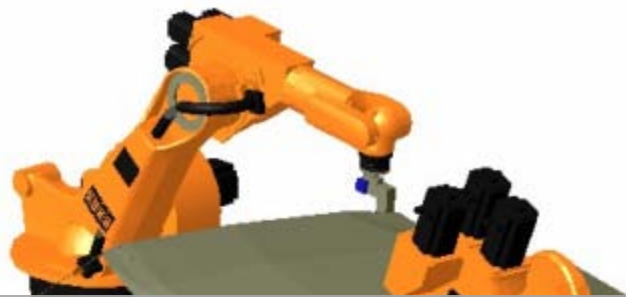
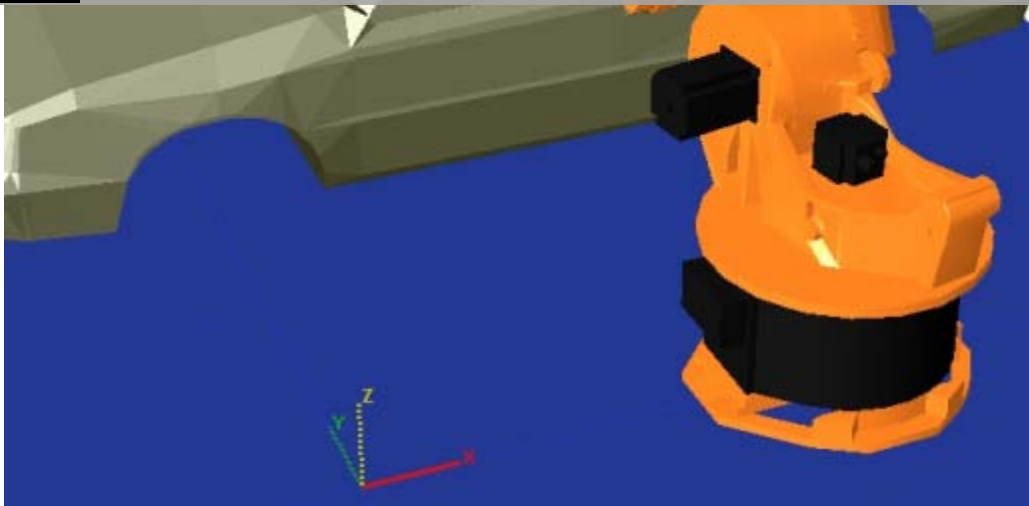


Бања Лука, октобар 2010.



ЕТФ
БАЊА
ЛУКА

КАЛИБРАЦИЈА КИНЕМАТИКЕ РОБОТА У КОНТЕКСТУ OFFLINE ПРОГРАМИРАЊА



Садржај:

1. Увод.....	3
2. КАЛИБРАЦИЈА РОБОТА	5
2.1 Контекст и терминологија	5
2.1.1 Програмирање робота	6
2.1.2 Offline системи за програмирање.....	9
2.1.3 Улога калибрације робота.....	12
2.2 Моделовање кинематике.....	16
2.2.1 Геометријско моделовање	19
2.2.2 Примјери не-геометријских модела.....	20
2.3 Имплементација	22
3. Закључак.....	23
4. Литература.....	24

1. УВОД

Калибрација кинематике робота је кључни захтјев за успјешну примјену *offline* програмирања у индустријској работници. Да би се компенzirала нетачност позиционирања алата робота, *offline* генерисане позиције треба да буду исправљене коришћењем калибрисаног кинематичког модела, наводећи робота у жељене позиције. Конвенционалне технике калибрације робота су чврсто ослоњене на нумеричким методима оптимизације за процјену параметара модела. Међутим, нелинеарности кинематичких једначина, неодговарајућа параметризација модела са могућим дисконтинуитетима параметара или редувантношћу, типично резултирају у лошем стању идентификације параметара. Истраживање у калибрацији кинематике робота је стога углавном фокусирано на проналажењу модела робота и одговарајуће прилагођених нумеричких метода да би се повећала тачност ових модела.

С обзиром на чињеницу да је развој компјутерског хардвера и софтвера имао брз пораст у задње двије деценије, предвиђања направљена 1970-их о изради поуздано прецизних програмабилних индустријских робота до 1990-их, ипак су се показала сувише оптимистична. Разлог за неостварена очекивања је комплексност проблема, наиме сложена механичка структура робота чије физичке особине су само недовољно представљене у моделу

контролера да би омогућиле роботу да изврши *offline* програмиране операције без грешака. Овај компромис употребе упрошћеног модела, у ствари једино кинематичке особине су узете у обзир, је учињен услед разматрања економске и рачунарске ефикасности.

С једне стране, модел робота мора бити сачуван прост¹ да би био у стању да омогући ефикасно израчунавање од стране контролера у присуству ограничења у реалном времену.

С друге стране, због економских ограничења у производњи робота параметри модела у контролеру су иницијализовани по *default*-у са номиналним вриједностима параметара (*one-size-fits-all* стратегија). Међутим, ове номиналне вриједности параметара су детерминисане у фази дизајна робота и само непотпуно одражавају стварно стање појединачног механичког система. У ствари, као резултат произвођачких толеранција механичка структура сваког робота има свој посебан скуп параметара (такође познат као његов потпис – енгл. *signature*), који се разликује међу роботима који припадају истој врсти модела. Током употребе хабање такође проузрокује раздешавање параметара. Додатно још ограничена, информација са присуством шума испоручена од стране сензора при функционисању робота унутар његовог радног окружења доприноси комплексности управљања роботом. Са контролером робота који има непрецизну информацију о радној ћелији и хардверу робота којима руководи, резултат је нетачно позиционирање алата робота, што јако ограничава примјенљивост *offline* програмирања.

Да превазиђе овај проблем је задатак калибрације робота, која се у бити бави идентификацијом тачнијих модела робота побољшавајући софтвер контролера и на тај начин повећавајући тачност позиционирања манипулатора.

¹ временско-инваријантни параметри само; игноришући динамичке ефекте и шум

2. КАЛИБРАЦИЈА РОБОТА

У овом поглављу се разматра калибрација робота и потреба за њом у контексту *offline* програмирања. Прије свега, дато је опште упознавање са терминологијом калибрације праћено описом главних фаза садржаних у процесу калибрације. Затим је представљено моделовање кинематике као основа калибрације робота и назначена су ограничења у актуелним калибрационим приступима.

2.1 Контекст и терминологија

Индустријски робот (*IR*) је дефинисан од стране *Robotics Industries Association (RIA)* као „репрограмабилни, вишефункционални манипулатор пројектован да премјешта материјал, дијелове, алатке или специјализоване уређаје посредством различитих програмираних покрета ради извршења разноврсних задатака“. Механичка структура индустријског робота, још позната као манипулатор је сачињена од низа чврстих веза – сегмената међусобно повезаних призматичним или цилиндричним зглобовима омогућујући релативно кретање (управљано актуаторима) сусједних

сегмената. Ова комбинована секвенца формира отворени кинематички ланац за већину типова манипулатора. Ако се крајеви овог ланца међусобно повезују, за манипулатор се каже да формира затворену кинематичку петљу (ланац).

Важне карактеристике квалитета и перформанси индустријског робота су његова поновљивост и тачност. Поновљивост у овом контексту је дефинисана као прецизност са којом је манипулатор у стању да се врати у референтну тачку у радном простору². Тачност је мјера девијације у погледу позиције и оријентације алата робота (такође названог енгл. *end-effector* или завршни уређај) између програмиране путање и стварно постигнуте путање. Иако у данашње вријеме роботи имају веома велику поновљивост, њихова тачност позиционирања је релативно лоша (незадовољавајућа). У ствари, тачност је до 10 пута (10x) типична поновљивост индустријских робота, што има вриједност од око $\pm(0.1 - 1.0)\text{mm}$. Обје, и тачност и поновљивост су под утицајем резолуције управљања (енгл. *control resolution*), која представља најмањи покрет манипулатора који је могуће испрограмирати.

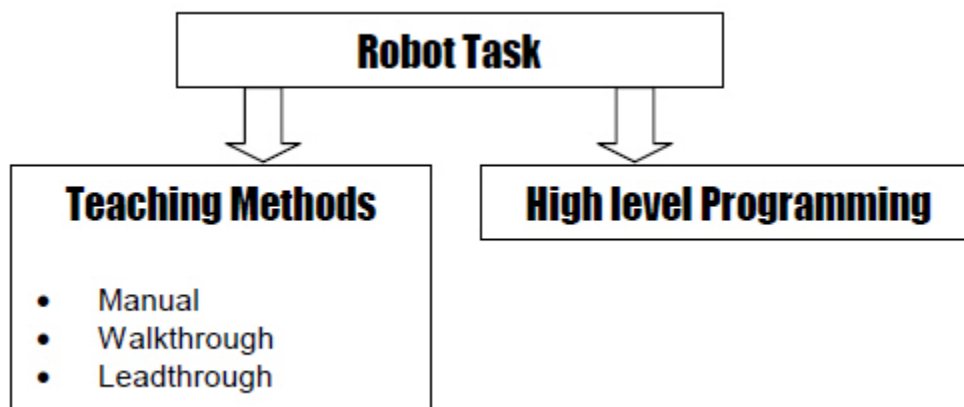
2.1.1 Програмирање робота

Методе, с обзиром да индустријски робот може бити „подучаван“ или програмиран да извршава задатке, могу бити класификоване на (i) методе учења и (ii) програмирање на вишем новоу.

(i) Методе учења су поступци који захтјевају да манипулатор буде премјештан ручно на све жељене позиције у радном простору од стране руковоаца. Најједноставнији метод је мануелни метод, који је више сматран *set-up* процедуром (подешавање механичких уређаја камере за контролу величине отвора сочива, уређаја за конвертовање кружног у линеарно кретање и прекидача – енгл. *mechanical stops, cams and switches*,

² Термин радни простор или радна енвелопа (овојница) се односи на област која је доступна манипулатору.

респективно) и односи се на роботе који не припадају високој технологији (јединице за узимање предмета са једног мјеста и одлагање на друго). *Walkthrough* или метод ручног вођења је техника програмирања непрекидне трајекторије у којој се рука робота ручно помјера дуж жељене путање и описана трајекторија се истовремено снима. Овај приступ, међутим, захтијева знатну количину меморије за смјештање података и често употребљава диск у ту сврху. Метод вођења, понекад зван и подстакнуто вођење (енгл. *powered leadthrough*), је највише уобичајена техника учења у којој руковалац поставља руку робота у циљне положаје типично користећи ручни привјесак за учење (енгл. *handheld teach-pendant*). Позиције су сачуване у меморији контролера док су подучаване. Након завршетка поступка подучавања, манипулатор може репродуковати путање по снимљеним локацијама веома прецизно користећи своју веома добру поновљивост.



Слика 2.1 - Методе програмирања робота

(i) Још нареднији начин и лако преносив метод је да се програмирају задаци да буду извршени у вишем програмском језику, као што је *VAL II*. Подршка опшних принципа структурног програмирања³, уграђени геометријски ентитети као што су фрејмови и положајне тачке (енгл. *locations points*) комбиновани са специфичним командама за покретање робота чине

³ секвенцирање, селекција и итерација

ове програмске језике ефикасним алаткама за развој комплексних задатака намијењених роботу, на примјер агрегација примитивних роботских инструкција у команде вишег нивоа. Међутим, подршка тих концепата захтијева виши степен сложености контролера робота него што је то случај са методама подучавања. Прво, контролер треба да извршава радње водећи рачуна о времену потребном за интерпретацију и извршење програма. Друго, позиције завршног уређаја робота у програму могу бити описане геометријским изразима релативно у односу на основни фрејм робота, на примјер. То захтјева од контролера да имплементира инверзни кинематички модел манипулатора да би конвертовао ове 3D положаје у конфигурације зглобова, што по реду имплицира тачно познавање параметар механичке структуре робота.

Темељна разлика између метода подучавања и програмирања на високом нивоу је та што при методама подучавања контролер је упознат са физичким циљем и информацијом како да досегне тај циљ. Ова информација је сачувана (или снимљена) по условима тренутног статуса управљачког система одређеног робота. Током извршења програма ова претходна стања могу бити поново успостављена веома прецизно захваљујући великој поновљивости. У програмирању на високом нивоу контролер располаже са „нејасним циљем“ – енгл. *“soft goal”* (радије него физичким циљем) описаним од стране програмера као положај у нпр. Картезијевим координатама. Пошто не постоји додатна информација, као што је како доћи до овог положаја, инверзни кинематички модел манипулатора је неопходан да би конвертовао положај у одговарајућу конфигурацију зглоба. Нетачности у овом моделу резултују у лошој апсолутној позиционој тачности манипулатора.

2.1.2 Offline системи за програмирање

Флексибилно и ефективно програмирање робота је постало значајан предмет разматрања у индустрији. У прошлости индустријски работи су били углавном програмирани мануелно тако што су били учени појединим задацима *on-line* као што је описано у секцији 2.1.1. Ипак, растућа комплексност задатака, као што су спајање заковицама или тачкасто заваривање у аутомобилској или ваздухопловној индустрији чине такав поступак подучавања крајње временски захтјевним и стога скупљим. Концептуално бољи приступ је да се минимизира човјекова интервенција у руковању роботима употребом *offline* система за програмирање (енгл. *Offline-Programming Systems – OLP*), који омогућују дизајн, генерисање и валидацију програма за роботе без пушања у рад физичког робота. *OLP* системи користе моделе робота и радне ћелије да створе виртуелно фабричко (енгл. *shop-floor* – радни простор сачињен од дијела фабрике у којем су смјештене машине) окружење у којем послови робота могу бити симулирани. Предности и бенефиције *OLP* система слиједе у наставку:

- Једноставан дизајн комплексних задатака (коришћењем импортованих *CAD* податка)
- Скраћивање времена програмирања и времена празног хода индустријских производних машина и уређаја (хардвер робота није укључен у процес програмирања, па према томе производња и програмирање нових задатака могу да се одвијају истовремено)
- Повећана флексибилност производње
- Сигурно дебаговање, оптимизација и валидација задатака (колизија и лакоћа приступа се провјеравају у симулацији, нема ризика од оштећења хардвера)
- Упрошћавање процеса оптимизације

- Брза валидација задатака (симулације се могу извршавати знатно брже него када се провјера задатка ради употребом хардвера)
- Нема опасности по људско здравље (програмирање у комфорном амбијенту, присуство програмера у физичкој радној ћелији није потребно).

Само неколико комерцијалних *OLP* система је данас расположиво са растућим бројем *PC* базираних рјешења као што су *Workspace*[®], *DELMIA/IGRIP*[®] (коришћен од нпр. *Boeing* компаније) и производи из скоријег времена од којих су *FAMOS*[®], *ABB*-ов *RobotStudio*[®] и *CAMELOT*-ов *Ropsim*[®].

Сљедеће компоненте су карактеристичне за све *OLP* системе:

- **Интегрисани *CAD* систем:** конструктивна геометрија чврстих тијела, библиотека стандардних *3D* примитива, *CAD* капацитети за импорт података (нпр. *DXF*, *IGES*)
- **Модул за моделовање и симулацију:** интерактивни моделер кинематике, моделирање динамике робота, симулација дискретног догађаја
- **Модул за визуелно представљање:** графичко представљање резултата, потпуно *3D* приказивање (*3D* рендеровање – исцртавање тродимензионалних објеката на дводимензионалној површини за представљање приказног уређаја, у нашем случају то је екран монитора), анимације робота и/или производног погона у реалном времену
- **Библиотека стандардних модела робота:** модели описују поједине кинематичке и динамичке карактеристике и садрже алгоритме за планирање путање
- **Модул за калибрацију робота:** скуп метода за нумеричку оптимизацију

- Интерпретер и јуџ генератор за напредне језике за програмирање робота.



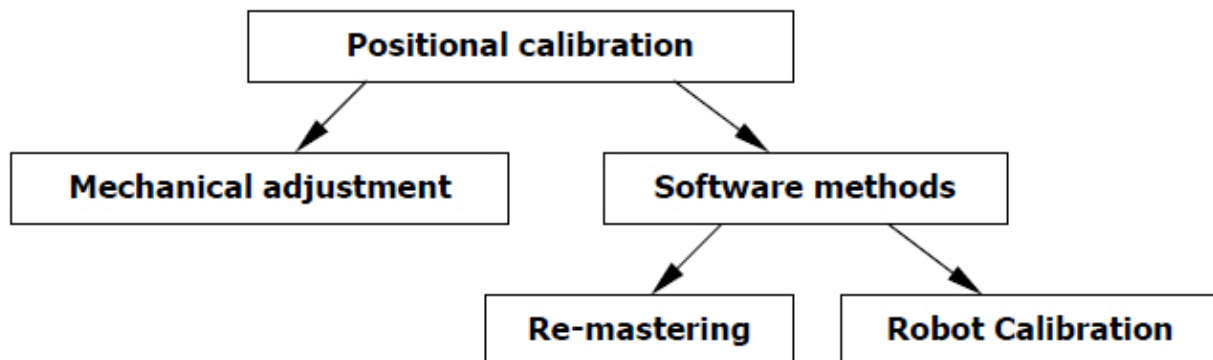
Слика 2.2 - OLP систем IGRIP®

Ограничења у примјени OLP система за програмирање робота су још увијек наметнута од стране лоше позиционе тачности индустријских робота и недостатака у егзактном моделирању тих нетачности. Одступања између идеализоване симулације у виртуелном окружењу и стварног система проузрокују да OLP систем генерише положаје робота са великим позиционим грешкама. Такође, алгоритми за планирање путање коришћени у OLP системима су често различити од или поједностављене верзије оних употребљених од стране произвођача робота, што резултује у непоузданој

информацији о времену циклуса – периоду (енгл. *cycle time*) и могућим колизијама (сударима).

2.1.3 Улога калибрације робота

Са циљем избегавања позиционих грешака алата робота потребно је примјенити позициону калибрацију, која у општем случају може бити подијељена на хардверски и софтверски оријентисане методе (Слика 2.3). Још тачније позиционирање алата робота може бити постигнуто одговарајућим модификовањем механичке структуре робота, на примјер замјењујући истрошене компоненте новим прецизније израђеним компонентама.

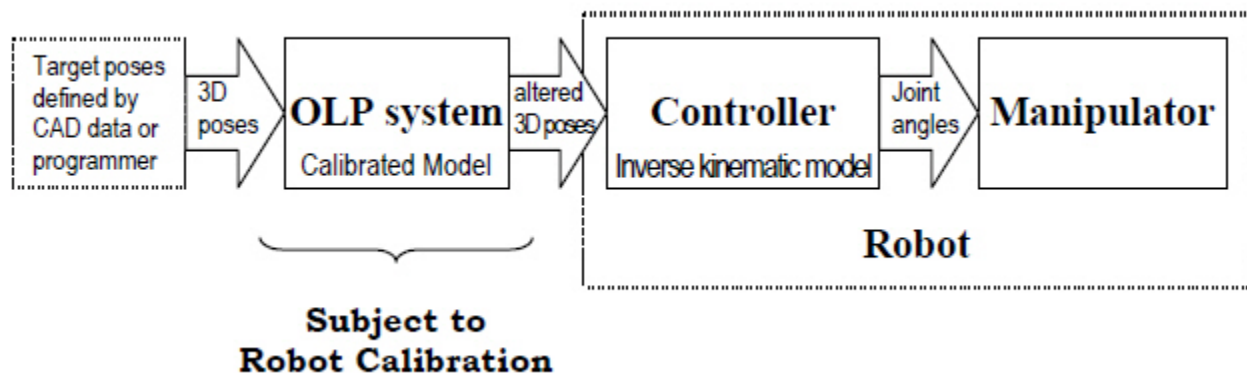


Слика 2.3 - Принципи позиционе калибрације

Софтвер-оријентисане методе пребацују позициону тачност на контролер робота или на ниво употребе робота – апликациони ниво робота (енгл. *robot application level*). Углавном, могуће је подесити тачност робота модификацијом одговарајућих параметара софтвера контролера. Међутим, пошто произвођачи робота обично не документују алгоритме и структуре података које користи контролер (политика „црне кутије“), овај метод је, одвојено од тога што није преносив, прилично ограничен. Било како било,

опште подржан софтверски метод који спада у ову категорију је познат као *re-mastering*. *Re-mastering* је метод гдје је зглоб премјештен у дефинисану позицију (обично означеном као нулта позиција, на примјер знаком на сусједном сегменту). Софтвер контролера је затим ажуриран (енгл. *updated*) овим новим референтним положајем издавањем одговарајуће наредбе контролеру.

Калибрација робота, као друга софтвер-оријентисана метода за регулисање тачности робота примјењује позициону компензацију на апликациони ниво робота засновану на калибрисаном моделу (Слика 2.4).



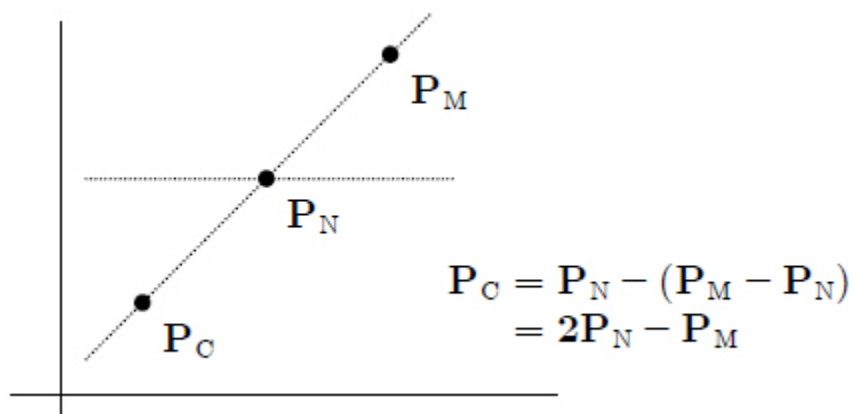
Слика 2.4 - Подручје примјене калибрације робота у offline програмирању

Положаји робота (само 3 позиционе компоненте) дефинисани у програмима, који су могли бити генерисани од стране *OLP* система, су модификовани одузимањем очекиване позиционе грешке процијењене од тачног калибрисаног модела (Слика 2.5).

Прије актуелне калибрације, скуп парова података (P_N, P_C) треба да буде генерисан, гдје P_N је номинални положај, нпр. добијен од *OLP* система, а P_C одговарајући кориговани положај (лажни циљ, енгл. *false target*⁴) да

⁴ Циљ статичке калибрације у контексту *offline* програмирања је да одреди тачан калибрациони модел, који обезбјеђује мапирање између номиналних и коригованих положаја завршног уређаја. Ови кориговани положаји представљају лажне циљеве који компензирају девијацију (одступање) путање и евентуално воде робот до жељеног мјеста.

компензира позициону грешку и доведе робот до жељеног положаја. Робот је програмиран да се креће по номиналим позицијама и тренутно достигнуте позиције су биљежене спољашњим уређајем за мјерење. Кориговани положај је добијен одузимањем позиционе грешке, представљене разликом између одговарајућег измјереног положаја P_M и номиналног положаја P_N , од номиналног положаја (Слика 2.5).



Слика 2.5 - Илустрација принципа корекције положаја

На овај начин положаји лажног циља су произведени са циљем да компензирају грешку позиционирања. Одступање манипулатора при овим преправљеним положајима најзад наводе робот ка жељеним позицијама. Овај процес је такође познат као компензација мјеста задатка (енгл. *task space compensation*) пошто су позиције и примјењене корекције дефинисане на мјесту задатка – енгл. *task space* (за разлику од мјеста зглоба – енгл. *joint space*).

Калибрација робота је израз у вези са скупом софтверских метода усмјерених ка идентификацији прецизних модела робота употребљених са циљем да повећају тачност позиционирања робота. Постоји разлика између статичких и динамичких метода калибрације. Статичка калибрација има за циљ идентификацију тачних модела узимајући у обзир све физичке особине и ефекте који имају утицаја на статичку (без промјене у времену – временски инваријантна) тачност позиционирања манипулатора. Динамичка

калибрација се ради на основу резултата статичке калибрације и поклања пажњу идентификацији модела описујући карактеристике кретања манипулатора (силе, обртни моменти актуатора) и динамичке ефекте који се јављају на манипулатору, као што су трење и крутост сегмената, итд. У циљу омогућења динамичке калибрације, мјерења кретања и сила манипулатора су потребна. Међутим, потешкоће у прецизном праћењу ових особина кроз радни простор робота и комплексан проблем симултане идентификације нпр. масе⁵ и параметара трења још увијек ограничавају могућност примјене динамичке калибрације.

Овдје ћемо разматрати статичку калибрацију кинематике робота, која је обично спроведена коришћењем 4 корака који слиједе:

1. Извођење погодног кинематичког модела обично заснованог на претходном инжењерском знању (одређивање структуре модела и номиналних вриједности параметара)
2. Мјерење локације завршног уређаја манипулатора у неколико позиција
3. Идентификација параметара модела (нумеричко подешавање обично засновано на методама најмањих квадрата) на темељу мјерења
4. Имплементација идентификованог модела.

⁵ Параметри масе сегмента могу ипак бити статички идентификовани употребом обртних сензора зглоба.

2.2 Моделовање кинематике

Статичка калибрација робота обично користи параметарске моделе кинематике манипулатора да нађе тачну повезаност између конфигурације зглобова и положаја завршног уређаја робота. Већина радова у овој области је објављена о методама директне калибрације, гдје је калибрација примјењена на модел директне кинематике:

$$y = f(\theta, \phi) \quad (2.1)$$

који израчунава положај завршног уређаја y (позиција и оријентација) из конфигурације зглоба θ користећи једначине у f зависећи од параметарског вектора ϕ да буде калибрисан. Поступак инверзне калибрације кинематике покушава да одреди параметарски вектор ϕ користећи инвертовани кинематички модел

$$\theta = f^{-1}(y, \phi) \quad (2.2)$$

Инверзна калибрација је у већини случајева компликованија, јер типично захтијева да модел f буде аналитички инвертибилан, што не мора бити случај са веома сложеним моделима и посебно са моделима манипулатора велике редундантности⁶.

Битне ствари за развој тачних параметарских кинематичких модела робота за калибрацију робота су пропорционалност и комплетност (потпуност, цјеловитост). Кинематички модел је дефинисан као пропорционалан⁷ ако мале промјене физичких особина могу бити

⁶ Редундантни манипулатори могу досегнути одређени положај користећи различите конфигурације зглобова.

⁷ Пропорционалност је понекад именована као „модел континуитета“ усљед њене сличности математичком појму континуитета.

представљене малим промјенама одговарајућих (повезаних) параметара модела. За кинематички модел се каже да је комплетан ако су све кинематичке особине манипулатора представљене одговарајућим независним параметрима модела. У овом случају све могуће конфигурације кинематике манипулатора могу бити довољно добро описане. Код непотпуних кинематичких модела број параметара модела је обично мањи од броја кинематичких особина манипулатора. Садржани параметри тада важе за моделоване особине као и за ефекте који нису моделовани. Према томе, непотпуни кинематички модели немају одговарајући однос између физичких параметара и параметара модела. Неки идентификациони алгоритам би можда могао да нађе оптималне вриједности параметара. Међутим, те вриједности су оптимизирани за тај посебан непотпуни модел и не могу одражавати физичке особине робота. Да би се постигло стање да кинематички модел буде потпун, потребно је довољно добро описати геометријске особине манипулатора као и не-геометријске утицаје на манипулатор (Табела 2.1).

За геометријске параметре је обично претпостављено да су временски инваријантни, што је згодно за постављање стратегије компензације да побољша тачност позиционирања. За грешке у геометријским параметрима показало се да имају највећи допринос позиционој грешки. На примјер, у експериментима са *Automatix AID-900 Robots* скоро 90% од *RMS* (енгл. *Root Mean Square* – корјени средњи квадрат) грешке је проузроковано офсетима угла зглоба. Код *TH8-ACMA* шесто-осног робота калибрација геометријских параметара је резултирала у побољшању тачности са $3mm$ на $0,69mm$. Усавршавањем модела узимајући у обзир не-геометријске утицаје постигнута су додатна побољшања тачности на $0,58mm$. Не-геометријски ефекти као што су нагло враћање и окретање зупчаника уназад – енгл. *gear backlash and tumbling* (услед зазора, (с)удара и оптерећења, тј. терета) нису једноставни за моделовање пошто се мијењају са положајем манипулатора и корисним теретом који (пре)носи. Ипак, њихов допринос грешки позиционирања

манипулатора не може бити занемарен ако се захтијева велика тачност позиционирања манипулатора.

Табела 2.1 – Физичка својства која треба узети у обзир у тачном (прецизном) кинематичком моделу

Геометријски параметри	Не-геометријски ефекти
<ul style="list-style-type: none"> • дужина сегмената • увијање сегмента-оријентација осе зглоба • офсети енкодера зглоба 	<p>Који се односе на зглоб:</p> <ul style="list-style-type: none"> • грешке преноса зупчаника (нпр. грешке на зупцу зупчаника) • попустљивост зглоба • ексцентричности зглоба, климање лежаја • зазор, празан ход, нагло враћање зупчаника • унакрсно спајање (спрезање) зглобова <p>Који се односе на сегмент:</p> <ul style="list-style-type: none"> • статичко угибање • топлотна експанзија <p>Који се односе на енкодер:</p> <ul style="list-style-type: none"> • нелинарна функција преноса (трансфер функција) • спрезање (пуштање у рад, енгл. <i>coupling</i>) • хистерезис

2.2.1 Геометријско моделовање

Најпопуларнији метод моделовања кинематике робота је редно састављање модела сегмената који су засновани на *Denavit-Hartenberg* (*DH*) параметризацији. Ови модели сегмената користе само четири геометријска параметра по сегменту да опишу релативни помјерај између ко-ординираних фрејмова сусједних сегмената. С обзиром да су кинематички модели базирани на *DH* параметрима веома компактни, из тог разлога су уобичајено имплементирани у софтверу контролера⁸. Међутим, за потребе калибрације чисти *DH* модели не испуњавају захтјеве комплетности и пропорционалности. Четири параметра нису довољна да опишу сваки произвољни помјерај два узастопна фрејма сегмената. Пошто се *DH* параметризација заснива на постојању заједничке нормале сусједних оса зглобова, није најбоље дефинисано у конфигурацијама гдје су сусједне осе зглобова паралелне или приближно паралелне⁹. Отуда је идентификација лоше постављена па неће бити успјешна или ће резултирати безначајним вриједностима параметара. Назначавајући овај проблем, *Hayati* је предложио модификацију *DH* модела увођењем алтернативне параметризације, која ипак није добро дефинисана за блиско окомите осе зглобова. *Hollerbach* је зато предложио примјену комплементарне комбинације *DH* и *Hayati* параметризације узимајући *Hayati* параметре кад год одгоравајући *DH* параметри нису добро дефинисани и обрнуто. Други истраживачи су предложили геометријска проширења конвенционалног *DH* модела. *Stone* је развио *S*-модел додајући 2 параметра *DH* моделу, што је имало за исход потпуну, али не и пропорционалну параметризацију. Као и са

⁸ *Denavit-Hartenberg* параметри су обично коришћени од стране произвођача робота да документују геометријске особине својих робота (нпр. приручник за робот *PUMA 761*).

⁹ Параметри неког модела са приближно паралелним сусједним осама зглобова су врло осјетљиви на мале физичке промјене (не-пропорционалност), пошто је услов континуитета модела нарушен прелазом са приближно паралелног на паралелни случај.

Hayati параметрима, параметри *S*-модела могу бити поново претворени у *DH* параметре.

Непотпун модел може се произвести у потпун подесним довавањем одређеног броја параметара. Ово, међутим, слаби перформансе израчунавања модела и може утицати на могућност идентификације параметара модела. Потпуна и пропорционална (јер је без сингуларитета) параметризација је *CPC* (енгл. *Complete and Parametrically Continuous* – потпун и без прекида параметара) модел, који је базиран на *DH* моделу проширеном за 2 параметра. Други потпуни модели су модел нулте референце (енгл. *zero-reference model*) и *Sheth-Uicker* модел у којем редувантни (сувишни) параметри треба да буду уклоњени прије калибрације (или да буду константни у току калибрације), што ипак није увијек узето у обзир да ће бити јасан задатак.

2.2.2 Примјери не-геометријских модела

Не-геометријски утицаји су обично моделовани додајући услове или још сложеније компоненте општем (укупном) геометријском моделу манипулатора. Пошто су не-геометријски ефекти највећим дијелом резултат карактеристика везаних за зглоб, најопштији прихваћен модел је прост линеарни корекциони модел зглоба:

$$\Theta = k\theta + \gamma \quad (2.3)$$

гдје је ефективни угао зглоба Θ израчунат из читања (показивања) сензора угла зглоба θ , у зависности од офсета нултог угла зглоба γ и прираста преноса зглоба k . Овај модел је примјењен на сваки зглоб, додајући још по 2 параметра по зглобу, да би био калибрисан на општем моделу. У другом истраживању, различити модели зглоба су примјењени на одабране зглобове (1-3):

$$\begin{aligned}
\Theta_1 &= \theta_1 + P_1 \cos(\theta_1) \\
\Theta_2 &= \theta_2 + P_2 \cos(\theta_2) + P_3 \sin(\theta_2) + P_4 \cos(\theta_2 + \theta_3^*) \\
\Theta_3 &= \theta_3^* + P_5 \sin(\theta_3^*) + P_6 \cos(\theta_3^*) + P_7 \cos(\theta_3^* + \theta_2) + P_8 \sin(\text{load})
\end{aligned} \tag{2.4}$$

гдје Θ_i представља ефективни (корисни) угао i -тог зглоба, θ_i очитање сензора угла i -тог зглоба, P_i је i -ти параметар који треба одредити и $\theta_3^* = \theta_3 - \pi/2$.

Другачији не-параметарски приступ је предлагао *Everett*, гдје је сваки параметар геометријског модела унапријеђен Фуријеовим редом - енгл. *Fourier Series (FS)*, с циљем да моделује (или апроксимира) утицај појединачно периодично наступајућих не-геометријских ефеката на ове параметре модела. Прихваћен од *Vincze*-а, Фуријеов ред је коришћен да опише утицаје као што су превртање (енгл. *tumbling*) на све геометријске параметре:

$$a(q) = a_{no} + \Delta a + \sum_{j=1}^{n_{sc}} (a_{js} \sin(j \cdot q) + a_{jc} \cos(j \cdot q)) \tag{2.5}$$

гдје је a_{no} номинална вриједност параметра, Δa геометријска грешка, q варијабла зглоба и a_{js} , a_{jc} Фуријеви коефицијенти које треба одредити. У овим експериментима је утврђено да су други и трећи степен *FS* били у стању да смање грешке превртања испод нивоа поновљивости осе, што је теоретска граница калибрације.

Други не-геометријски модели укључују зазор - енгл. *backlash* (на примјер $\theta_b = p_b \text{sign}(M)$ гдје је θ_b зазор зглоба, p_b параметар зазора и M момент силе на зглобу) или грешке преносног односа (нпр. полиноми или Фуријеов ред).

Vincze, такође, представља детерминистички метод аутоматског генерисања модела робота (базиран на његовом опису *SYNE*-осе: *Systematic Non-redundant and Extendible*). Овај метод саставља калибрациони модел од датог геометријског описа манипулатора и датих не-геометријских модела да

буду употребљени. Да би се избјегла редунданција сачињеног модела и да би се побољшала његова тачност, примјењена су детерминистичка правила да би се уклонили сувишни параметри. Ако тачност након идентификације параметара није задовољавајућа поступак моделовања може бити поновљен користећи другачији скуп не-геометријских модела.

2.3 Имплементација

Задњи корак у калибрацији робота типично укључује све поступке и механизме неопходне да пренесу резултате калибрације у праксу. У *offline* програмирању ово укључује имплементацију постпроцесора, који користи информацију из калибрисаног модела то изврши корекције над подацима о положају у програмским фајловима, који су генерисани од стране *OLP* система. Срећом, основни нумерички калибрациони методи и постпроцесори су постали уграђене компоненте у већини скорашњих *OLP* система. Према томе, од корисника се не захтијева да извршава овај задатак експлицитно.

3. ЗАКЉУЧАК

На основу изложеног, може се стећи утисак о сложености метода и самог процеса калибрације индустријских робота. Да би се добила захтјевана тачност, мора се моделовати већи број параметара и утицаја, од којих је већи број у тијесној спрези са механичким системом и механизмом робота.

4. ЛИТЕРАТУРА

A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Doctor of Philosophy:

Jens- Uwe Dolinsky,

The Development of a Genetic Programming Method for Kinematic Robot Calibration,



Liverpool John Moores University

Liverpool John Moores University

March 2001