



# Porovnání geometrických modelů sériových robotů pro kalibraci

Ondřej Vaníček<sup>1</sup>

## 1 Úvod

Cílem této práce je prezentovat porovnání schopnosti jednotlivých známých koncepcí kalibrace robotických systémů identifikovat skutečné parametry zvoleného robotu za přítomnosti obdobně velkých odchylek geometrických parametrů od jejich nominálních hodnot.

Elementárním požadavkem na metody kalibrace robotů je přirozeně schopnost nalézt takovou sadu geometrických parametrů, která zaručí nulové (resp. zanedbatelné) odchylky ve výpočtu polohy koncového efektoru v absolutních souřadnicích. Záměrně zde není zmíněno nalezení sady *skutečných* geometrických parametrů, neboť v některých případech (redundance parametrů) toto nemusí být možné, avšak může být korektní identifikovat a použít sadu geometrických parametrů, které se sice od skutečných liší, ale na jejichž základě vypočtená poloha koncového efektoru je správná v celém pracovním prostoru robotu.

Za účelem ověření schopnosti konvergence kalibračních modelů ve smyslu minimalizace odchylky koncového efektoru robotu v básových souřadnicích byly provedeny tzv. Monte Carlo simulace, při nichž byly opakovaně simulovány běhy kalibračních algoritmů nad systémy s náhodně generovanými sadami odchylek geometrických parametrů.

## 2 Monte Carlo simulační porovnání kalibračních modelů

Cílem provedené sady Monte Carlo simulací bylo porovnat simulované kalibrační modely ve smyslu maximální velikosti odchylek geometrických parametrů, kterou jsou schopny identifikovat. Tento aspekt může hrát zásadní roli v úspěšnosti použití jednotlivých koncepcí pro kalibraci reálného systému. V rámci těchto simulací byly postupně zvyšovány vstupní simulační parametry  $\sigma_{trans}, \sigma_{rot}$  při zachování počtu simulací  $N_{sim} = 1000$ . Výsledky těchto simulací jsou shrnuty v Tabulce 1. Z uvedených výsledků lze dovodit několik závěrů stran *robustnosti* jednotlivých kalibračních koncepcí a možnosti jejich uplatnění na reálné systémy.

V první řadě se ukázalo, že MCPC kalibrační algoritmus lze spolehlivě použít pro identifikaci pouze přibližně poloviční velikosti odchylek, než jaké jsou považovány za obvyklé. Velikost obvyklých odchylek v řádu  $dX \approx 3\text{ mm}$  byla pozorována na přibližně deset let starém modelu robotu, který má za sebou několik let nasazení ve výrobě. Lze usuzovat, že současné robotické platformy snížily výrobní nepřesnosti na úroveň, kterou je MCPC koncepce kalibračního modelování schopna identifikovat, avšak z hlediska spolehlivosti a využití tohoto přístupu na libovolné roboty, které se v současnosti používají, se nejedná o zcela spolehlivý přístup.

Opačné chování vykazala klasická Denavit - Hartenbergova koncepce, která dosáhla vysoké úspěšnosti i za přítomnosti velmi značných odchylek DH parametrů. Tato skutečnost je pochopitelná hned ze dvou důvodů. V první řadě odpovídá počet DH parametrů použitých pro definici souřadných systémů minimálním počtu parametrů nutných pro stanovení libovolné

<sup>1</sup> student doktorského studijního programu Aplikované vědy a informatika, obor Kybernetika, specializace Modelování, řízení a diagnostika strojů a procesů, e-mail: ovanicek@students.zcu.cz

$\sigma_{trans} [mm]$	$\sigma_{rot} [rad]$	$\overline{dX}_i [mm]$	$\sum  \delta_i  [^\circ]$	<b>DH</b>	<b>MDH</b>	<b>MCPC</b>	<b>POE</b>
0,1	0,0005	1,2389	0,2291	100%	100%	99,1%	100%
0,125	0,001	2,0095	0,4388	100%	100%	48,7%	100%
0,25	0,0025	5,3343	1,1945	100%	100%	10,6%	100%
0,25	0,005	10,7918	2,2052	100%	100%	5,7%	99,1%
0,5	0,01	22,2373	4,6556	100%	81,5%	3,5%	80,9%
0,5	0,025	53,1563	11,4729	98,2%	56,1%	2,1%	28,6%
2,5	0,05	111,6949	23,1111	92,7%	27,2%	0,7%	3,5%
2,5	0,075	161,0807	34,2498	75,7%	10,7%	0,2%	0,2%

**Tabulka 1:** Konvergence kalibračních koncepcí dle velikosti odchylek geom. parametrů

vzájemné polohy dvou souřadných systémů v prostoru. Současně byly v rámci těchto simulací generovány právě pouze odchylky v hodnotách DH parametrů bez vytváření parametrických nespojitostí ve smyslu porušení předpokladu rovnoběžnosti os nominálně rovnoběžných kloubů, které jsou hlavní překážkou v použití této koncepce pro reálnou kalibraci.

Upravená DH úmluva a POE koncepce prokázaly v těchto simulacích dostatečnou robustnost pro použití na současné průmyslové robotické systémy, když dokázaly spolehlivě identifikovat odchylky geometrických parametrů odpovídající desetinásobku obvyklých odchylek uvažovaných v této práci. Jejich nižší míra konvergence na větších velikostech generovaných odchylek je patrně dána vyšším počtem rotačních parametrů (MDH) resp. celkově vyšším počtem parametrů (POE). Z hlediska praktického využití pro kalibraci průmyslových robotů se však jeví jako dostatečné. Potíže by jim neměla působit ani odchylka nominálně rovnoběžných os sousedních rotačních kloubů, která způsobuje parametrickou nespojitost DH koncepce.

### 3 Závěr

Výsledky prezentovaných simulací ukázaly, že MCPC koncepce vykazuje nejmenší robustnost ve smyslu maximální identifikovatelné velikosti odchylek geometrických parametrů. Nejrobustnějším se naopak projevil klasický DH model, jehož výhodou je minimální počet parametrů. Nevýhodou však je přítomnost parametrické nespojitosti, která prakticky znemožňuje jeho použití v praxi. Upravená DH (MDH) koncepce spolu s přístupem založeným na součinu maticových exponenciál (POE) prokázaly dostatečnou robustnost pro praktické použití.

### Poděkování

Příspěvek byl podpořen grantovým projektem SGS-2019-020.

### Literatura

- Denavit, J., Hartenberg, R. S., (1955) "A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices," *Journal of Applied Mechanics*, vol. 22, pp. 215–221.
- Brockett, R. (1984) "Robotic manipulators and the product of exponentials formula," *Mathematical Theory of Networks and Systems*, Springer-Verlag, New York, USA, pp. 120–129.
- Veitschegger, W., Wu, C. H. (1986) "Robot accuracy analysis based on kinematics," *IEEE Journal on Robotics and Automation*, vol. 2, no. 3, pp. 171–179.
- Zhuang, H., Roth, Z. (1996) "Camera Aided Robot Calibration", *CRC Press*, Boca Raton, USA.