Robotika

Kalibrace robotu (Identifikace systému)

Vladimír Smutný

Centrum strojového vnímání

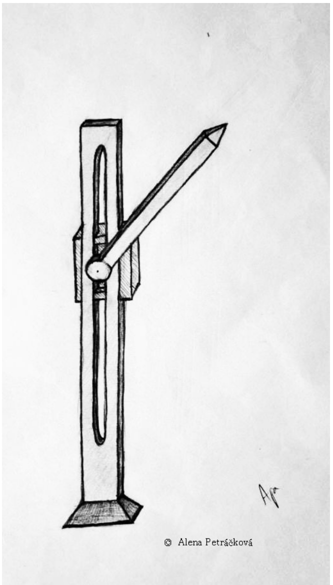
Český institut informatiky, robotiky a kybernetiky (CIIRC)

České vysoké učení technické v Praze

Kalibrace systému (Identifikace systému)

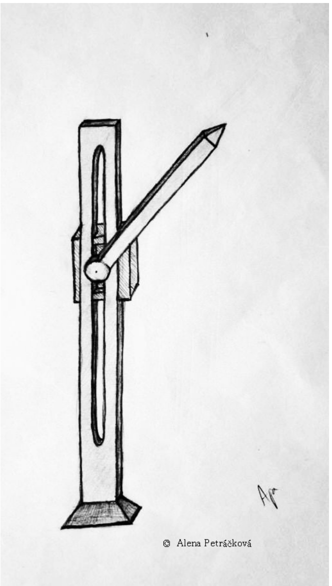
- Zjištění přibližných hodnot parametrů systému, např. hmotnosti a momenty setrvačnosti jednotlivých ramen robotu.
- Zjištění skutečných hodnot parametrů systému, u kterých známe jejich nominální hodnoty, např. geometrické parametry robotu.
- Zjištění hodnot parametrů systému složeného z více podsystémů, např. poloha kamery v souřadnicovém systému robotu.
- Známe nebo navrhujeme matematický model systému?
- Co jsou kalibrované parametry?
- S jakou přesností známe nominální hodnoty kalibrovaných parametrů?
- Co jsou měřené parametry?
- Co jsou známé parametry?

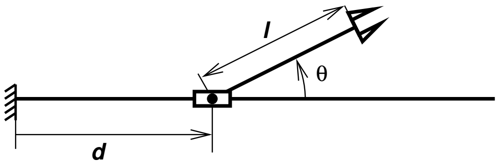
Kalibrace robotu - příklad



Jednoduchý manipulátor se dvěma stupni volnosti.

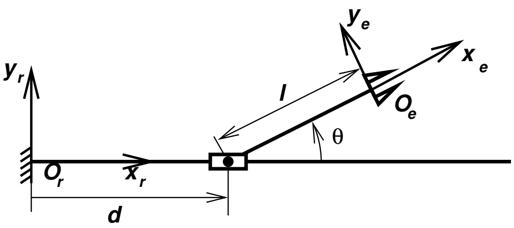
Kalibrace robotu - parametry robotu





Kloubové souřadnice robotu d, θ a parametr robotu l.

Kalibrace robotu - souřadnicové systémy

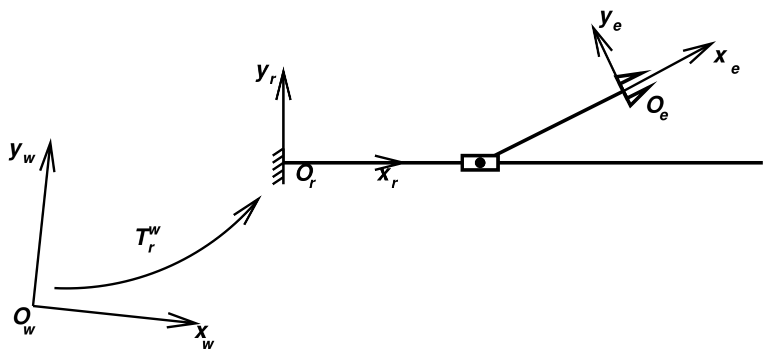


$$
\begin{aligned}
x_e^r &= d + l\cos\theta \\
y_e^r &= l\sin\theta \\
\phi &= \theta \\
\mathrm{T}_e^r(d,\theta,l) &= \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & d + l\cos\theta \\ \sin\theta & \cos\theta & l\sin\theta \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
\vec{x}_e^r = \vec{O}_e^r &= \mathrm{T}_e^r(d,\theta,l)\,\vec{O}_e^e = \mathrm{T}_e^r(d,\theta,l)\,(0,0,1)^T
\end{aligned}
$$

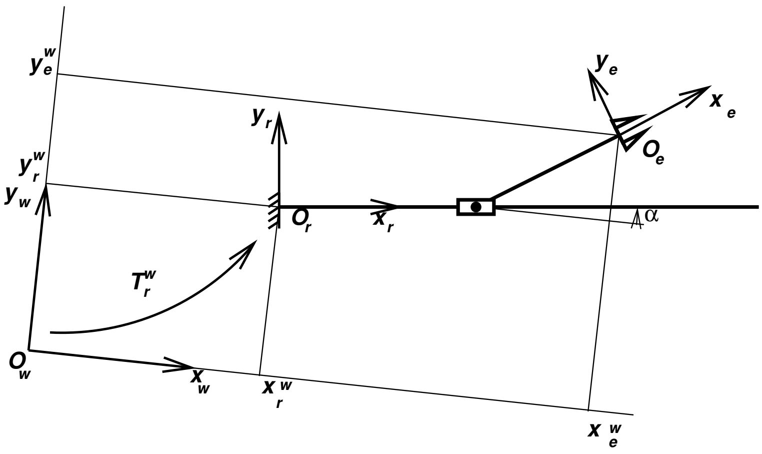
Souřadnicové systémy základny (s indexem r) a chapadla (s indexem e).
Přímá kinematická úloha:

$$
\begin{aligned}
x_e^r &= d + l\cos\theta \\
y_e^r &= l\sin\theta \\
\vec{x}_e^r = \vec{O}_e^r &= \mathrm{T}_e^r(d,\theta,l)\,\vec{O}_e^e = \mathrm{T}_e^r(d,\theta,l)\,(0,0,1)^T \\
\vec{x}^r &= \mathrm{T}_e^r(d,\theta,l)\,\vec{x}^e
\end{aligned}
$$

Kalibrace robotu - světový souřadnicový systém



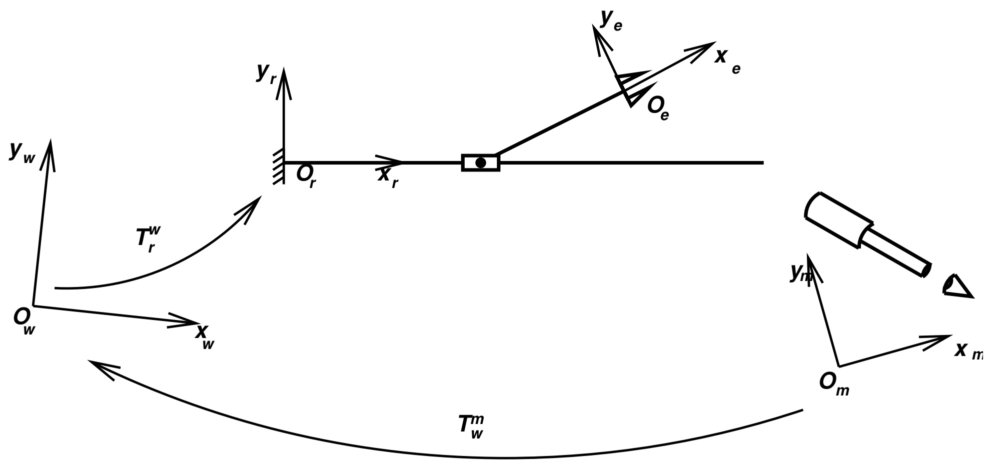
Zavedeme světový souřadnicový systém (s indexem w).



$$\vec{O}_e^w = \mathrm{T}_r^w(x_r^w, y_r^w, \alpha)\, \mathrm{T}_e^r(d, \theta, l)\, \vec{O}_e^e$$
$$\vec{x}^w = \mathrm{T}_r^w(x_r^w, y_r^w, \alpha)\, \mathrm{T}_e^r(d, \theta, l)\, \vec{x}^e$$

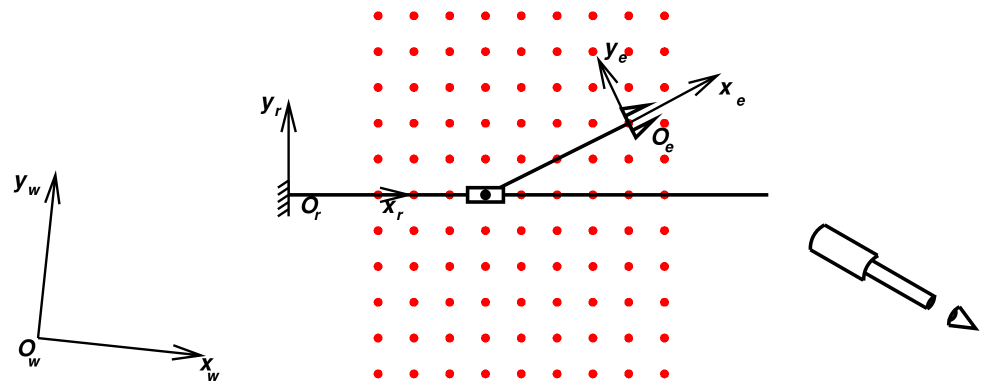
Zavedeme světový souřadnicový systém (s indexem w), který má parametry (x_r, y_r, α).

Souřadnicový systém měřicího zařízení/kalibru



Použijeme externí měřicí zařízení, které nám typicky přináší svůj vlastní souřadnicový systém (s indexem m).

kalibrační body



Zvolíme body/polohy, v kterých budeme kalibrovat. Kalibrační body by s rezervou měly pokrývat používaný pracovní prostor, aby se při jeho využívání interpolovalo mezi kalibračními body a nikoliv extrapolovalo. Take pokrytí pracovního prostoru kalibračními body by mělo být rovnoměrné. V opačném případě by např. dva kalibrační body ve stejném místě zvyšovaly váhu tohoto místa v optimalizačním kriteriu.

Kalibrace robotu - postup

1. Vybrat/navrhnout model systému.
2. Určit počet kalibrovaných parametrů (odhad počtu).
3. Zvolíme měřené parametry - úzce souvisí s kalibrační metodou.
4. Určíme nepřesnost měřicích čidel.
5. Zvolíme optimalizační kritérium.
6. Sestavit rovnice/implementovat optimalizační program.
7. Zvolíme optimalizační metodu.
8. Navrhnout, v kterých bodech budeme provádět kalibraci.
9. Testovat parametry na minimálnost.
10. Testovat parametry na podmíněnost.
11. Určit odhady parametrů, výkresové/nominální hodnoty.
12. Testovat program na syntetických datech.
13. Naměřit skutečná data.
14. Provést výpočty parametrů.

Ad 2 Můžeme používat složitější a jednodušší model. Například lineární posuv můžeme modelovat jako pohyb po přímce (poloha přímky, počátek souřadnic na přímce) nebo jako pohyb po nějaké složitější křivce (kružnici, polynomu vyššího řádu,...). Záleží na tom, jak přesně chceme pohyb modelovat, jak přesná máme měření, kolik kalibračních poloh si můžeme dovolit naměřit,... Jednodušší model je méně přesný, ale může dostačovat. Složitý model může mít parametry, které nelze prakticky určit, viz dále.

Ad 3 Nejobtížnější a nejdůležitější. Zde máme velkou volbu, prostor pro nápady, musíme uvažovat ekonomická omezení.

Ad 4 Přesnost měření snímačů je důležitá a může být zahrnuta v optimalizačním kriteriu, v takovém případě můžeme předpovědět přesnost výsledku (později), případně můžeme přemýšlet, která čidla ekonomicky nahradit přesnějšími nebo méně přesnými.

Ad 5 Zde moc volbu nemáme, spíše se snažíme co nejlépe namodelovat skutečnost. Snažme se modelovat fyzikální chybu, tedy skutečnou chybu měření, ne algebraickou chybu.

Ad 7 Některé metody mají implicitní kritérium (algebraická chyba), jsou různě rychlé atd.

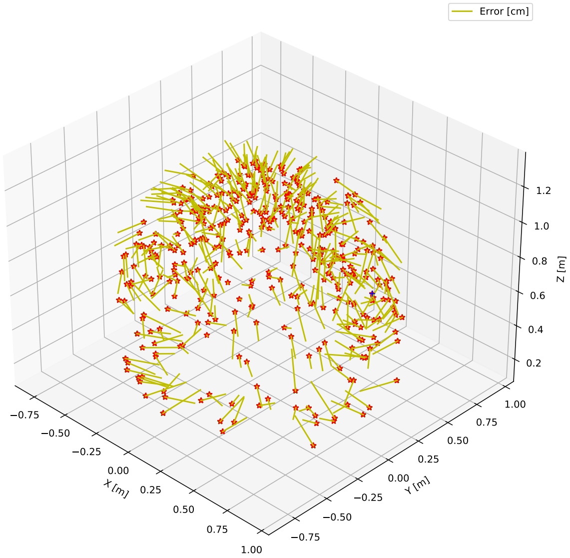
Ad 9 U složitých systémů se nám snadno stane, že zvolíme parametry, které jsou na sobě závislé. To je možné určit za pomoci Hessiánu kriteriální funkce derivované podle kalibrovaných parametrů. Hessián takovéto funkce nemá plnou hodnost.

Ad 10 Ne všechny parametrizace jsou ekvivalentní z hlediska výsledné přesnosti kalibrace, přestože jsou ekvivalentní z hlediska popisu. Například DH notace je vhodná z hlediska z hlediska minimálnosti popisu, ale například pro téměř rovnoběžné osy není vhodná. Ve skutečnosti osy nejsou přesně rovnoběžné a při kalibraci bychom to typicky neměli ignorovat. DH notace ale používá skutečnou polohu příčky, jejíž poloha nám pro skoro rovnoběžné osy létá v blízkosti plus a minus nekonečna. Proto je možné použít například modifikovanou DH notaci .

Ad 11 Zvolit nominální parametry je relativně snadné pro mechanické systémy, kdy použijeme výkresové (CAD) hodnoty, obtížnější pro kamerové a dynamické systémy.

Ad 12 V tomto bodě se může ukázat, že navržené kalibrační polohy jsou nevhodné nebo že z nich nelze určit některé parametry. Podobně se může ukázat, že některé parametry byly nevhodně zvoleny. Viz dále.

Kalibrace robotu KUKA LBR

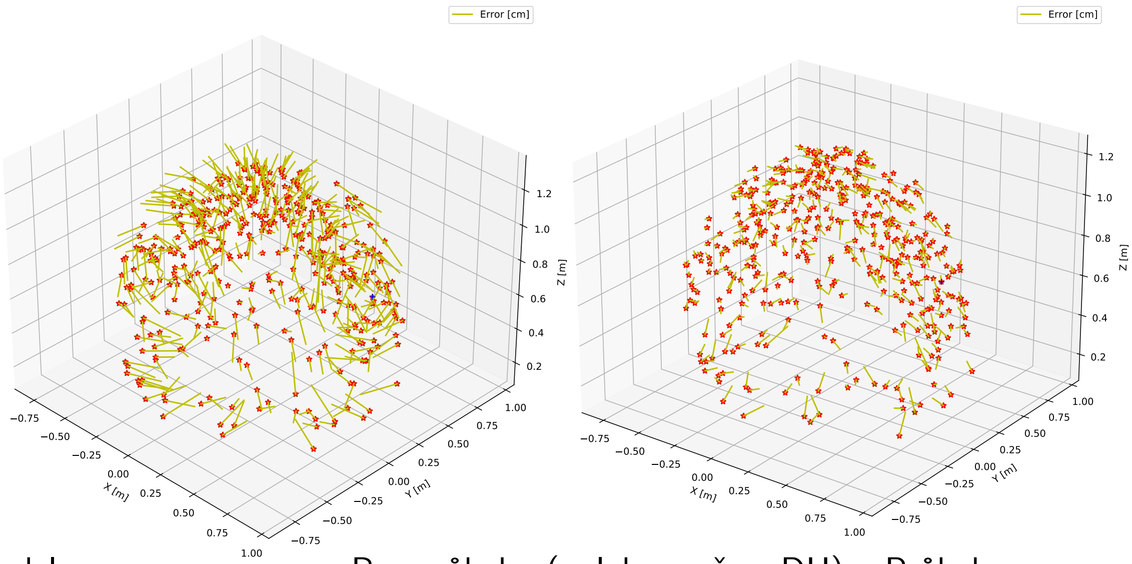


Model:	Bez průhybu (poloha a vše z DH)
Průměrná chyba [mm]:	1.4
Maximální chyba [mm]:	3.6
Kalibrovatelnost:	2326

Referenční bod chapadla robotu Kuka LBR byl měřen systémem Leica Lasertracker AT403 a hledány nejlepší parametry DH notace. Zde jsou uvedeny rozdíly mezi polohou nakalibrovaného robotu a teoreticky správnou polohou (ignorujeme nepřesnost lasertrackeru).

Na obrázku jsou červené body polohy referenčního bodu chapadla v kalibrační poloze a žluté čáry naznačují 100x zvětšené chyby polohy.

Kalibrace robotu KUKA LBR s prověšením

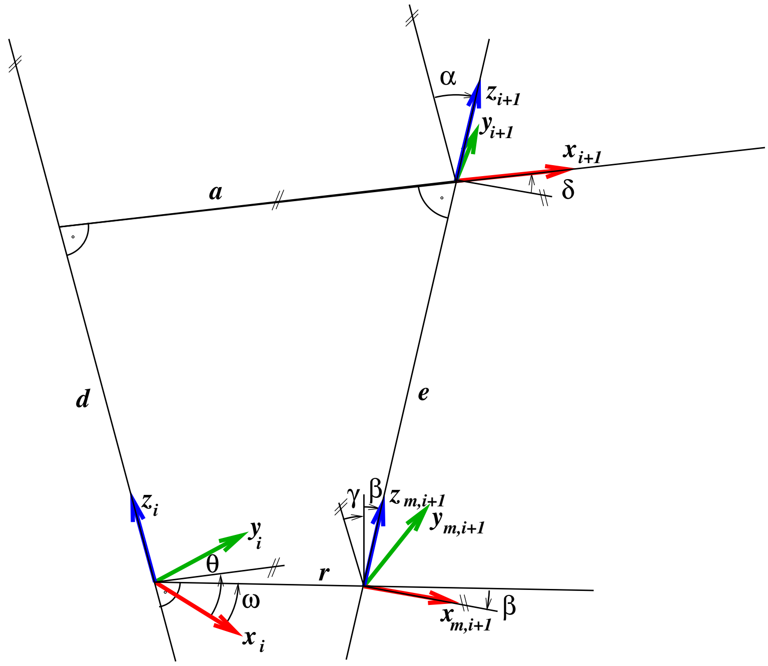


Model:	Bez průhybu (poloha a vše z DH)	Průhyb
Průměrná chyba [mm]:	1.4	0.5
Maximální chyba [mm]:	3.6	1.7
Kalibrovatelnost:	2326	2404

Když se přidá do modelu prověšení robotu (modelované jako $\Delta\theta \sim \tau$, kde τ je úměrné statickému momentu působícímu na daný kloub, tak se odchylky výrazně zmenší. Je třeba si uvědomit, že téměř každé přidání dalších parametrů (zesložitění modelu) sníží pozorované chyby. Vždy je třeba vážit složitost modelu a přínos pro kalibraci.

Nevhodně zvolené kalibrační parametry

Téměř rovnoběžné osy dvou kloubů, řešením je například modifikovaná DH notace.



Modifikovaná DH notace je popsána například v Základy kalibrace robotů (http://faculty.eng.fau.edu/rothz/files/2010/11/FUNDAMENTALS-OF-MANIPULATOR-CALIBRATION.pdf)

Někdy je vhodnější klasická DH notace, někdy modifikovaná verze. Pro účely kalibrace nelze nahradit jednu druhou, často musíme pro jeden manipulátor použít obě. Rozhodujeme se pro každý kloub zvlášť.

Na obrázku je uvedeno schema jak pro klasickou DH notaci s parametry $(\theta, d, a, \alpha)^T$ tak pro modifikovanou s parametry $(\omega, r, \gamma, \beta)^T$. Modifikovanou zkonstruujeme tak, že v bodě O_{i-1} vedeme rovinu kolmou k ose kloubu i, nalezneme průsečík této roviny s osou kloubu $i+1$ a zde je počátek nové souřadnicové soustavy $O_{m,i}$. Osa $z_{m,i}$ bude ve směru osy kloubu $i+1$, osa $x_{m,i}$ bude ležet v rovině procházející úsečkou $O_{i-1}O_{m,i}$ a osou kloubu $i+1$, samozřejmě kolmá k $z_{m,i}$. Transformaci pak modelujeme jako složení čtyř elementárních transformací:

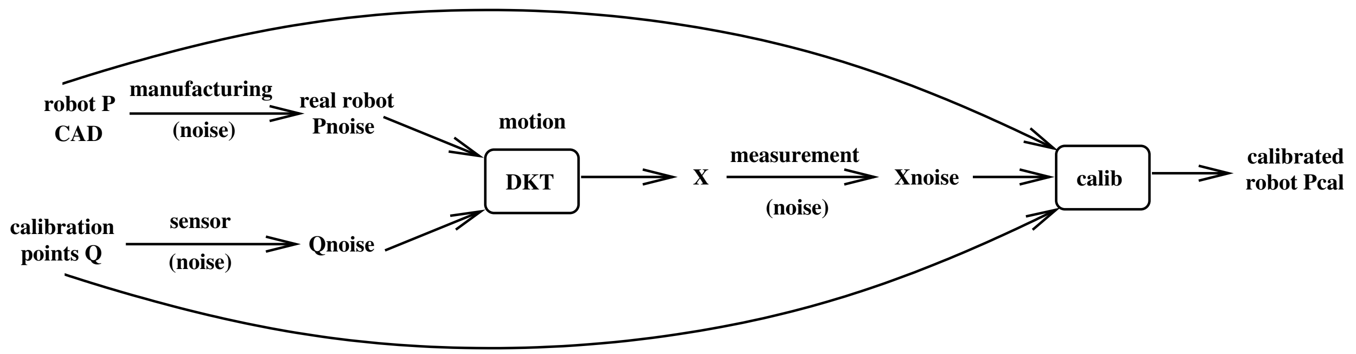
- otočení okolo osy z_{i-1} o úhel ω, tak aby nová osa x směřovala do bodu $O_{m,i}$,
- posunutí ve směru nové osy x o r,
- otočení okolo nové osy x o úhel γ tak, aby nová osa z ležela v rovině procházející úsečkou $O_{i-1}O_{m,i}$ a osou kloubu $i+1$ a
- otočení okolo nové osy y o úhel β tak, aby nová osa $z_{m,i}$ byla v ose kloubu $i+1$, což je podmínka, abychom mohli pokračovat normální nebo modifikovanou DH notací.

Matematicky

$$A_i^{i-1} = R_z(\omega) T_x(r) R_x(\gamma) R_y(\beta) \,. \tag{1}$$

Na obrázku jsou vyznačené další parametry e a δ, které naznačují vztah ke klasické DH notaci, zde je můžeme ignorovat.

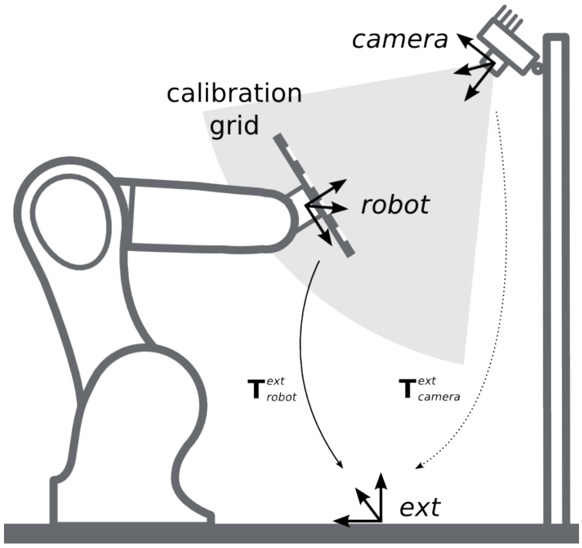
Příklad kalibrace rozměrů robotu



V domácí úloze máme robota a jeho CAD výkresy. Toho robota někdo nepřesně vyrobí, takže získáme robota s jinými parametry. Jestliže ho pošleme do polohy s kloubovými souřadnicemi Q, tak se vlivem nepřesnosti snímačů kloubových souřadnic dostane chapadlo do polohy X. Nezávislým měřidlem změříme polohu chapadla X_{noise}. Pro kalibraci robota použijeme výkresové parametry, odhady (přání) kloubových souřadnic kalibračních bodů Q, naměřené hodnoty X_{noise} a výpočtem určíme odhady skutečných parametrů robotu.

Samozřejmě při pohybu (nebo jeho simulaci v DKT) dostáváme chybu výstupní polohy vlivem např. různých deformací způsobených silami (nebo zaokrouhlováním ve výpočtech DKT). Podobně k dalším chybám (šumu) dochází ve výpočtu kalibračních parametrů.

Kalibrace kamery a robotu - kamera na rámu



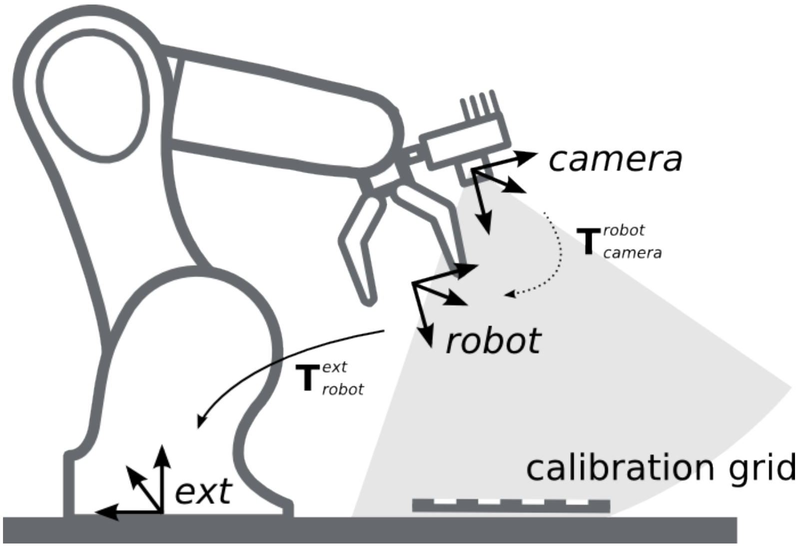
Často se dnes uplatňuje kamerový systém pro navigaci robotu na skutečnou polohu výrobku. V takovém případě musíme vzájemně zkalibrovat souřadnicový systém, v kterém pracuje kamera, a souřadnicový systém robotu.

Jedna z možností je, že robot položí chapadlem objekty (najednou – jeden snímek kamery nebo jeden po druhém – ve snímku kamery je vždy jen jeden objekt = jednodušší zpracování) do zorného pole kamery a známá poloha objektu v souřadnicích robotu a v souřadnicích obrazu se použije pro výpočet vzájemné transformace.

Jiná možnost je umístit na známé místo chapadla robotu v kameře rozpoznatelnou značku a s chapadlem pak pohnout do několika známých poloh a nasnímat je kamerou.

Kalibračních postupů existuje nepřeberné množství a vhodnost jejich použití závisí především na praktických možnostech (co lze kam umístit, s jakou přesností,...) a na požadované přesnosti vzájemné kalibrace. Jinou přesnost potřebujeme pro manipulaci párků zatavených do igelitu přísavkou a jinou pro měření kamerou na 3D souřadnicovém měřicím stroji.

Kalibrace kamery a robotu - kamera na chapadle



Jinou možností je umístit kameru přímo na chapadlo robotu. Kalibrační procedura je pak samozřejmě jiná a komplikovanější. Existují desítky metod, jak kalibrovat vzájemně robota a kameru a o jejich použití rozhoduje, co přesně o systému víme a jaké máme možnosti umisťovat na robota a do scény různé terčíky a podobně.

Tuto úlohu řešil např. Jan Heller ve své dizertaci http://cyber.felk.cvut.cz/teaching/radaUIB/Heller_disertace.pdf.