

KALIBRACIJA STACIONARNE KAMERE PRI ROBOTSKE MANIPULACIJI

Tomaž Koritnik, Darko Koritnik

Izvleček:

Industrijski strojni vid je v avtomatizaciji standardno orodje. Proizvajalci in ponudniki robotske manipulacije ponujajo svoje rešitve, ki so integrirane v njihova lastna razvojna okolja. Take sisteme je zaradi visoke stopnje integracije preprosto kalibrirati, uporabljati in nastavljati. Združevanje komponent različnih proizvajalcev v delujoč sistem po meri pa zahteva izvedbo kalibracije po računskem postopku, ki je odvisen od konfiguracije kamere in robota. Prikazali bomo kalibracijo stacionarne kamere, vzporedne z delovno ravnino robotskega manipulatorja in odjem a) s pomočjo inverzne homogene transformacije ter b) kalibracijo s psevdoinverzno matriko.

Ključne besede:

strojni vid, robotska manipulacija, kalibracija, stacionarna kamera

1 Uvod

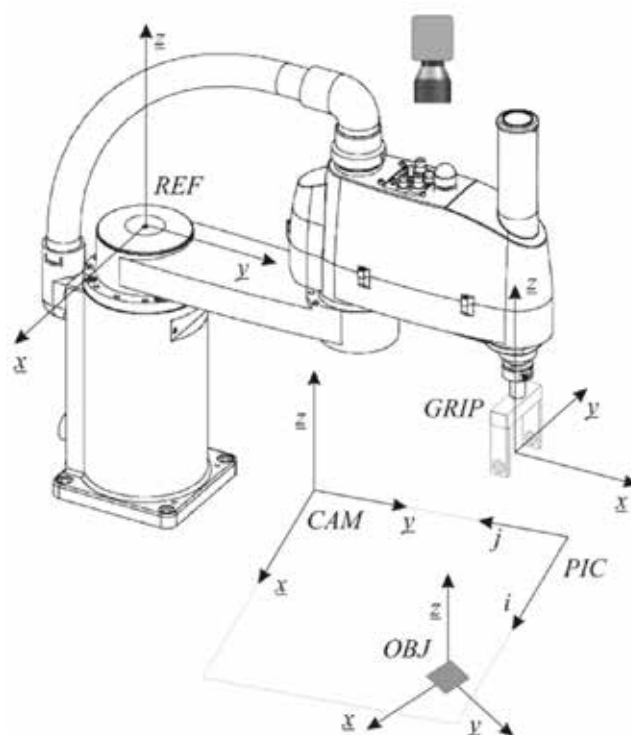
Strojni vid in robotska manipulacija, združena v enovito razvojno okolje, predstavljata v industriji standardno rešitev. Proizvajalci robotskih sistemov praviloma poskrbijo za uporabniku prijazno nizko- in visokonivno integracijo, ki v enovitem razvojnem okolju omogoča hitro kalibriranje, programiranje in nastavljanje ter preprosto uporabo. Po drugi strani združevanje nekompatibilnih komponent za manipulacijo in vid zahteva izvedbo integracije po računskem postopku, ki sledi neposredno iz geometrijskega opisa problema [1]. Glavni poudarek pri robotskem vidu je na razpoznavanju leg objektov ali vzorcev v prostoru [2]; bistvena je umeščenost slikovnega področja v delovno območje robotskega manipulatorja. Kamero kalibriramo glede na robot, kar pomeni podati v matematičnem zapisu odgovor na vprašanje, kje leži in kakšno je slikovno področje kamere glede na manipulator. Omenimo, da kljub pospešenemu razvoju in prodoru 3D-vida v kontekstu avtomatizacije prevladujejo planarni problemi, torej razpoznavanje objektov na znani ravnini in višini, čeprav temu velikokrat sledi robotska manipulacija v urejena stanja v vseh prostostnih stopnjah.

2 Geometrijski opis

Vsaki komponenti v sistemu priprimo lasten koordinatni sistem, ki je vedno fiksni glede na objekt. Medsebojna lega objektov je enaka medsebojni legi njihovih koordinatnih sistemov. Koordinatne sisteme v sistemu s fiksno stacionarno kamero postavimo, kot

kaže *slika 1*. Prikazan je 4-osni SCARA mehanizem, vendar bi splošni opis z zamenjavo robotske kinematike ostal nespremenjen.

Referenčni koordinatni sistem REF je fiksno postavljen poljubno v prostoru. Matematični zapis nekoliko skrajšamo, če ga postavimo v koordinatno izhodišče baze robota. Robotsko orodje označimo s sistemom GRIP, ki predstavlja vrh kinematične verige robotske roke, lego objekta pa s sistemom OBJ. Fizična lega kamere za kalibracijo ni bistvena; pomembna



Slika 1: Postavitev koordinatnih sistemov

Dr. **Tomaž Koritnik**, univ. dipl. inž., **Darko Koritnik**, univ. dipl. inž., oba DAX, d. o. o., Trbovlje

je lega slikovnega območja, zato sistem kamere CAM postavimo v koordinatno izhodišče slikovnega območja. Vsi koordinatni sistemi so desnosučni in v enakih enotah (mm), razen koordinatni sistem slike nekalibriranega slikovnega območja, ki ima za enoto slikovni element in po konvenciji izhodišče v zgornjem levem kotu slike. Označimo ga s PIC. Za opis medsebojne lege koordinatnih sistemov bomo uporabili homogene transformacije [3]. V prikazanem primeru imajo vse matrike enako obliko (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.

$${}^A H_B = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & x \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Medsebojne lege koordinatnih sistemov v homogenem zapisu so izražene kot multiplikacija homogenih transformacij:

$${}^i H_n = \prod_i^{n-1} {}^i H_{i+1} {}^{i+1} H_{i+2} \dots {}^{n-1} H_n \quad (2)$$

Če je kamera kalibrirana, lahko izrazimo lego objekta tudi v referenčnem koordinatnem sistemu robota:

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

Dana postavitev omogoča poenostavitvi:

- Izmed vseh leg orodja GRIP nas zanima le tista, ko orodje prime želeni 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 v faktorju skaliranja med slikovnimi elementi in milimetri, ki ga enostavno izračunamo samo enkrat (npr. z meritvijo znane milimetrskje dimenzije objekta v slikovnih elementih), zato lego objekta glede na kamero vedno izražamo direktno v sistemu CAM.

Z upoštevanjem poenostavitve se enačba (3) skrči v:

$${}^{REF} H_{OBJ} = {}^{REF} H_{CAM} {}^{CAM} H_{OBJ} \quad (4)$$

3 Kalibracija z inverzno homogeno transformacijo

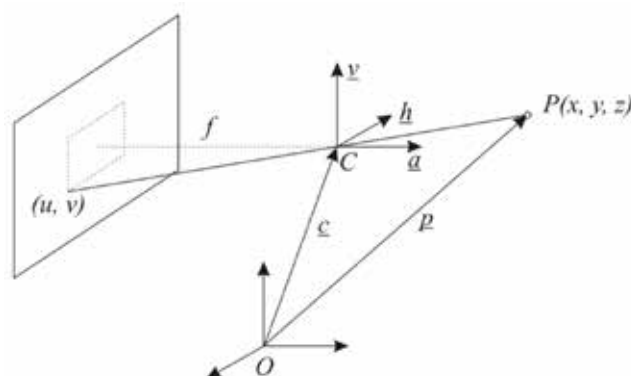
Objekt postavimo na poljubno mesto v vidno polje kamere. To storimo z robotom, da lahko neposredno odčitamo lego vrha robota v trenutku, ko ta odloži objekt, in dobimo ${}^{REF} H_{OBJ}$. To omogoča vsak uporabniški vmesnik za vodenje robotov. V splošnem dobimo 3 koordinate za pozicijo ter 3 za rotacijo. V prikazanem primeru zadoščajo 3 koordinate pozicije in en kot rotacije okrog osi z. Nato robot umaknemo iz vidnega polja kamere in lego odloženega objekta zajamemo s kamero ter tako dobimo ${}^{CAM} H_{OBJ}$. Zdej sta znani 2 od treh matrik iz enačbe (4) in ${}^{REF} H_{CAM}$ izrazimo kot:

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

To je matematični odgovor na vprašanje, kje leži slikovno območje kamere glede na robot. Vprašanju, kakšno je to območje, pa je zadoščeno s podatkom o skaliranju med slikovnimi elementi in milimetri, ki je neposredno odvisen od goriščne razdalje uporabljenega objektiv in oddaljenosti od delovne ravnine. Rešitev sistema na ta način je natanko determinirana, 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 pozorno 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 opazujemo pogreške robota glede na dejansko lego objektov. Zaradi tega ta preprosta pot do rešitve ni najbolj praktično uporabna.

4 Kalibracija s psevdoinverzno matriko

Poizkušamo najti sistem, ki bo poleg rešitve vseboval tudi redundantno informacijo o tem, kako dobra je dobljena rešitev. Kamero opišemo z vektorskim modelom (slika 2), preslikavo med koordinatami kamere in točko v prostoru pa v matrični obliki [4]:



Slika 2 : Vektorski model kamere

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

Matrično enačbo zapišemo kot sistem, izrazimo ter vstavimo konstanto w''' in dobimo:

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

Sistem zopet zapišemo v matrični obliki:

$$\begin{bmatrix} u_1 & v_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_1 x_1 & -v_1 x_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_n & v_n & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_n x_n & -v_n x_n \\ 0 & 0 & 0 & u_1 & v_1 & 1 & -u_1 y_1 & -v_1 y_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & u_n & v_n & 1 & -u_n y_n & -v_n y_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{11} \\ S_{21} \\ S_{31} \\ S_{12} \\ S_{22} \\ S_{32} \\ S_{13} \\ S_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \\ y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

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 (8) je zapisan v obliki $\underline{Ax} = \underline{B}$ in je predeterminiran, zato rešitev za x poiščemo s psevdoinverzno matriko

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

$(\underline{A}^T \underline{A})^{-1} \underline{A}^T$ je psevdoinverzna ali Moore-Penros(ova) inverzna matrika [4] matrike A in vrne rešitev parametrov po kriteriju najmanjših kvadratov za sistem (8). Pri rešitvi sistema na opisan način lahko uporabimo več točk, kot je minimalno potrebno, in na ta način povečamo verjetnost, da bo kalibracija natančnejša. Pozicije točk v referenčnem in koordinatnem sistemu kamere dobimo podobno kot pri metodi z inverzno transformacijo.

5 Zaključek

Integracija strojnega vida v robotsko manipulacijo zahteva adekvaten geometrijski opis in rešitev. Izkaže se, da

zadostuje razširitev geometrijskega problema direktne kinematike mehanizmov z rabo homogenih transformacij. Vse potrebne podatke za rešitev lahko pridobimo neposredno iz dejanskih fizičnih pozicij komponent sistema, pri čemer robotsko roko uporabimo kot merilnik pozicij. Morebitno kodiranje podatkov ali drugačno omejevanje dostopa proizvajalcev na tem osnovnem nivoju ni ovira. Od prikazanih načinov za kalibracijo kamere je praktično uporaben 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 vektorski model kamere zgolj približno opisuje realnost. Ob prodoru kamer z visoko ločljivostjo to v praksi skupaj s pozicijsko ponovljivostjo robotskih orodij postaja realen problem, ki ga omilita bolj podroben model popačenja leče ter uporaba objektov z manjšimi tolerancami, ki so posebej namenjeni za kamere z visoko ločljivostjo. Kalibracija fiksne stacionarne kamere je veljavna, dokler se ne spremeni njena lega. Podatke o kalibraciji pa lahko uporabimo tudi v obratni smeri – za kalibracijo manipulatorja ob morebitni nadomestitvi ali okvari robotske roke. Ker vemo, kakšna je (oz. naj bi bila) lega koordinatnega sistema kamere glede na robot, lahko rešitev enačbe (4) uporabimo za kalibracijo sklepov manipulatorja na način, da se odčitana lega vrha robota ob poravnavi s kalibracijskim objektom ujema z izračunano lego preko kamere.

V praksi je sicer vedno dobrodošla enostavnost uporabe in možnosti hitrih sprememb sistema, ki jih omogoča visoka stopnja integracije posameznih komponent v enovite sisteme. Po drugi strani pa je prednost, če imamo v tako konkurenčnem segmentu, kot je oprema za industrijsko avtomatizacijo, večjo svobodo izbire in kombiniranja komponent, saj je malo verjetno, da prav en proizvajalec opreme ponuja najboljše, najprimernejše ali najugodnejše rešitev za vse komponente sistema, še posebej, če potrebujemo specifične, ozko specializirane podsisteme.

Literatura

- [1] Steger, C., et al.: Machine Vision Algorithms and Applications, John Wiley & Sons, 2017.
- [2] Horn, B. K. P.: Robot Vision, MIT Press, 1986.
- [3] Bajd, T.: Robotika, Založba FE in FRI, 2002.
- [4] 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.

Stationary Camera Calibration in Robotic Manipulation

Abstract:

Industrial machine vision in automation is a standard tool. Manufacturers of robotic manipulation equipment provide vision solutions which are integrated into their own proprietary software development environments. High level integration ensures that such systems are easy to calibrate, set and use. Enabling cross-vendor components to work together in custom built systems is achieved through a calibration procedure which is determined by robot arm and camera configuration. Here we outline calibration procedures for a stationary camera fixed in parallel to the robot work plane by a) inverse homogeneous transform and b) pseudo-inverse matrix.

Keywords:

machine vision, robotic manipulation, calibration, stationary camera