_{32} \\ S_{13} \\ S_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \\ y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}$$

(en. 8)

Zaradi homogenosti privzamemo, da je element $S_{33} = 1$, ali pa vsakega od ostalih elementov skaliramo z deljenjem z S_{33} , kar na sistem enačb nima vpliva. Sistem enačb (en. 8) je zapisan v obliki $\underline{A}x = \underline{B}$ in je predeterminiran, zato rešitev za x poiščemo z uporabo psevdoinverzne matrike

$$\underline{x} = (\underline{A}^T \underline{A})^{-1} \underline{A}^T \underline{B} \quad (\text{en. 9})$$

$(\underline{A}^T \underline{A})^{-1} \underline{A}^T$ je psevdoinverzna ali Moore-Penrose inverzna matrika matrike A [2] in vrne rešitev parametrov z metodo najmanjših kvadratov za sistem (en. 8).

Polozicije točk v referenčnem in koordinatnem sistemu kamere dobimo podobno kot pri metodi z inverzno transformacijo, le da lahko to pot uporabimo več točk, saj večanje števila točk povečuje verjetnost, da bo kalibracija natančnejša. S to metodo dobimo sicer le pozicije točk v referenčnem koordinatnem sistemu, ki ustrezajo pozicijam v sistemu kamere. Kot rotacije, ki je potreben za popoln opis lege, pa lahko tudi tu izrazimo s funkcijo \arctan , pri čemer lahko vzamemo kateri koli par točk, rezultat pa je čim natančnejši, tem bolj narazen ležita izbrani točki. Za točnejši rezultat lahko upoštevamo več parov točk in vzamemo povprečje izračunanih kotov.

5. ZAKLJUČEK

Pokazali smo, da je integracija strojnega vida v robotsko manipulacijo le razširitev geometrijskega problema direktne kinematike

mehanizmov. Ker poznamo teoretični opis ter rešitev problema, vsi potrebni podatki pa so pridobljivi na enostaven način (lega objekta glede na robot in glede na kamero), ni ovir, da ne bi v sistem združili v izhodišču nekompatibilnih komponent različnih proizvajalcev. Potrebne so le minimalne možnosti programske komunikacije in programiranja. Od dveh prikazanih načinov za kalibracijo kamere ima praktično uporabno vrednost način s psevdoinverzno matriko, ki poleg kalibracije ob zadostnem številu točk ponuja tudi dobro oceno o natančnosti kalibracije. Z večanjem števila točk kvaliteta kalibracije narašča, vendar le do neke meje, saj prikazani vektorski model kamere zgolj približno opisuje realnost (za sisteme z večjo zahtevano točnostjo in natančnostjo je nujno upoštevati vsaj še model radialnega popačenja objektiva).

V industriji še prevladuje 2D robotski vid (hitrost, zanesljivost, preprostost), prihodnost pa je gotovo tridimenzionalna. Zanesljiv Bin-picking sistem (pobiranje poljubno na gosto naloženih in prekrivajočih se objektov) ima predispozicijo, da poenostavi in poceni proces transporta objektov v urejena stanja. V industrijski avtomatizaciji je oboje odločilno.

Literatura

- [1] Bajd, T.: Robotika, Založba FE in FRI, 2002.
- [2] Nagchaudhuri, A. Thint, M. Garg, D. P.: Camera-Robot Transform for Vision-Guided Tracking in a Manufacturing Workcell, Journal of Intelligent and Robotic Systems, Vol. 5 (1992), str. 283 - 298.