

KALIBRACE PRŮMYSLOVÝCH ROBOTŮ

Tomáš Navrátil

Faculty of Mechanical Engineering, Brno University of Technology
Institute of Automation and Computer Science
Technická 2896/2, Brno 616 69, Czech Republic
208924@vutbr.cz

Abstrakt: *Kalibrace je důležitý proces, který zajišťuje spolehlivé fungování průmyslového robotu co se týče jakékoliv zamýšlené aplikace. Zlepšuje především parametry opakovatelnost a přesnost. Cílem je zamezit chybám a nepřesnostem v poloze koncového efektoru a tedy celkové nepřesnostem v jakémkoliv robotizovaném procesu*

Keywords: *kalibrace, průmyslový robot, přesnost, opakovatelnost, kinematická kalibrace, nekinematická kalibrace*

1 Úvod

Kalibrace robotů se definuje jako proces užívaný ke zlepšení přesnosti robotů, zejména průmyslových robotů, které mají velmi dobrou opakovatelnost (repeatability dle normy ISO 9283), ale mají daleko od dokonalé přesnosti (accuracy dle normy ISO 9283). Kalibrace jde také definovat jako proces, při kterém lze zlepšit přesnost polohování robotu úpravou softwaru pro polohování namísto změny nebo úpravy konstrukce robotu nebo jeho řídicího systému. Proces kalibrace průmyslových robotů zahrnuje měření a porovnání skutečné polohy robota s požadovanou polohou a úhly v průběhu jeho pohybu nebo při dosažení žádané polohy. Získaná data se používají k nastavení robota tak, aby byl schopen pracovat s požadovanou přesností a opakovatelností. K naplnění toho je potřeba sestavit model, jehož parametry odpovídají skutečnému robotu. Po sestavení modelu následuje proces měření, který odhalí, které parametry nejsou ve shodě s modelem. Po tomto kroku následuje identifikace, tedy určení a výpočet parametrů, které se následně implementují k modelu robotu a odráží se zde provedená měření. [6] [5] [3]

Opakovatelnost se definuje jako schopnost robota dosáhnout stejného bodu v prostoru opakovaně při opakovaném spuštění stejného programu a za stejných podmínek. Opakovatelnost se měří pomocí odchylky od požadované polohy během více opakování tohoto pohybu. [4]

Přesnost se definuje jako schopnost robota dosáhnout požadovaného bodu v prostoru. Měří se pomocí odchylky pozice robota vzhledem k požadovanému bodu. Chyba se měří buď jako absolutní hodnota např. v milimetrech nebo je vyjádřena v procentech. [7]

Norma dále udává, že pro testování opakovatelnosti a přesnosti robotického systému by mělo být v podmínkách, které co nejvíce korespondují s aplikací, pro kterou je robot navrhován. [12]

1.1 Rozdělení

V souvislosti s kalibrací průmyslových robotů se můžeme setkat s dělením na tři úrovně kalibrace a to:

Kalibrace 1. úrovně (tzv. "mastering"), zde jde o to porovnat skutečný posun (úhel) jednotlivých os robotu s hodnotou generovanou snímačem této osy;

Kalibrace 2. úrovně (kinematická kalibrace), modelování kinematiky, musí být známa skutečná kinematika robotu, zahrnuje úhlové posuny a délky kloubů;

Kalibrace 3. úrovně (nekinematická kalibrace), jde o zpracování chyb, které se netýkají geometrie a kinematiky, tudíž chyby vlivem tření, hluku, teplot, tuhosti, poddajnosti kloubů (compliance), atd. [9] [1]

Pro většinu aplikací je dostačující 1. a 2. úroveň

Dále se vyskytuje rozdělení na parametrickou a neparametrickou kalibraci. Parametrická kalibrace vychází z modelu robotu. Model zahrnuje některé parametry popisující zdroje chyb, které jsou relevantní. Kalibrací se určí hodnota parametrů, které nejlépe popisují skutečné chování robota. Oproti tomu neparametrická kalibrace spočívá v metodách, které nepoužívají kinematické modely, ale jiné metody [13] [10]

2 Kdy musí být robot kalibrován

Proč je ale robot a popř. celé robotické pracoviště potřeba kalibrovat (Zde existuje další téma a to kalibrace robotické buňky, nicméně tento článek se věnuje primárně kalibraci průmyslových robotů jakožto jednotlivých strojů jako takových). Negativní vliv na přesnost a tedy spolehlivost robotů má řada faktorů. V průběhu času je průmyslový robot ovlivněn opotřebením svých komponent, dále mají negativní vliv odchylky v rozměrech (které vzniknou při výrobě robotů) a tolerance nebo mohou být způsobeny nepřesností vlivem nahrazení jednotlivých komponent po opotřebení. Kalibrace by měla tedy eliminovat tyto negativní vlivy, tudíž optimalizovat přesnost výrobního procesu a ve finále tak ušetřit čas a prostředky. [3]

2.1 Kalibrace vzhledem k offline programování

Obzvláště důležitá je správná kalibrace, pokud je robot programován metodou offline. Programování průmyslových robotů je možné třemi způsoby. Dva z toho spadají pod online programování, kdy je linka odstavena a programování probíhá v lince nebo u linky, což je programování pomocí teach pendantu nebo tzv. lead through metoda. Programování teach pendantem probíhá tak, že je robot ovládán teach pendantem a v nižších rychlostech naváděn do požadovaných pozic. Lead through metoda spočívá, jak už název napovídá v tom, že servo pohony robotu jsou uvolněné a robotik (pracovník programující robot) sám vede rameno. Při offline programování naproti tomu není nutné činnost linky kvůli programování samotnému omezovat. Člověk zde pomocí softwaru (např. RobotStudio od ABB nebo Process Simulate od Siemens) plánuje výrobní proces na vytvořeném modelu buňky (viz. obr "Figure 1"), takže je dopředu schopen odhalit eventuální kolize a problémy. Nicméně proto musí model robotu a jeho klíčové parametry co nejpřesněji odpovídat skutečnému stavu. Pokud tomu tak není, nepřesnosti se projeví odchylkami při dosahování jednotlivých poloh ve skutečnosti oproti stavu v modelu. [3] [14]

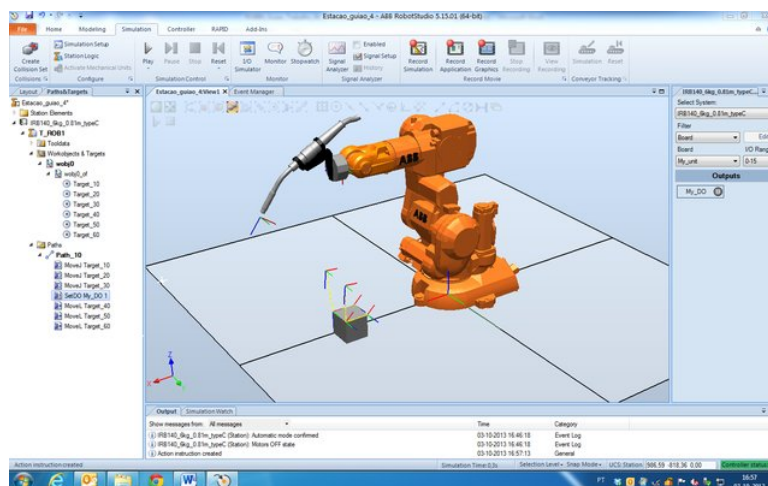


Figure 1: Uživatelské prostředí offline programování v ABB RobotStudio [11]

2.2 Kalibrace vzhledem k řízení a simulaci

Dále je zásadní funkcí kalibrace robotů kalibrace směrem ke zlepšení řízení pohybu a simulace. Zde jsou klíčové hmotnostní charakteristiky neboli setrvačnostní parametry. Přesné určení těchto parametrů je důležité pro přesné řízení a odpovídající simulaci pohybu robotů. Hraje zde roli také tření a tuhost konstrukce. [3]

2.3 Eliminace nepřesností výroby

V úvodu bylo mimo jiné zmíněno, že negativní vliv na přesnost robotů mají odchylky a nepřesnosti plynoucí z výroby průmyslových robotů. To znamená, jak blízko k výrobním specifikacím může být stroj vyroben. Těmi důležitými specifikacemi je uspořádání geometrie os a převodů, které pohání jednotlivé osy. Tím jak složitý je např. typický šestiosý robot a tím, že konstrukce je uzavřená a nelze se jednoduše podívat dovnitř (jako na obr. "Figure 2") jak přesně je po finální montáži robot zhotoven, nelze jednoduše změřit tyto klíčové specifikace. Během kalibrace jde ale tyto parametry zkontrolovat, resp. vyčíst jaké odchylky vznikly při montáži z toho, jak se robot chová. Tedy získat tyto parametry implicitně. [3]



Figure 2: Pohled dovnitř předposledního článku šestiosého robotu, který po montáži u výrobce není vidět

2.4 Opotřebení komponent

Průmyslový robot v provozu trpí s přibývajícím časem opotřebením. Z toho důvodu je vhodné provádět v rámci pravidelné údržby i kalibraci. Vedle toho je samozřejmě po opravě opotřebovaných komponent nutné provést kalibraci. Jde tedy o kompenzaci změn, ke kterým kvůli opotřebení dojde. [3]

Článek se v této části věnoval jednotlivým situacím, kdy je v průmyslu třeba provést kalibraci robotů. Dále se bude věnovat kinematické a nekinematické kalibraci, tedy kalibraci 2. a 3. úrovně, jak bylo zmíněno výše.

3 Kinematická kalibrace

Kinematická kalibrace neboli kalibrace 2. úrovně neboli "kinematic model based calibration" tedy kinematická kalibrace založená na modelu je obecnou, široce rozšířenou metodou kalibrace. Geometrické faktory se používají k určení parametrů modelu. Tato metoda kalibrace se dá rozčlenit na následující postupné kroky:

- Modelování,
- Měření,
- Identifikace,
- Kompenzace nebo oprava

Nyní k popisu jednotlivých kroků. [3]

3.1 Modelování

Zde jde o to sestavit kinematický model průmyslového robotu. Kinematický model je jakýsi matematický popis geometrie a pohybu robotu (obr. "Figure 3"). Nejrozšířenější metoda se nazývá D-H metoda a představili ji J.Denavit a R.S. Hartenberg roku 1955. Metoda je založena na homogenních transformačních matic. Pro každou robotickou osu (kloub) je vytvořen souřadnicový systém. Každý souřadnicový systém je pak spojen s dalším souřadnicovým systémem prostřednictvím koeficientů právě v homogenních transformačních maticích. [3] [2]

3.2 Měření

Tato etapa spočívá ve snímání skutečné polohy koncového efektoru robotu. Tato skutečná poloha je pak porovnávána s polohou danou kinematickým modelem. Takto se získají data o nepřesnostech reálného pracoviště. Během měření je potřeba získat zejména šest parametrů, tj. natočení os robotu. Používají se různá měřicí zařízení. Například akustické senzory, vizuální senzory, souřadnicový měřicí systém nebo vizuální a automatický teodolit. Měření se dá označit jako nejsložitější a časově nejnáročnější část kinematické kalibrace. Je to zejména protože je potřeba školená obsluha k ovládání měřicího zařízení. Sběrání dat je únavná a časově náročná práce, při které je potřeba spousta zásahů obsluhy, tudíž proces není dobře automatizovatelný. Metody měření jsou často navrženy pro kalibraci v laboratoři, ne pro práci v průmyslovém prostředí. [3]

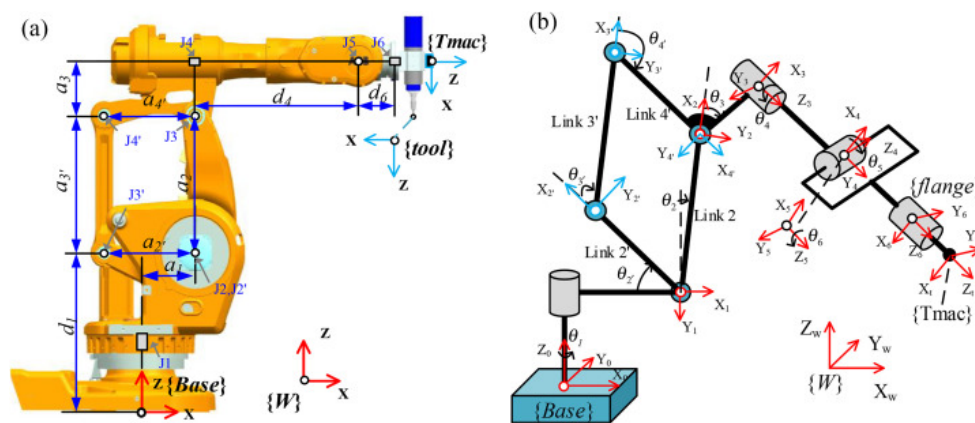


Figure 3: Příklad kinematického modelu [8]

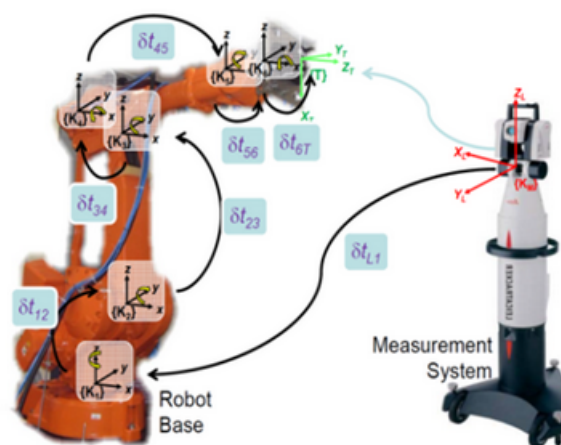


Figure 4: Příklad měření během kalibrace

3.3 Identifikace

Identifikace neboli určení parametrů je další fází kinematické kalibrace. Kinematické parametry se určí pomocí metody nejmenších čtverců. Je to tedy optimalizační proces pomocí metody nejmenších čtverců. [3]

3.4 Kompenzace

Označuje se také jako korekce. Kompenzace je poslední fází kinematické kalibrace. Nový model, kde jsou brány v potaz rozdílnosti mezi skutečností a základním modelem, je vložen do softwaru robotu pro řízení polohy. Vzhledem k tomu jak je obtížná přímé úprava kinematických parametrů v řídicí jednotce robota se provádí kompenzace jednotlivých os robotu na základě údajů ze snímače získaných řešením inverzní kinematiky. Pro řešení úloh inverzní kinematiky a tedy opravy odchylek jednotlivých os a tudíž kompenzaci chyb v souřadnicích se používají numerické metody. [3]

4 Nekinematická kalibrace

Nekinematická kalibrace neboli kalibrace 3. úrovně, jak bylo zmíněno výše. Kinematická kalibrace pracuje s předpokladem, že jednotlivé robotické články jsou dokonale tuhé. Dále předpokládá, že konstrukce kloubů nepovolí žádný nechtěný pohyb kterékoli z os a také předpokládá, že robot není řízen dynamicky. V případě, že tyto předpoklady neplatí, musí přijít na řadu nekinematická kalibrace. Nekinematická kalibrace tedy dává do pořádku chyby a nepřesnosti vzniklé díky vlivům jako je ohebnost kloubů a článků, která souvisí s výše zmíněnou předpokládanou tuhostí, dále může dojít k chybám přenosu převodů, zpětnému rázu v převodech a negativní vliv může mít také teplota. Právě tyto vlivy jsou napodobovány a modelovány v rámci nekinematické kalibrace. Tato kalibrace je náročný a komplexní problém. Pro většinu běžných aplikací například v automobilovém průmyslu

naštěstí tyto vlivy nemají fatální vliv a kalibrace 3. úrovně se používá u těch aplikací, kdy je vyžadována opravdu vysoká přesnost. [3]

References

- [1] ASIF, S., AND WEBB, P. Realtime calibration of an industrial robot. *Applied System Innovation* 5, 5 (2022), 96.
- [2] DENAVIT, J., AND HARTENBERG, R. S. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices.
- [3] ELATTA, A., GEN, L. P., ZHI, F. L., DAOYUAN, Y., AND FEI, L. An overview of robot calibration. *Information Technology Journal* 3, 1 (2004), 74–78.
- [4] HU, M., WANG, H., PAN, X., AND TIAN, Y. Optimal synthesis of pose repeatability for collaborative robots based on the iso 9283 standard. *Industrial Robot: the international journal of robotics research and application* (2019).
- [5] LI, Z., LI, S., AND LUO, X. An overview of calibration technology of industrial robots. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica* 8, 1 (2021), 23–36.
- [6] NOF, S. Y. *Handbook of industrial robotics*. John Wiley & Sons, 1999.
- [7] PARK, K.-T., PARK, C.-H., AND SHIN, Y.-J. Performance evaluation of industrial dual-arm robot. In *2008 International Conference on Smart Manufacturing Application* (2008), IEEE, pp. 437–440.
- [8] PENG, J., DING, Y., ZHANG, G., AND DING, H. An enhanced kinematic model for calibration of robotic machining systems with parallelogram mechanisms. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 59 (2019), 92–103.
- [9] ROTH, Z., MOORING, B., AND RAVANI, B. An overview of robot calibration. *IEEE Journal on Robotics and Automation* 3, 5 (1987), 377–385.
- [10] SCRAGGS, C., SMITH, T., SAWYER, D., AND DAVIS, M. Development of a non-parametric robot calibration method to improve drilling accuracy. In *SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility* (2021), vol. 3, SAE International, pp. 1152–1159.
- [11] SILVA, M. Simulation of the robot program in the virtual controller, 10 2016.
- [12] STEPHAN, P., HECK, I., KRAU, P., AND FREY, G. Evaluation of indoor positioning technologies under industrial application conditions in the smartfactorykl based on en iso 9283. *IFAC Proceedings Volumes* 42, 4 (2009), 870–875.
- [13] WANG, D.-S., LIU, X.-G., AND XU, X.-H. Calibration of the arc-welding robot by neural network. In *2005 International Conference on Machine Learning and Cybernetics* (2005), vol. 7, IEEE, pp. 4064–4069.
- [14] ZHOU, Z., XIONG, R., WANG, Y., AND ZHANG, J. Advanced robot programming: A review. *Current Robotics Reports* 1 (2020), 251–258.