

AUTOREFERÁT

disertační práce

PLZEŇ, 2016

Ing. Martin Švejda

Ing. Martin Švejda

Optimalizace robotických architektur

obor
Kybernetika

Autoreferát disertační práce k získání
akademického titulu "Doktor"

V Plzni, červen 2016

Disertační práce byla vypracována v prezenčním/kombinovaném doktorském studiu na katedře kybernetiky Fakulty aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni.

Uchazeč: Ing. Martin Švejda
Fakulta aplikovaných věd
Katedra kybernetiky
Univerzitní 8, 306 14 Plzeň

Školitel: Prof. Ing. Miloš Schlegel, CSc.
Fakulta aplikovaných věd
Katedra kybernetiky
Univerzitní 8, 306 14 Plzeň

S disertační prací je možno se seznámit na studijním oddělení FAV ZČU, Technická 8, UC 133.

Prof. Ing. Josef Psutka, CSc.
předseda oborové rady

Abstrakt

Předložená disertační práce se zabývá problematikou kinematické optimalizace robotických architektur formující klíčovou úlohu syntézy zejména v případě nestandardních kinematických architektur manipulátorů pro speciální aplikace. V práci jsou předloženy základní aspekty a požadavky pro strukturální a parametrickou syntézu (optimalizaci) manipulátorů. Hlavní náplň práce je věnována parametrické optimalizaci manipulátorů. Cílem je nalezení efektivních algoritmů optimalizace pro obecný manipulátor umožňující splnění reálných technických požadavků na manipulátorem vykonávanou úlohu. Dosažené výsledky jsou kategorizovány do tří sekcí věnovaných statické optimalizaci (nalezení konstantních kinematických návrhových parametrů), optimalizaci pohybu redundantních manipulátorů a využití optimálního řízení pohybu redundantních manipulátorů s ohledem na parametrickou a strukturální optimalizaci. Součástí práce je vlastní knihovna předimplementovaných funkcí a funkčních bloků (robotLib) pro tvorbu virtuálních simulačních modelů a implementaci optimalizačních algoritmů. Použití navržených metod je demonstrováno na řadě příkladů a podpořeno experimentálními výsledky.

Abstract

The thesis deals with kinematic optimization of robotic architectures which forms a crucial role in synthesis, especially for nonstandard kinematic architectures of manipulators for special applications. The basic aspects and requirements for structural and parametric optimization are presented. The main topic of the thesis is devoted to parametric optimization of manipulators. The goal is to develop effective optimization algorithms for general manipulators which are able to fulfill the technical requirements of given task. Achieved theoretical results are categorized into three sections devoted to static optimization (finding the constant kinematic parameters), optimal motion control of redundant manipulators and using optimal motion control of redundant manipulators for parametric and structural optimization. The thesis includes in-house library of functions and functional blocks (robotLib) for implementation of virtual simulation models and development of optimization algorithms. The proposed methods are demonstrated and proved by a number of examples and supported by experimental results.

Obsah

1. Úvod	1
2. Hlavní cíle práce	3
3. Současný stav parametrické optimalizace	5
4. Dosažené výsledky	16
5. Diskuze a závěr	29
Literatura	31
A. Životopis autora	33
B. Seznam publikovaných i nepublikovaných prací autora	34

1. Úvod

Robotika, jejíž obsah beze sporu spadá do dnes velmi rozšířené vědní disciplíny mechatronika, hraje nedílnou součást v podstatě ve všech průmyslových odvětvích. Roboty samotné, stejně tak jako celé robotizované systémy a komplexní automatické linky, dnes výrazným a nenahraditelným způsobem realizují nejen celé výrobní procesy (automatické svařování, obrábění, broušení, lakování, kompletace, vizuální kontroly atd.), ale také činnosti, jakými jsou průzkumy neznámých prostředí, metody nedestruktivního zkoušení materiálových defektů (ultrazvukové zkoušení, zkoušení vířivými proudy atd.), asistované chirurgické zákroky atd. K úspěšnému návrhu kompletního robotického systému však vede dlouhá a komplikovaná cesta, kde jsou ve většině případů všechny dílčí úkoly vzájemně propojeny. Tento fakt zůstává bohužel velmi často opomenut a k návrhu robotických systémů se přistupuje až příliš automaticky, dokonce jsou některé klíčové elementární problémy dnes považovány za zcela vyřešené a odsouvané tak odbornou veřejností do pozadí. V souvislosti s robotikou se tak dnes především hovoří o problémech spojených s umělou inteligencí jako je automatické rozpoznávání pro navádění robotů, autonomní chování a rozhodování, procesy učení atd. Bezpochyby takové problémy v moderní vědě hrají důležitou roli však spíše na úrovni humanoidních a částečně či zcela autonomních zařízení. Nicméně ani takové systémy se v robotice neobejdou bez uspokojivého řešení problémů elementárních. Právě tyto elementární problémy nakonec diktují, jestli celé robotické zařízení je vůbec funkční s ohledem na realizování požadovaných pohybů, energetické náročnosti, volbu a dimenzování nosných konstrukcí, kloubů a pohonů, realizace řídicích algoritmů, a je tedy možné efektivně aplikovat další „vyšší“ algoritmy umělé inteligence. Mezi tyto běžně řešené úkoly při návrhu robotického manipulátoru patří zejména: přímá a inverzní kinematická a dynamická úloha, singulární polohy a pracovní prostor manipulátoru, plánování pohybu manipulátoru a vlastní návrh jejich řízení. Většina výše uvedených problémů je obsáhle shrnuta v řadě předních a kvalitních publikacích [18], [24], [9], [17]. Přestože se může zdát, že jsou tyto elementární problémy vyřešeny, stále se, zejména pak v praktických a průmyslových aplikacích, objevují nové problémy a úskalí, které nejsou v žádném případě vyřešeny uspokojivě. Jedním

1. Úvod

z klíčových problémů je právě optimální návrh robotických architektur, konkrétně **strukturální a parametrická optimalizace**, kterému je věnována předložená práce. Neformálně lze předložený problém formulovat jako zásadní otázku při návrhu robotických architektur, a to: *Jakým způsobem konstruovat robotický manipulátor, aby vyhověl všem požadavkům a zároveň maximálním možným způsobem redukoval komplikace při řešení přidružených problémů (výpočet kinematiky, návrh algoritmů řízení, atd.)*. Tato oblast návrhu je bohužel často opomíjena, což s sebou v řadě případů nese nemalé problémy, které mnohdy lze jen obtížně dále řešit, nebo dokonce tyto není možné řešit vůbec.

Předložená práce byla motivována celou řadou reálných problémů, které musely být řešeny s ohledem na optimální návrh často nestandardních robotických architektur s komplexními požadavky na jejich chování (kriteria optimality, omezení, atd.), mezi nejvýznamnější projekty lze řadit následující: Sérío-paralelní manipulátor AGEBOT (průmyslové mytí technologických dílů, EuroTec JKR s.r.o.), manipulátor SÁVA (NDT kontroly potrubních svarů, ÚJV Řež, a.s.), paralelní zakladač (paletizační robot, EuroTec JKR s.r.o.), manipulátoru ALICE (výukový model pro robotiku, katedra kybernetiky, FAV ZČU v Plzni).

2. Hlavní cíle práce

Problémy, které byly průběžně formulovány v rámci řešení uvedených projektů, byly dále rozvíjeny a konkretizovány za účelem vytvoření ucelené metodologie zabývající se optimalizací robotických architektur. Hlavní cíle a odpovídající přínosy (výsledky) práce lze kategorizovat následovně:

- **Vývoj a implementace podpůrných SW prostředků pro efektivní tvorbu virtuálních simulačních modelů:** Jedná se o soubor předimplementovaných funkcí v programovém prostředí Matlab a funkčních bloků v prostředí Matlab/Simulink/SimMechanics (knihovna **robotLib**), které umožňují efektivně realizovat standardní kinematické a dynamické úlohy a rychlým modulárním způsobem tak vytvářet komplexní simulační virtuální modely. Současně je výhodné tyto SW prostředky využívat přímo v optimalizačních algoritmech (např. za účelem vyčíslení hodnoty kritériální funkce, atd.).

Identifikace vlastního přínosu práce: Knihovna **robotLib** byla kompletně vyvinuta a implementována v rámci řešené práce a intenzivně využívána v algoritmech kinematické optimalizace předložených robotických architektur.

- **Algoritmy parametrické optimalizace**
Hlavní náplň práce spadá do tématu *parametrické syntézy (optimalizace)*, kterou budeme dále kategorizovat následovně:

- **Statická optimalizace:** Nalezení takových *konstantních* kinematických návrhových parametrů manipulátoru, které optimalizují hodnotu zvoleného kritéria optimality.

Identifikace vlastního přínosu práce: Modifikace a implementace *Culling* algoritmu globální optimalizace (i pro více hledaných optim, 2., 3. atd. optimum); demonstrace na vlastním komplexním příkladu paralelního manipulátoru zakladače (analýza vhodnosti paralelních architektur oproti sériovým).

2. Hlavní cíle práce

- **Optimální řízení redundantních manipulátorů:** Souvislost optimálního řízení pohybu redundantních manipulátorů s *parametrickou optimalizací* je motivována myšlenkou rozvolnění některých původně konstantních kinematických návrhových parametrů a jejich uvažování jako přidavné redundantní kloubové souřadnice. V takovém případě může být úloha *parametrické optimalizace* transformována na problém optimalizace pohybu redundantních manipulátorů. Optimalizační algoritmus je založen na principu optimálního řízení (s uvažováním kritérií optimality: minimalizace normy kloubových rychlostí a minimalizace normy kloubových sil/silových momentů).

Identifikace vlastního přínosu práce: Podrobná analýza stávajících metod numerických algoritmů pro optimální pohyb redundantních manipulátorů; definice optimalizační úlohy pro redundantní manipulátory prostřednictvím přístupu optimálního řízení (konkrétně variačního počtu); důkaz existence analytického řešení algebraické nutné podmínky existence minima; polynomiální odhad řešení získaných diferenciálních rovnic s okrajovými podmínkami; demonstrace algoritmů na vlastních simulačních modelech.

- **Využití optimálního řízení pohybu redundantních manipulátorů s ohledem na strukturální a parametrickou optimalizaci:** Nastíněn nový přístup k optimalizaci robotických architektur založený na využití optimalizace pohybu redundantních manipulátorů s uvažováním zobecněného kinematického popisu manipulátoru. Předložený přístup je diskutován s ohledem na využití pro statickou parametrickou optimalizaci a jako dílčí nástroj strukturální optimalizace (konkrétně s ohledem na optimální volbu aktuátorů).

Identifikace vlastního přínosu práce: Nový přístup k zobecnění standardního popisu kinematické architektury manipulátoru založený na cíleném „rozvolnění“ D-H parametrů (až 4 nezávislé parametry - aktuátory na jedno rameno manipulátoru); modifikace kinematického a dynamického modelu manipulátoru; aktualizace knihovny **robotLib**; využití pro parametrickou i strukturální optimalizaci (vlastní demonstrační příklady); formulace předpokladů pro další výzkumné aktivity.

3. Současný stav parametrické optimalizace

S ohledem na parametrickou optimalizaci kinematické architektury manipulátoru, tedy nalezení optimálních hodnot kinematických návrhových parametrů, které splňují podmínky optimality, lze formulovat následující klíčové problémy:

- **Kritéria optimality a definice opt. úlohy:** Je intuitivně zřejmé, že nevhodná formulace optimalizační úlohy může snadno vést ke zcela nesmyslným či nerealizovatelným výsledkům i za předpokladu, že je tato úloha, ve smyslu své definice, vyřešena korektně. Klíčový faktorem je vhodná volba kritéria optimality.
- **Řešení optimalizační úlohy:** Nalezení extrému (lokálního, globálního) hodnoty kritériální funkce a odpovídajícího argumentu reprezentovaného zvolenými kinematickými návrhovými parametry. Právě zde existuje celá řada metod, zahrnující standardní gradientní či negradientní přístupy, metody přímého prohledávání, intervalovou analýzu, heuristické metody atd. V literatuře lze nalézt i řadu alternativních přístupů k řešení. Jedná se o oblast výzkumu, která otevírá nové možnosti optimalizace a syntézy manipulátorů za účelem jejich optimálního chování vzhledem k definované úloze. Klasická úloha kritériální optimalizace je ekvivalentně nahrazena úlohou, která principiálně umožňuje takový problém řešit s využitím odlišných přístupů a jejich výsledky lze potom vhodně interpretovat na problém původní. Zásadním přínosem takových metod je možnost získání určité přidané hodnoty.
- **Optimální řízení pohybu redundantních manipulátorů - motivace práce - nový směr k optimalizaci robotických architektur?** Odlišný přístup od *statické* parametrické optimalizace (nalezení konstantních hodnot kinematických parametrů manipulátoru), kdy je apriori uvažováno rozvolnění původně konstantních návrhových parametrů a jejich další interpretace

3. Současný stav parametrické optimalizace

v podobě redundantních kloubových souřadnic (kinematická redundance). Z optimálního průběhu kloubových souřadnic lze následně specifikovat takové kloubové souřadnice, které:

- By měly být voleny jako fixní na určité hodnotě, neboť vykazují např. malou varianci během pohybu manipulátoru) - vede na úlohy *statické parametrické optimalizace*
- By měly být voleny jako aktuátory, neboť vykazují největší varianci během pohybu manipulátoru - vede na dílčí úlohu *strukturální optimalizace*

V literatuře lze nalézt řadu algoritmů pro řešení kinematických úloh redundantních manipulátorů s ohledem na dané kritérium optimality.

Kritéria optimality a definice opt. úlohy

Definice kritéria optimality jsou s ohledem na parametrickou optimalizaci klíčovým problémem zahrnující kvalitativní zhodnocení chování daného manipulátoru pro konkrétní hodnotu jeho kinematických návrhových parametrů. Drtivá většina všech dnes používaných lokálních kritérií optimality vychází z vlastností kinematického jakobiánu manipulátoru. Kinematický jakobián manipulátoru vztahuje rychlosti kloubových a zobecněných souřadnic a zároveň kloubových sil/silových momentů a sil/silových momentů působících na jeho koncový efektor. Souhrnně jsou tyto závislosti označovány jako **kinetostatická dualita**, viz [24, 9, 17], a lze je formulovat následujícími vztahy:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{J}(\mathbf{Q}) \cdot \dot{\mathbf{Q}}, \quad \mathbf{F} = \left(\mathbf{J}^T(\mathbf{Q})\right)^{-1} \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (3.1)$$

kde $\dot{\mathbf{X}}$ je vektor rychlostí zobecněných souřadnic (typicky vektor translační a úhlové rychlosti posledního ramena manipulátoru), $\dot{\mathbf{Q}}$ je vektor rychlostí kloubových souřadnic, \mathbf{F} je vektor sil/silových momentů působících na koncový efektor a $\boldsymbol{\tau}$ je vektor sil/silových momentů působících v jednotlivých kloubech manipulátoru (aktuátorech).

Mezi základní standardně používaná kritéria optimality, definovaná skalární funkcí $J(\mathbf{Q})$ (vyplývající z vlastností kin. jakobiánu), patří:

3. Současný stav parametrické optimalizace

- **Maximalizace rychlostí koncového efektoru manipulátoru:** Omezení na max. normu kloubových rychlostí (maximalizace minimálního singulárního čísla σ_{\min} jakobiánu):

$$\|\dot{\mathbf{Q}}\| \leq \frac{1}{\sigma_{\min}(\mathbf{J}(\mathbf{Q}))} \cdot \|\dot{\mathbf{X}}\|, \quad \sigma_{\min}(\mathbf{J}(\mathbf{Q})) \rightarrow \text{MAX} \quad (3.2)$$

- **Maximalizace sil/silových momentů koncového efektoru manipulátoru:** Omezení na max. normu kloubových sil/silových momentů (minimalizace maximálního singulárního čísla σ_{\max} jakobiánu):

$$\|\boldsymbol{\tau}\| \leq \sigma_{\max}(\mathbf{J}(\mathbf{Q})) \cdot \|\mathbf{F}\|, \quad \sigma_{\max}(\mathbf{J}(\mathbf{Q})) \rightarrow \text{MIN} \quad (3.3)$$

- **Podmíněnost kinematického jakobiánu manipulátoru:** Kompromis mezi maximalizací požadovaných rychlostí a sil/silových momentů (jako zřejmě přirozeně protichůdných kritérií). Často definováno jako maximalizace převrácené hodnoty tzv. *čísla podmíněnosti* $\text{cond}(\mathbf{J}(\mathbf{Q}))$ jakobiánu (poměru min. a max. singulárního čísla):

$$\frac{1}{\text{cond}(\mathbf{J}(\mathbf{Q}))} = \frac{\sigma_{\min}(\mathbf{J}(\mathbf{Q}))}{\sigma_{\max}(\mathbf{J}(\mathbf{Q}))} \in \langle 0, 1 \rangle \rightarrow \text{MAXIMALIZACE} \quad (3.4)$$

Převrácená hodnota čísla podmíněnosti je nazývána často v literatuře jako tzv. *dexterity index*.

I přesto, že podmíněnost jakobiánu reprezentuje vhodné kritérium pro optimalizaci manipulátorů, stále lze v takovém přístupu odhalit celou řadu problémů, které iniciují k hledání jiných kritérií optimality, s ohledem na dostupnou literaturu jmenujme některé klíčové:

- **Nekonzistentnost fyzikálních jednotek:** Kinematický jakobián vztahuje prvky vektorů s různými fyzikálními jednotkami a číslo podmíněnosti jakobiánu závisí na aktuálně uvažovaných hodnotách, např. nelze relevantně porovnávat translační a úhlovou rychlost. Tento problém lze kompenzovat vhodným normováním kinematického jakobiánu, tzv. proces homogenizace jakobiánu [33, 5, 37, 13]. Bez explicitního uvažování fyzikálních jednotek mluvíme někdy o tzv. vyvažování matic (jakobiánu) založeném na podobnostním zobrazení matic, viz algoritmy např. v Matlabu (funkce `balance`) či součást knihovny metod LAPACK (Linear Algebra PACKage) pro řešení problémů lineární algebry. V literatuře lze dále nalézt celou řadu

3. Současný stav parametrické optimalizace

dalších přístupů k nalezení vhodného kritéria optimality na základě daných konzistentních měření (vlastností), které jsou nezávislé na skutečných fyzikálních jednotkách či velikosti (měřítku) manipulátoru a zároveň je možné kritérium snadno vypočítat, např. zcela nový přístup založený na základě generovaného výkonu koncovým efektem manipulátoru je popsán v [15, 16].

- **Pouze polohové závislosti:** Kinetostatická kritéria optimality (singulární čísla, číslo podmíněnosti) nezahrnují vyčerpávajícím způsobem dynamické vlastnosti manipulátoru, neboť jsou závislá výhradně na jeho aktuální poloze. Zároveň kompromisní přístup (na základě *dexterity* indexu) je vhodný přístup zejména v případě nutnosti obecného vzájemného porovnávání zvolených manipulátorů na základě právě kinetostatických ukazatelů. V reálně definovaných problémech však často potřebujeme manipulátor dimenzovat výhradně pro konkrétní typ úlohy, a to často přímo na danou předepsanou trajektorii pohybu. V takových případech jsou kinetostatická kritéria optimality nedostačující a je třeba přistoupit ke generování kritérií s uvažováním kompletních dynamických rovnic chování manipulátoru (závislých nejen na poloze, ale i na rychlosti a zrychlení kloubových souřadnic).
- **Zahrnutí omezení, vypořádání se se singularitami:** Během optimalizačního procesu, kdy dochází ke změně kinematických parametrů manipulátoru se může snadno manipulátor dostávat do blízkosti singulárních poloh nebo dokonce za hranice pracovního prostoru (neexistuje řešení inverzní kin. úlohy). Společně s dalšími možnostmi omezení kladenými na manipulátor je tak třeba taková omezení integrovat do algoritmů optimalizace. Často se tak děje prostřednictvím penalizací [29, 22, 28], kdy je k danému kritériu optimality aditivně přičítána penalizační část (spolehlivý, robustní přístup s možností diferencovat omezení na „měkká a tvrdá“).

Z matematického hlediska lze optimalizační úlohu definovat následovně:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\xi}^* &= \underset{\boldsymbol{\xi} \in \Xi}{\operatorname{argmin}} (J(\mathbf{X}_{\text{opt}}, \boldsymbol{\xi})) \\ J^*(\mathbf{X}_{\text{opt}}) &= J(\mathbf{X}_{\text{opt}}, \boldsymbol{\xi}^*) = \min_{\boldsymbol{\xi} \in \Xi} (J(\mathbf{X}_{\text{opt}}, \boldsymbol{\xi})) \end{aligned} \quad (3.5)$$

vzhledem k omezení: $\mathbf{Eq}(\mathbf{X}, \boldsymbol{\xi}) = 0$
 $\mathbf{Ineq}(\mathbf{X}, \boldsymbol{\xi}) > 0$

kde $J(\mathbf{X}_{\text{opt}}, \boldsymbol{\xi})$ je skalární hodnota kritériální funkce, $\boldsymbol{\xi}$ je vektor vyšetřovaných parametrů z přípustné množiny Ξ , \mathbf{X} je stav manipulátoru (např. poloha, rychlost, zrychlení) v pracovním prostoru z uvažované množiny, přes kterou dochází

3. Současný stav parametrické optimalizace

k optimalizaci \mathbf{X}_{opt} . Funkce $\mathbf{Eq}(\mathbf{X}, \boldsymbol{\xi})$ resp. $\mathbf{Ineq}(\mathbf{X}, \boldsymbol{\xi})$ definují omezení daná rovnostmi resp. nerovnostmi.

Standardní přístupy k řešení

Budeme-li na optimalizační úlohu nahlížet jako na obecný problém nalezení optima nelineární skalární funkce $J(\mathbf{X}, \boldsymbol{\xi})$ více proměnných (vektor $\boldsymbol{\xi}$) s uvažováním omezení typu rovností a nerovností, viz definice (3.5), lze nalézt celou řadu přístupů, které jsou velmi detailně shrnuty v celé řadě publikací, viz [28, 22, 20]. Vzhledem k tomu, že cílem předložené práce není explicitně hledat nové metody řešení obecné optimalizační úlohy, soustředíme se pouze na základní možnosti a charakteristiky s ohledem na využití standardních algoritmů pro optimalizaci kinematiky manipulátorů.

V případě apriori uvažovaných omezení typu rovností a nerovností na optimalizační úlohu se jedná především o metody jako: *Metoda Lagrangeových multiplikátorů* (obecná nelineární kritériální funkce i funkce omezení rovnostmi), *lineární programování* (lineární kritériální funkce a lineární funkce omezení nerovnostmi), *kvadratické programování* (kvadratická kritériální funkce a lineární funkce omezení nerovnostmi), *sekvenční kvadratické programování* (aproximace obecné nelineární kritériální funkce a funkce omezení nerovnostmi metodou kvadratického programování v každém kroku iteračního algoritmu).

V předložené práci je výhradně využívána metoda penalizací (viz výše uvedené výhody), v takovém případě je problém nalezení opt. řešení redukován na optimalizaci bez omezení a nabízí se tak možnost využití standardních *gradientních* [20, 22, 28] a *negradientních* algoritmů (algoritmy *přímého prohledávání* [11], *heuristické metody* [6]) a některých dalších *speciálních* algoritmů (např. algoritmy intervalové analýzy [18]). Stručně lze takové metody optimalizace bez omezení shrnout následovně:

- **Gradientní algoritmy** (typicky využívají výpočet gradientu/Hessiánu krit. funkce), řadí se mezi ně zejména: *metoda největšího spádu* (požadován výpočet pouze gradientu, horší konvergence v blízkosti optima), *Newtonova metoda* (nutný navíc výpočet Hessiánu, lepší konvergence v blízkosti optima), metody *Line search* (zlepšení konvergence, problém s explicitním nalezením velikosti posunu v prohledávaném směru), metody *Trust region* (doplňují metody *Line search*, nejprve nalezena důvěryhodná oblast daná

3. Současný stav parametrické optimalizace

vhodnou aproximací, např. kvadratickou, kritériální funkce a velikost posunu je vypočtena exaktně, typicky např. *Levenberg-Marguardt* algoritmus efektivně využívající kompromis mezi metodami *největšího spádu* a *Newtonovou metodou*), metoda *konjungovaných gradientů* (nalezení optima kvadratické kritériální funkce v konečném počtu kroků díky vhodné (ortogonální) volbě směrů prohledávání a v nich dílčích posunů, vede na efektivní metody i pro obecné nelineární krit. funkce), *Qasi-Newtonova metoda* (analogie k *Newtonově metodě* s uvažováním aproximace Hessiánu pozitivně definitní maticí v každém kroku algoritmu - např. algoritmy *Davidon-Fletcher-Powell*, *Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno*), alternativu tvoří jednoduché aproximační metody *Spherical quadratic steepest descent* [30] (vychází z aproximace krit. funkce sférickou kvadratickou funkcí s diagonální maticí Hessiánu).

- **Negradientní metody** (apriori nevyžadující explicitní výpočet gradientu, Hessiánu), robustní, jednoduché algoritmy založené často pouze na vyčíslení hodnot krit. funkce mezi něž se řadí:

Algoritmy přímého prohledávání a jejich zástupci: *Pattern search algorithm* (přímé prohledávání stavového prostoru krit. funkce na základě předlohy (pattern) a její vhodné modifikace), *Nelder-Mead algoritmus* [14] (simplexové prohledávání), *Controlled random search* [8, 21] (pravděpodobnostní přístup v generování směru prohledávání), *Monte Carlo* metody [23, 12] (pravděpodobnostní přístup v generování kandidátů na optimum).

Heuristické metody (integrace empirických znalostí, poznatků a pozorování) a jejich zástupci: *Genetic algorithms* (evoluční přístup), *Simulated annealing* (pravděpodobnostní přístup ponechání „horších“ kandidátů na optimum), *Particle swarm optimization* (analogie k chování hejna jedinců), *Gravitational search algorithm* (analogie k chování hmotných částic v grav. poli).

- Speciální přístupy - např. **intervalová analýza** (intervalový přístup k vyčíslení a hodnocení krit. funkce) je zajímavým přístupem k optimalizaci s následujícími klíčovými vlastnostmi: Umožňuje nativně integrovat zao-krouhlovací numerické chyby a omezení na uvažovanou výrobní toleranci, nalezené opt. řešení je dáno kontinuem (intervalem, množinou) - nikoliv jediným řešením (navíc jsou nativně vyloučeny diskretizační chyby), možno hledat množiny opt. řešení pro různá kritéria a poté vybírat kompromis, algoritmus lze přirozeně paralelizovat.

3. Současný stav parametrické optimalizace

Vedle standardních algoritmů lze v literatuře nalézt různé podoby alternativních algoritmů a postupů, které se buď původní problém definované optimalizační úlohy snaží vyřešit jeho transformací na ekvivalentní problém, či je optimalizační úloha nativně formulována specificky k uvažovanému druhu optimalizace. Zajímavé oblasti lze kategorizovat následovně:

- **Dynamická metoda optimalizace** [26, 28] - převedení klasické optimalizační úlohy s obecně definovanou kritériální funkcí na ekvivalentní problém pohybu hmotné částice v konzervativním silovém poli, tzv. *Leap Frog Optimizer* (relativně spolehlivá a robustní metoda, není nutné počítat Hessián, obecně pomalejší konvergence pro „plochá“ optima, lineární nárůst výpočetního času pro zvyšování dimenze hledaných parametrů, modifikace pro uvažování omezení formou penalizací, tzv. *Leap Frog Optimizer for Constrained optimization* [31, 27])
- **Metoda rozvolnění kinematických parametrů manipulátoru** [4, 7, 2] - rozvolnění kinematických parametrů manipulátoru a jejich optimalizace, kinematická redundance manipulátoru. Idea metody spočívá v zavedení elastických vazeb (lineární pružina s danou přirozenou délkou) na původní místa pevných ramen manipulátoru. Cílem optimalizačního algoritmu je minimalizace výsledné potenciální energie pružin nalezením vhodných přirozených délek (kinematických parametrů) podél požadované trajektorie. Přirozené délky pružin jsou poté modifikovány v dílčích iteracích algoritmu za účelem dosažení jejich minimální variance (vedoucí na konstantní či téměř konstantní kinematické návrhové parametry).
- **Vyvažování sil/silových momentů manipulátoru** [19, 34, 35] - specifický problém minimalizace sil/silových momentů v aktuátorech manipulátoru prostřednictvím vyvažování. Vyvažování manipulátorů tvoří určitou alternativu k obecnému problému parametrické optimalizace manipulátoru, neboť se snaží specifickými strukturálními změnami (např. přidáním protizávaží či pružných elementů) pasivně docílit eliminace silového/momentového působení vyvozované pohybem hmotných ramen manipulátoru. Existují dva základní typy vyvažování: *Statické vyvažování* (celková potenciální energie zůstává konstantní pro všechny uvažované polohy manipulátoru, což odpovídá konstantní poloze těžiště manipulátoru, vyvažování je typicky prováděno přidáním protizávaží či pružin do konstrukce manipulátoru), *dynamické vyvažování* (zobecněný případ statického vyvažování, kdy předpokládáme nulové působení všech sil/silových momentů na základnu manipulá-

3. Současný stav parametrické optimalizace

toru při pohybu - potažmo redukci reziduálních vibrací, silového /momentového namáhání aktuátorů).

Standardní přístupy k řízení redundantních manipulátorů

V rámci předložené práce byly analyzovány současné standardní přístupy k optimalizaci pohybu redundantních manipulátorů vycházející z numerických řešení inverzní kinematiky neredundantních manipulátorů (v případech, kdy je výpočetně náročné či nemožné získat analytické řešení). Lze ukázat [24], že standardní numerický iterační algoritmus je dán jako:

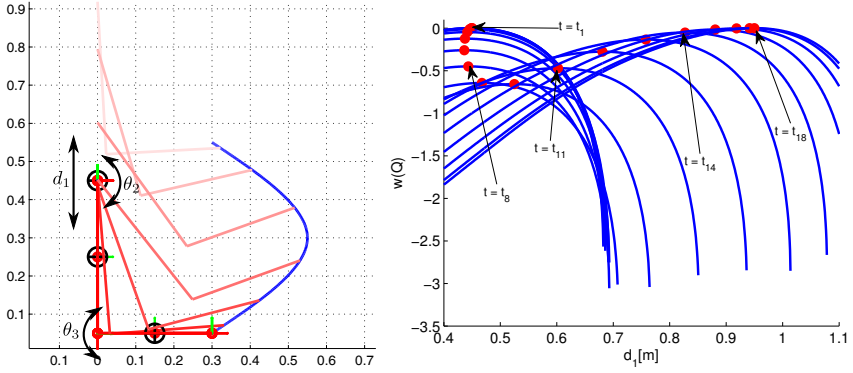
$$\begin{aligned} \mathbf{Q}(t_{k+1}) = \mathbf{Q}(t_k) + \left[\mathbf{J}^\dagger(\mathbf{Q}(t_k)) \left(\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}[\mathbf{X} - \mathbf{G}(\mathbf{Q}(t_k))] \right) + \right. \\ \left. + \left(\mathbf{I} - \mathbf{J}^\dagger(\mathbf{Q}(t_k)) \cdot \mathbf{J}(\mathbf{Q}(t_k)) \right) \cdot k_0 \cdot \left(\frac{\partial w(\mathbf{Q})}{\partial \mathbf{Q}} \right)^T \Big|_{t=t_k} \right] \Delta t \end{aligned} \quad (3.6)$$

kde $\mathbf{Q} \in \mathbb{R}^n$ jsou kloubové souřadnice, $\mathbf{X} \in \mathbb{R}^m$ jsou požadované zobecněné souřadnice (poloha konc. efektoru), $\mathbf{J} \in \mathbb{R}^{m,n}$ je jakobián, $\mathbf{G}(\mathbf{Q})$ je řešení přímého geometrického modelu manipulátoru ($\mathbf{Q} \rightarrow \mathbf{X}$), \mathbf{J}^\dagger je zobecněná inverze, \mathbf{K} je pozitivně stabilní matice, k_0 je váhová konstanta, \mathbf{I} je jednotková matice, t_k resp. Δt je diskrétní čas resp. jeho přírůstek a $w(\mathbf{Q})$ je (polohově závislá) optimalizovaná (maximalizovaná) kritériální funkce, typicky volena např. jako:

- Maximalizace vzd. od singularních poloh: $w(\mathbf{Q}) = \sqrt{\det(\mathbf{J} \cdot \mathbf{J}^T)}$
- Maximalizace vzd. od limitních poloh aktuátorů:
 $w(\mathbf{Q}) = -\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{q_i - \bar{q}_i}{q_i^{max} - q_i^{min}} \right)^2$, \bar{q}_i je střed intervalu $\langle q_i^{min}, q_i^{max} \rangle$.

Příklad optimalizace pohybu planárního redundantního manipulátoru typu **PRR** (redundantní souřadnice - pohyb lin. pojezdu d_1) a průběh kritériální funkce $w(\mathbf{Q})$ v závislosti na posunu d_1 pro vybrané časové okamžiky je znázorněn na Obrázku 3.1 (v případě maximálního požadovaného přiblížení natočení ramen úhlům $-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}$).

3. Současný stav parametrické optimalizace



Obrázek 3.1.: Optimalizace - polohově závislé kritérium (minimalizace vzd. od limitních poloh)

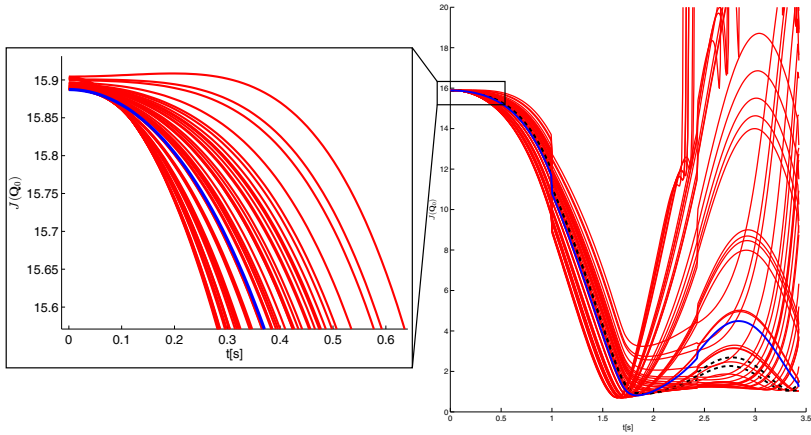
Problémem v předloženém přístupu optimalizace pohybu redundantních manipulátorů je zejména fakt, že optimalizační algoritmus nikterak nezohledňuje dynamické chování manipulátoru (pouze polohově závislé kritérium). Navíc může v tomto důsledku docházet k nalezení nedosažitelných (byť optimálních) poloh kloubových souřadnic s ohledem na požadovanou rychlost/zrychlení. V případě, že je cílem optimalizace minimalizovat síly/silové momenty v aktuátorech (integrace dynamického modelu), je možné původní algoritmus přeformulovat [10, 3] a hledat tak optimální hodnoty zrychlení kloubových souřadnic:

$$\ddot{\mathbf{Q}} = \mathbf{J}^\dagger \cdot (\ddot{\mathbf{X}} - \dot{\mathbf{J}} \cdot \dot{\mathbf{Q}}) - [\mathbf{M} \cdot (\mathbf{I} - \mathbf{J}^\dagger \cdot \mathbf{J})]^\dagger \cdot [\mathbf{M} \cdot \mathbf{J}^\dagger \cdot (\ddot{\mathbf{X}} - \dot{\mathbf{J}} \cdot \dot{\mathbf{Q}}) + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{Q}} + \mathbf{G}] \quad (3.7)$$

kde \mathbf{M} , \mathbf{C} , \mathbf{G} jsou matice dynamického modelu manipulátoru: $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{Q}} + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{Q}} + \mathbf{G}$ ($\boldsymbol{\tau}$ jsou kloubové síly/silové momenty).

Na Obrázku 3.2 je znázorněn optimální průběh hodnoty kritériální funkce $J = \boldsymbol{\tau}^T \boldsymbol{\tau}$ (modře) podél uvažované trajektorie pohybu manipulátoru. Červeně jsou znázorněny průběhy kritériální funkce pro perturbované optimální hodnoty zrychlení kloubových souřadnic. Přesto, že je integrován dynamický model manipulátoru, uvedený přístup optimalizace pohybu redundantních manipulátorů vykazuje klíčový nedostatek.

3. Současný stav parametrické optimalizace



Obrázek 3.2.: Optimalizace - integrace dyn. modelu (minimalizace kloubových sil/momentů)

Vzhledem k faktu, že optimalizační algoritmus hledá v daném časovém okamžiku taková kloubová zrychlení, které optimalizují v tomto konkrétním časovém okamžiku hodnotu kritéria jedná se o *lokální algoritmus*. Tzn. výsledky optimalizace nemají globální platnost a nelze zajistit, že podél uvažované trajektorie koncového efektoru neexistuje v globálním měřítku (např. ve smyslu obsahu plochy pod průběhem kritéria - tzn. integrální kritérium) „vhodnější“ řešení. Z Obrázku 3.2 je patrné, že zřejmě existují taková řešení, která zajišťují globálně nižší hodnotu kritéria podél trajektorie a nejsou přitom z lokálního hlediska optimálním řešením (černé čárkované průběhy kritéria pro jednotlivé perturbace). Pro lokální optimální řešení zároveň nutně platí, že kritériální funkce bude na počátku pohybu manipulátoru vždy nabývat optimálních (minimálních) hodnot (viz detail počátku vývoje kritéria), neboť optimalizací je nalezeno v čase $t = 0$ takové řešení, pro které je hodnota kritéria minimální a zároveň hodnotu kritéria neovlivňuje žádný předchozí vývoj stavu manipulátoru. Taková vlastnost může být velmi nepříjemná v případě, kdy optimalizace je prováděna podél dlouhých trajektorií, kdy lokální optimalizace může s rostoucím časem snadno vézt do stavu, který je z hlediska hledaného minima v globálním měřítku nevhodný. Jinými slovy, lokální optimální průběh stavu manipulátoru negarantuje žádná omezení či podmínky na vývoj tohoto stavu, snadno se může stát, že (byť lokálně optimální) průběh pohybu

3. *Současný stav parametrické optimalizace*

manipulátoru povede s rostoucím časem na vysoké požadavky na síly/silové momenty v některých aktuátorech, které zajistí udržení polohy koncového efektoru na požadované trajektorii. Vystává tedy otázka, jak pohyb redundantního manipulátoru plánovat takovým způsobem, aby bylo splněno nějaké globálně platné kritérium.

4. Dosažené výsledky

V oblasti statické optimalizace

Nový přístup ke globální statické optimalizaci robotických architektur byl založen na tzv. *Culling* algoritmu. Optimalizační úloha statické optimalizace byla definována jako metoda *maxmin* (resp. *minmax* s uvažováním převrácené hodnoty kritériální funkce):

$$\begin{aligned}
 J^*(\mathbf{X}, \boldsymbol{\xi}^*) &= \max_{i=1\dots N} \left(\min_{j=1\dots M} J_{\text{val}}(j, i) \right) \\
 i^* &= \operatorname{argmax}_{i=1\dots N} \left(\min_{j=1\dots M} J_{\text{val}}(j, i) \right), \quad \boldsymbol{\xi}^* = \Xi\{i^*\}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

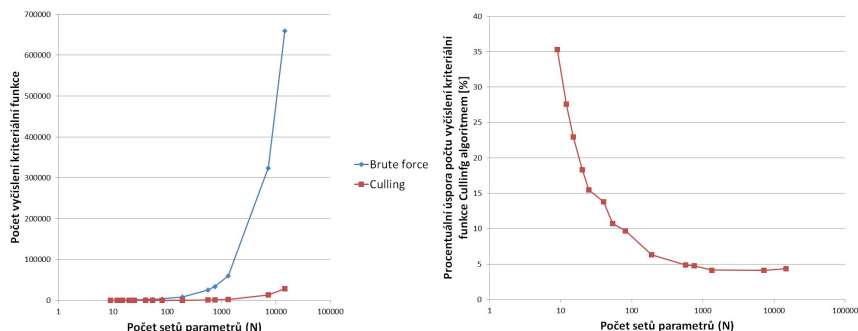
kde \mathbf{J}_{val} je matice reprezentující stavový prostor: M řádků reprezentující diskretizované hodnoty poloh pracovního prostoru manipulátoru přes který se optimalizuje \mathbf{X}_{opt} , N sloupců reprezentující diskretizované hodnoty kinematických návrhových parametrů (optimalizovaných) z přípustného prostoru hodnot Ξ , prvky matice jsou dány hodnotou uvažované kritériální funkce v daném bodě pracovního prostoru $\mathbf{X}\{j\} \in \mathbf{X}_{\text{opt}}$ pro danou hodnotu diskretizovaných návrhových parametrů $\boldsymbol{\xi}\{i\} \in \Xi$:

$$\mathbf{J}_{\text{val}} = \begin{bmatrix} J(\mathbf{X}\{1\}, \boldsymbol{\xi}\{1\}) & J(\mathbf{X}\{1\}, \boldsymbol{\xi}\{2\}) & \dots & J(\mathbf{X}\{1\}, \boldsymbol{\xi}\{i\}) & \dots \\ J(\mathbf{X}\{2\}, \boldsymbol{\xi}\{1\}) & J(\mathbf{X}\{2\}, \boldsymbol{\xi}\{2\}) & \dots & J(\mathbf{X}\{2\}, \boldsymbol{\xi}\{i\}) & \dots \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \\ J(\mathbf{X}\{j\}, \boldsymbol{\xi}\{1\}) & J(\mathbf{X}\{j\}, \boldsymbol{\xi}\{2\}) & \dots & J(\mathbf{X}\{j\}, \boldsymbol{\xi}\{i\}) & \dots \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \end{bmatrix}$$

Cílem algoritmu je nalezení takové sady $\boldsymbol{\xi}^* = \Xi\{i^*\}$ kinematických návrhových parametrů, pro kterou vykazuje manipulátor nejvyšší minimální hodnotu kritéri-

4. Dosažené výsledky

ální funkce $J(\mathbf{X}, \boldsymbol{\xi})$ přes celý diskretizovaný pracovní prostor \mathbf{X}_{opt} . *Culling* algoritmus s výhodou využívá tzv. metody prořezávání, kdy jednoznačně apriori neoptimální podmnožiny prohledávaného prostoru přípustných kinematických návrhových parametrů jsou z algoritmu explicitně vyřazeny. Takovým prořezáváním nedochází ke ztrátě globálního optima, ale výpočetní náročnost (ve smyslu potřebného počtu vyčíslení hodnot kriteriální funkce) může být výrazně snížena. *Culling* algoritmus byl z původní podoby [1, 32] modifikován na použití pro formulovaný optimalizační problém, implementován (součást knihovny **robotLib**) a dále nově rozšířen o nalezení dalších následujících extrémů (2., 3., atd. globální optimum), které umožňuje spouštět následné algoritmy zpřesňující lokální optimalizace z různým počátečních podmínek a minimalizovat tak možnost konvergence algoritmu do lokálních extrémů. Zároveň bylo provedeno relevantní porovnání výpočetní náročnosti (ve smyslu počtu vyčíslení hodnot kriteriální funkce) *Culling* algoritmu s metodou *hrubé síly* prohledávání stavového prostoru, viz Obrázek 4.1 (na příkladu optimalizace architektury planárního paralelního zakladače, viz Obrázek 4.2).



Obrázek 4.1.: Výpočetní náročnost *Culling* algoritmu ($M = 45$)

Algoritmus globální optimalizace byl demonstrován na vlastním příkladu optimalizace kinematických parametrů paralelního manipulátoru zakladače s cílem odpovědět na otázku, zda-li je vhodné modifikovat původní návrh zakladače (s jedním neseným aktuátorem o hmotnosti M_{mot} na prvním pohyblivém ramenu) předávnu paralelní konstrukcí umožňující umístění aktuátorů nepohyblivě na základně manipulátoru, viz Obrázek 4.2. Optimalizovanou (minimalizovanou) účelovou funkcí byla maximální norma silových momentů v aktuátorech manipulátoru

4. Dosažené výsledky

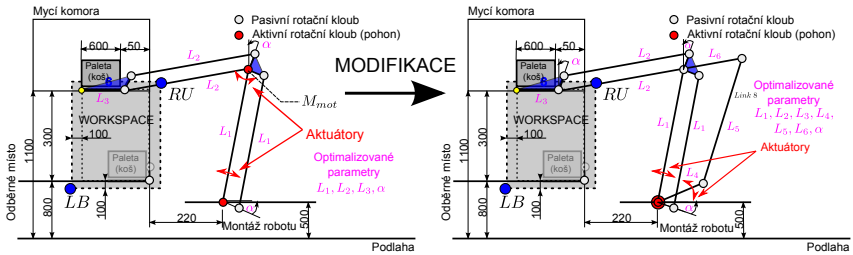
při uvažování pohybu manipulátoru s definovaným zrychlením a_{nom} koncového efektoru z nulové rychlosti (z klidu) do libovolného směru v diskretizovaném pracovním prostoru. Takto nově definovaná účelová funkce umožňuje zahrnovat nejen projevy gravitačního působení, ale zároveň i zohledňovat dynamické chování manipulátoru (vážené parametrem a_{nom}) pouze z definice dosažitelných poloh manipulátorem bez nutnosti konkrétní znalosti trajektorie koncového efektoru (ve smyslu polohy, rychlosti, zrychlení). Bylo ukázáno, že výpočetní tvar účelové funkce je dán jako:

$$J_{obj}(\mathbf{X}) = \|\boldsymbol{\tau}\|_{max} = \sigma_{max}(\mathbf{M}(\mathbf{Q}_a) \cdot \mathbf{J}_{man}^{-1}(\mathbf{Q}_a)) \cdot a_{nom} + \|\mathbf{G}(\mathbf{Q}_a)\| \quad (4.2)$$

kde \mathbf{Q}_a jsou polohy aktuátorů, $\sigma_{max}(\star)$ je max. sing. číslo matice, \mathbf{J}_{man} je jacobíán manipulátoru a matice \mathbf{M} a \mathbf{G} jsou definovány dynamickým modelem manipulátoru (ve výpočetním tvaru prostřednictvím knihovny **robotLib**). Výsledná kritériální funkce byla definována jako:

$$J(\mathbf{X}, \boldsymbol{\xi}) = \frac{1}{J_{pen} + J_{obj}} \quad (4.3)$$

kde J_{pen} byla zvolena penalizační funkce zahrnující omezení na existenci řešení inverzní kinematické úlohy (prioritní omezení) a minimální úhel γ_{min} svíraný paralelogramy ramen manipulátoru (jinak dochází k přiblížení kinematické singularitě).

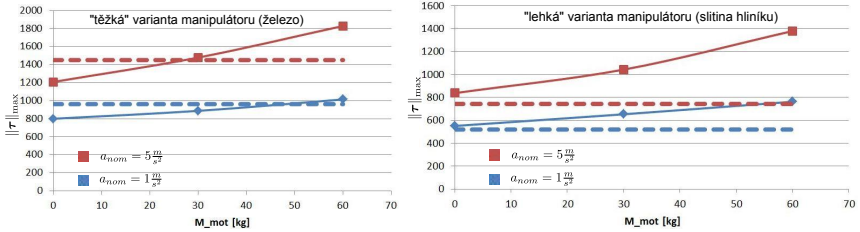


Obrázek 4.2.: Optimalizované architektury planárního zakladače: Původní manipulátor (PM, vlevo) a modifikovaný manipulátor (MM, vpravo)

Výsledky optimalizace jsou shrnuty na Obrázku 4.3 pro „těžkou“ (ramena vyrobená ze železa) a „lehkou“ (ramena vyrobená ze slitiny hliníku) variantu manipulátoru pro dvě hodnoty zrychlení koncového efektoru a_{nom} . V případě „těžké

4. Dosažené výsledky

varianty“ je zřejmé, že použít **MM** místo **PM** je výhodné až pro hmotnost použitého neseného pohonu převyšující hodnotu 50kg (pro malé požadavky na zrychlení koncového efektoru) a hodnotu 30kg (pro velké požadavky na zrychlení koncového efektoru). V případě „lehké varianty“ je zřejmé, že **použít MM místo PM je výhodné vždy**, a to i za předpokladu, že nesený pohon by nic nevážil!



Obrázek 4.3.: Maximální hodnoty normy silových momentů aktuátorů $\|\tau\|_{\max}$ přes uvažovaný pracovní prostor \mathbf{X}_{opt} (omezení splněna) pro různé hmotnosti neseného aktuátoru M_{mot} . Plná čára: **PM**, čárkovaná čára: **MM**

V oblasti optimálního řízení red. manipulátorů

Zejména lokální charakter optimalizace pohybu redundantních manipulátorů prostřednictvím standardně používaných výše zmíněných přístupů přináší problémy (globální optimalita hraje majoritní význam). V drtivé většině případů požadujeme totiž optimální pohyb manipulátoru podél celé požadované trajektorie, tzn. od času $t_0 = 0$ do nějakého času t_f . Lokální charakter optimalizace, který sice podmínky optimality splňuje, ale negarantuje „rozumný“ průběh sledovaného kritéria v celém časovém horizontu, je nežádoucí. V předložené práci byl proto formulován nový přístup k řízení pohybu redundantního manipulátoru s ohledem na globální optimalizaci podél celé uvažované trajektorie pohybu založený na úloze optimálního řízení následovně:

Inverzní geometrický model (**IGM**, tedy závislosti poloh) a inverzní kinematická úloha (**IKK**, tedy závislosti rychlosti, zrychlení) lze pro redundantní manipulátor stupně redundance $r = n - m$ s kloubovými souřadnicemi $\mathbf{Q} = \{\mathbf{Q}_{\text{par}}, \mathbf{Q}_{\text{orig}}\}$, $\mathbf{Q} \in \mathbb{R}^n$, $\mathbf{Q}_{\text{par}} \in \mathbb{R}^r$ (kl. souřadnice parametrizující řešení **IGM**, **IKK**, výběr \mathbf{Q}_{par} z \mathbf{Q} je volitelný), $\mathbf{Q}_{\text{orig}} \in \mathbb{R}^{n-r}$ (původní kl. souřadnice) a zobecněnými

4. Dosažené výsledky

souřadnicemi $\mathbf{X} \in \mathbb{R}^m$ zapsat jako:

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}_{\text{orig}} &= \mathbf{IGM}(\mathbf{X}, \mathbf{Q}_{\text{par}}), & \dot{\mathbf{Q}}_{\text{orig}} &= \mathbf{IIK}(\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}}, \mathbf{Q}_{\text{par}}, \dot{\mathbf{Q}}_{\text{par}}) \\ \ddot{\mathbf{Q}}_{\text{orig}} &= \mathbf{IIK}(\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}}, \ddot{\mathbf{X}}, \mathbf{Q}_{\text{par}}, \dot{\mathbf{Q}}_{\text{par}}, \ddot{\mathbf{Q}}_{\text{par}}) \end{aligned} \quad (4.4)$$

V případě řízení pohybu redundantního manipulátoru nutně platí, že existuje nekonečně mnoho řešení \mathbf{IGM} , \mathbf{IIK} , které je parametrizováno právě kl. souřadnicemi \mathbf{Q}_{par} (parametrizující volný „vnitřní“ pohyb manipulátoru pro známý (daný) pohyb koncového efektoru $\mathbf{X} = \mathbf{X}(t)$). Vztah mezi polohami, rychlostmi a zrychleními kl. souřadnic \mathbf{Q}_{par} lze tak z fyzikální podstaty realizovatelnosti vyjádřit lineárním dynamickým systémem

$$\dot{\mathbf{q}}(t) = \underbrace{\mathbf{A} \cdot \mathbf{q}(t) + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}(t)}_{\mathbf{f}(\mathbf{q}(t), \mathbf{u}(t))}, \quad \mathbf{A} \in \mathbb{R}^{2r, 2r}, \quad \mathbf{B} \in \mathbb{R}^{2r, r} \quad (4.5)$$

se stavem $\mathbf{q}(t)$ a řízením $\mathbf{u}(t)$ ve tvaru¹:

$$\mathbf{q}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{\text{par}}[1](t) \\ \dot{\mathbf{Q}}_{\text{par}}[1](t) \\ \mathbf{Q}_{\text{par}}[2](t) \\ \dot{\mathbf{Q}}_{\text{par}}[2](t) \\ \vdots \\ \mathbf{Q}_{\text{par}}[r](t) \\ \dot{\mathbf{Q}}_{\text{par}}[r](t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}(t) = \ddot{\mathbf{Q}}_{\text{par}}(t),$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Optimalizační úlohu s globálním kritériem optimality $J(\mathbf{q}_0, \mathbf{u}_{t_0}^{t_f})$, $\mathbf{q}_0 = \mathbf{q}(t_0)$

$$J(\mathbf{q}_0, \mathbf{u}_{t_0}^{t_f}) = \int_{t_0}^{t_f} g(\mathbf{q}(t), \mathbf{u}(t), t) dt \quad (4.7)$$

kde $g(\mathbf{Q}, \dot{\mathbf{Q}}, \ddot{\mathbf{Q}}) = g(\mathbf{q}(t), \mathbf{u}(t), t)$ je časově variantní váhová funkce (závislá na okamžitém bodu trajektorie koncového efektoru, neboť $\mathbf{X} = \mathbf{X}(t)$),

lze poté definovat ve smyslu nalezení optimálního řízení (zrychlení parametrizujících kloubových souřadnic) dynamického systému jako:

$$\mathbf{u}_{t_0}^{*t_f} = \underset{\mathbf{u}_{t_0}^{t_f}}{\operatorname{argmin}} \left(J(\mathbf{q}_0, \mathbf{u}_{t_0}^{t_f}) \right) \quad (4.8)$$

¹ $\mathbf{Q}[i]$ vyjadřuje i -tý prvek vektoru, $\mathbf{Q}[i : j]$ vyjadřuje i -tý až j -tý prvek vektoru.

4. Dosažené výsledky

Váhová funkce $g(\mathbf{q}, \mathbf{u}, t)$ byla volena za účelem minimalizace kvadrátu normy **klobových rychlostí** a normy **sil/silových momentů** v aktuátorech. Lze snadno ukázat, že její tvar je dán jako:

- **Minimalizace rychlostí:**

$$g(\mathbf{q}(t), \mathbf{u}(t), t) = \dot{\mathbf{Q}}^T(\mathbf{q}(t), t) \cdot \dot{\mathbf{Q}}(\mathbf{q}(t), t) + \mathbf{u}^T(t) \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{u}(t) \quad (4.9)$$

kde \mathbf{R} je volená váhová matice řízení.

Praktický význam kritéria: Výsledná hodnota kritéria J je úměrná celkové dráze najeté všemi klobovými souřadnicemi, tedy v podstatě se jedná o hodnotu udávající celkové provozní opotřebení manipulátoru najetou vzdáleností všemi klouby (opotřebení motorů, převodovek, atd.).

- **Minimalizace sil/silových momentů:**

$$g(\mathbf{q}(t), \mathbf{u}(t), t) = \boldsymbol{\tau}^T(\mathbf{q}(t), \mathbf{u}(t), t) \cdot \boldsymbol{\tau}(\mathbf{q}(t), \mathbf{u}(t), t) \quad (4.10)$$

kde $\dot{\mathbf{Q}}(\mathbf{q}(t), t)$ resp. $\boldsymbol{\tau}(\mathbf{q}(t), \mathbf{u}(t), t)$ je vektor klobových rychlostí resp. sil/silových momentů (získaný z výpočetního tvaru řešení inverzního kinematického resp. dynamického modelu v knihovně **robotLib**).

Praktický význam kritéria: Minimalizace celkové spotřebované energie pro požadovaný pohyb manipulátoru.

Je známo, že optimalizační úlohu definovanou kritériem (4.7) s vazební podmínkou (4.5) je možné řešit dvěma odlišnými přístupy, a to metodami založené na Bellmanově optimalizační rekurzi (dynamické programování, v diskretizované podobě) a metodami založenými na Hamiltonovu přístupu (variační počet). V předložené práci byly oba přístupy analyzovány a nakonec zvolen Hamiltonův přístup z následujících důvodů: Bez omezujících diskretizačních chyb (např. interpolace diskretizovaných hodnot stavu/řízení při opt. rekurzi a související problém s nalezením přípustných řešení), výpočetně menší náročnost (oproti prohledávání stavového prostoru), znalost konkrétní jedné opt. trajektorie z daných počátečních podmínek je dostačující.

Dle Hamiltonova principu musí optimální řízení $\dot{\mathbf{Q}}_{\text{par}}^*(t) = \mathbf{u}^*(t) \in \mathbf{u}^{*t_0^{t_f}}$ splňovat

4. Dosažené výsledky

soustavu algebro-diferenciálních rovnic:

$$\dot{\mathbf{q}}^* = \mathbf{A}\mathbf{q}^* + \mathbf{B}\mathbf{u}^* \quad (4.11)$$

$$\dot{\mathbf{p}}^* = -\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{p}^* - \frac{g(\mathbf{q}^*, \mathbf{u}^*, t)}{\partial \mathbf{q}} \quad (4.12)$$

$$0 = -\mathbf{B}^T \cdot \mathbf{p}^* - \frac{g(\mathbf{q}^*, \mathbf{u}^*, t)}{\partial \mathbf{u}} \quad (4.13)$$

Současně s okrajovými podmínkami:

$$\mathbf{q}^*(t_0) = \mathbf{q}_0 \quad (4.14)$$

$$\mathbf{p}^*(t_f) = \mathbf{0} \quad (4.15)$$

kde \mathbf{p} je vektor kostavu (stejné dimenze jako stav \mathbf{q}).

V předložené práci bylo ukázáno, že je možná analyticky a algoritmizovatelně (prostřednictvím předimplementovaných funkcí knihovny **robotLib**) vyřešit nutnou algebraickou podmínku (4.13) ve tvaru $\mathbf{u} = \mathbf{u}(\mathbf{q}, \mathbf{p}, t)$, a to nejen pro optimalizaci rychlostí (triviální problém):

$$\mathbf{u}(\mathbf{q}, \mathbf{p}, t) = -\frac{1}{2}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{p} \quad (4.16)$$

Ale zejména pro optimalizaci sil/silových momentů - důkaz je založen na algoritmizovatelném řešení inverzních okamžitých kinematických úloh (včetně nalezení příslušných jakobiánů), dopředného/zpětného dynamického modelu a vhodném přeuspořádání získaných závislostí dle volby původních a parametrizujících kloubových souřadnic. Vzhledem k rozsahu odvození jej zde dále nebudeme uvádět.

Vyřešením algebraické nutné podmínky $\mathbf{u} = \mathbf{u}(\mathbf{q}, \mathbf{p}, t)$ tak lze původní problém řešení soustavy algebro-diferenciálních rovnic (4.11 - 4.15) redukovat na řešení dvoubodového problému (*Boundary Value Problem - BVP*, soustava obyčejných diferenciálních rovnic s okrajovými podmínkami) ve tvaru:

$$\dot{\mathbf{S}}(t) = \mathbf{\Gamma}(\mathbf{S}(t), t), \quad \mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{q} \\ \mathbf{p} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{\Gamma} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}\mathbf{q} + \mathbf{B}\mathbf{u}(\mathbf{q}, \mathbf{p}, t) \\ -\mathbf{A}^T\mathbf{p} - \frac{g(\mathbf{q}, \mathbf{u}(\mathbf{q}, \mathbf{p}, t), t)}{\partial \mathbf{q}} \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

kde $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^{2r}$, $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^{2r}$, s okrajovými podmínkami:

$$\mathbf{S}(t_0)[1 : 2r] = \mathbf{q}_0, \quad \mathbf{S}(t_f)[2r + 1 : 4r] = \mathbf{0}$$

4. Dosažené výsledky

BVP byl v předložené práci řešen ve dvou fázích, neboť se jedná z principu o řešení silně nelineární soustavy diferenciálních rovnic s polovinou počátečních podmínek definovaných na počátku a polovinou na konci zkoumaného času. Fáze řešení byly následující:

- **Polynomiální odhad řešení optimalizační úlohy:** Cílem je nalézt takovou aproximaci optimální trajektorie $\hat{\mathbf{S}}(t)$, která se blíží co nejvíce optimálnímu řešení $\mathbf{S}^*(t)$ a zároveň je odhad dostatečně výpočetně nenáročný a rychlý. Pro nalezení odhadu bylo využito polynomiální aproximace trajektorie reprezentující polohu parametrizujících kloubových souřadnic \mathbf{Q}_{par} polynomem 5. řádu s parametry $\Theta \in \mathbb{R}^{4r}$ na celém uvažovaném časovém intervalu $t \in \langle t_0, t_f \rangle$ (z nulové poč. rychlosti a def. polohy $\mathbf{Q}_{\text{par}0} = \mathbf{Q}_{\text{par}}(t_0)$). Vzhledem ke tvaru kritéria J je zřejmé, že nalezením parametrů polynomů Θ (jednoznačně definujících průběh odhadu stavu $\hat{\mathbf{q}}$ a řízení $\hat{\mathbf{u}}$), které minimalizuje hodnotu kritéria, dostáváme nejlepší možný odhad optimální trajektorie stavu \mathbf{q}^* a řízení \mathbf{u}^* v rámci uvažovaného omezení na tvar trajektorií daný polynomiálními funkcemi 5. řádu. Řešená podružná optimalizační úloha vedoucí na nalezení parametrů Θ

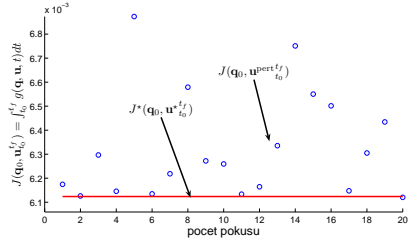
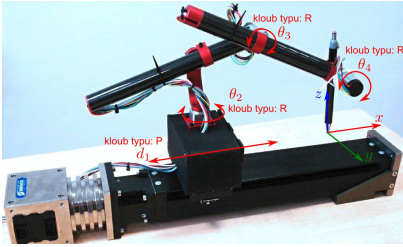
$$\begin{aligned} \hat{J}(\mathbf{Q}_{\text{par}0}, \Theta) &= \int_{t_0}^{t_f} g(\hat{\mathbf{q}}(\Theta, t), \hat{\mathbf{u}}(\Theta, t), t) dt \\ \Theta^* &= \underset{\Theta}{\operatorname{argmin}} \left(\hat{J}(\mathbf{Q}_{\text{par}0}, \Theta) \right) \end{aligned} \quad (4.18)$$

byla řešena simplexovým algoritmem [14] a příslušný odhad kostavu $\hat{\mathbf{p}}(\Theta, t)$ potom numerickým řešením diferenciální rovnice (4.12) inverzně v čase.

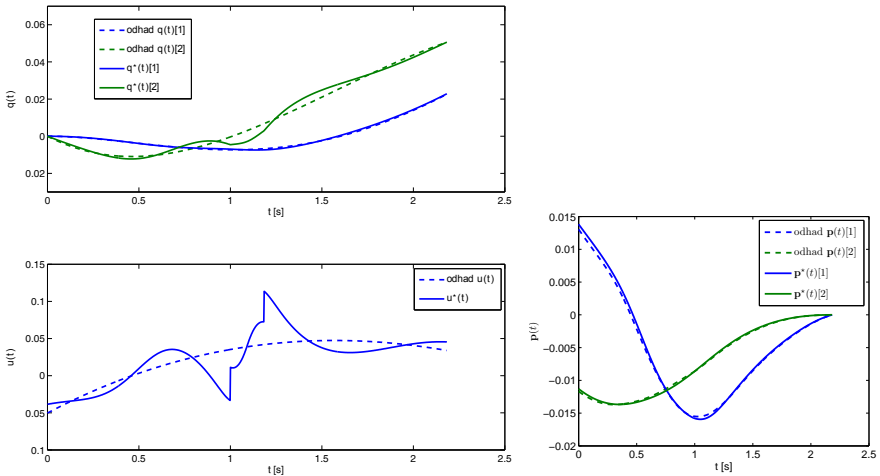
- **Vlastní řešení *BVP*:** Řešení soustavy diferenciálních rovnic (4.17) se známým (polynomiálním) počátečním odhadem $\hat{\mathbf{S}}(t)$ hledaného řešení $\mathbf{S}^*(t)$ bylo realizován prostřednictvím *collocation* metody `bvp4c` [25, 36] implementované v Matlabu.

Jako demonstrační příklad je uvedena optimalizace pohybu redundantního manipulátoru „Alice“ (4 DoF manipulátor typu **PRRR** pro polohování v prostoru, viz Obrázek 4.4), kde redundantní kloubovou souřadnicí je uvažována poloha lineárního pojezdu (stupeň redundance $r = 1$). Optimalizovaným kritériem je síla/silový moment v aktuátorech. Odhady a optimální průběhy stavu (polohy a rychlosti lineárního pojezdu), řízení (zrychlení lineárního pojezdu) a kostavu jsou znázorněny na Obrázku 4.5.

4. Dosažené výsledky



Obrázek 4.4.: Manipulátor „Alice“ (vlevo) a výsledná hodnoty kritéria $J(\mathbf{q}_0, \mathbf{u}_{t_0}^{t_f})$ pro optimální nalezené řízení $\mathbf{u}^*_{t_0}^{t_f}$ (červeně) a náhodně perturbované hodnoty optimálního řízení (modře) - experimentální ověření algoritmu.



Obrázek 4.5.: Polynomiální odhad a optimální průběh stavu $\mathbf{q}^*(t)$ (vlevo nahoře) a řízení $\mathbf{u}^*(t)$ (vlevo dole), polynomiální odhad a optimální průběh kostavu $\mathbf{p}^*(t)$ (vpravo).

Využití opt. řízení red. manipulátorů

Vztah mezi statickou optimalizací a optimalizací pohybu redundantních manipulátorů je v podstatě jen formální záležitost v okamžiku, kdy začneme uvažovat, že

4. Dosažené výsledky

jsou některé jinak konstantní kinematické návrhové parametry uvolněny a předpokládá se jejich fluktuace podél požadované trajektorie pohybu koncového efektoru manipulátoru. Nabízí se tak otázka, zda-li není možné využít právě přístup optimalizace pohybu redundantních manipulátorů k syntéze robotických architektur v obecném pojetí, a to zejména ve dvou rovinách:

- **Jako nástroj statické parametrické optimalizace:** Základní myšlenka je taková, že je kinematická struktura manipulátoru teoreticky rozvolněna (ve smyslu uvažování (některých) kinematických návrhových parametrů jako kloubových souřadnic), dostáváme tak redundantní manipulátor pro který bude řešena příslušná optimalizační úloha a vhodnými iteračními algoritmy bude následně dosaženo minimální možné fluktuace (ideálně nulové) těch kinematických parametrů, které nereprezentují skutečné kloubové souřadnice (jsou z konstrukční podstaty dány jako konstantní návrhové parametry robotu).
- **Jako nástroj strukturální optimalizace:** Nedílnou součástí strukturální optimalizace je i návrh vhodného umístění a typů dílčích aktuátorů manipulátoru. Ponecháme-li stranou technologické aspekty jednotlivých typů aktuátorů s ohledem na jejich konstrukční realizaci a možnosti nasazení, vzniká v takovém případě přirozená otázka.

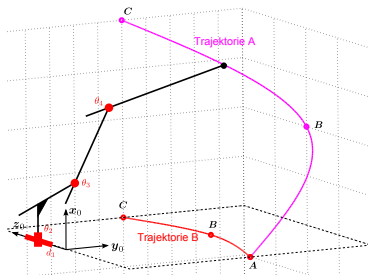
Jaké typy aktuátorů (prizmatický, rotační či některý ze složených typů) a na jakém místě v kinematickém řetězci manipulátoru je vhodné osadit, aby byly tyto aktuátory co možná nejefektivněji využívány a přispívaly tak k dosažení požadovaného optimálního pohybu manipulátoru?

Z fluktuace pohybu rozvolněných kloubových souřadnic (získané opět nalezením optimálního pohybu redundantního manipulátoru) lze usuzovat právě na vhodnost výběru a umístění aktuátorů.

Demonstračním příkladem může být manipulátor „Alice“ a jeho pohyb po dvou různých uvažovaných trajektoriích koncového efektoru na Obrázku 4.6. Předpokládejme, že původně manipulátor obsahoval pouze rotační klouby \mathbf{R} ($\theta_{2\dots 4}$) a poloha základy (d_1 , lineární pojezd \mathbf{P}) je pevně určena (reprezentuje původně konstantní kin. návrhový parametr manipulátoru). Uvažujme nyní, že právě parametr d_1 je rozvolněn a provedme optimalizaci pohybu takto získaného redundantního manipulátoru. Z nalezených optimálních průběhů polohy (rychlosti a zrychlení) kloubových souřadnic $d_1, \theta_{2\dots 4}$ lze dojít ke dvěma klíčovým závěrům, viz Obrázek 4.8:

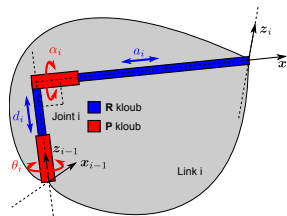
4. Dosažené výsledky

Pro Trajektorii A: Z fluktuace (ekvivalentně z rychlostí) kloubových souřadnic je zřejmé, že kloubová souřadnice d_1 je nejhodnějším kandidátem na zafixování $d_1(t) \rightarrow d_1^{\text{const}}$, neboť se v čase mění nejméně (relativně k ostatním kloubovým souřadnicím). Uvažujme, že zafixování kloubové souřadnice provedeme např. na její průměrné hodnotě. Z redundantního manipulátoru se tak stává zpět manipulátor neredundantní s kloubovými souřadnicemi $\theta_2, \theta_3, \theta_4$ a původními parametry za předpokladu $d_1 = d_1^{\text{const}}$. Prostřednictvím optimalizace pohybu redundantního manipulátoru byla tak vyřešena úloha statické optimalizace s nalezeným optimalizovaným kinematickým návrhovým parametrem d_1 .



Obrázek 4.6.: Dvě různé uvažované trajektorie koncového efektoru manipulátoru.

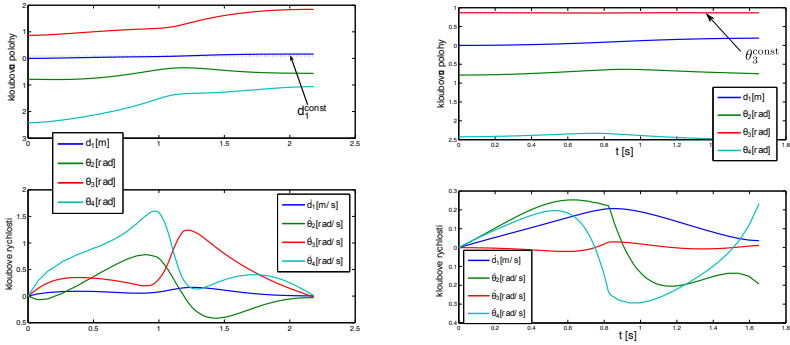
Pro Trajektorii B: V tomto případě dostáváme výsledky odlišné. Souřadnicí vykazující nejmenší fluktuaci (rychlost) je θ_3 , a je tedy nejhodnějším kandidátem na zafixování $\theta_3 \rightarrow \theta_3^{\text{const}}$. Z redundantního manipulátoru se tak stává zpět neredundantní, tentokrát s kloubovými souřadnicemi d_1, θ_2, θ_4 a původními parametry za předpokladu $\theta_3 = \theta_3^{\text{const}}$. Z pohledu strukturální optimalizace se nyní zdá rozumné vypustit původní rotační aktuátor θ_3 a místo toho použít prizmatický aktuátor d_1 . Tím jsme jednoznačně definovali strukturu manipulátoru s ohledem na optimální typ a umístění aktuátorů.



Obrázek 4.7.: Zobecněné rameno manip.

Nová idea optimalizace obecného manipulátoru vychází právě z myšlenky rozvolnění některých (či dokonce všech) kinematických návrhových parametrů, tzn. předpokládá se, že každé rameno může obsahovat najednou až 4 aktuátory (dle standardního popisu Denavit-Hartenbergovou úmluvou), a to: dva **P** aktuátory reprezentované kloubovými souřadnicemi d_i, a_i a dva **R** aktuátory reprezentované kloubovými souřadnicemi θ_i, α_i , viz Obrázek 4.7. Za účelem vytváření virtuálních modelů redundantních manipulátorů založených na zobecněném ramenu byly příslušně rozšířeny standardní algoritmy řešení kinematických a dynamických úloh manipulátoru (v rámci knihovny **robotLib**).

4. Dosažené výsledky



Obrázek 4.8.: Optimální průběhy kloubových souřadnic pro **Trajektorii A** (vlevo) a **Trajektorii B** (vpravo).

Mezi výhody předloženého přístupu patří zejména: Možnost libovolně volit komplexnost optimalizačního problému (rozvolněním D-H parametrů), náhled do vnitřního „optimálního“ pohybu manipulátoru, možnost přehodnotit umístění a typ aktuátorů (přesah do strukturální syntézy), vhodnost pro návrhy vysoce specializovaných manipulátorů.

Knihovna „robotLib“

Knihovna předimplementovaných funkcí (funkce v *Matlabu*) a funkčních bloků (bloky v *SimMechanicsu*) vychází z dlouhodobé aktivity autora v oblasti návrhu a optimalizace robotických architektur především pro speciální aplikace zahrnující nasazení nestandardních robotických architektur v průmyslových i neprůmyslových oblastech. Knihovna je rozdělena do několika zájmových částí:

- **Standardní funkce a funkční bloky pro modelování sériových manipulátorů:** Standardní přístup k modelování kinematiky a dynamiky manipulátorů s jedním uvažovaným 1 DoF aktuátorem na každém rameni.
- **Funkce a funkční bloky pro modelování zobecněných (redundantních) sériových manipulátoru:** Implementované funkce a funkční bloky jsou motivovány novým přístupem k optimalizaci manipulátorů na základě

4. Dosažené výsledky

využití výsledků optimálního pohybu redundantních manipulátorů. V kinematickém popisu manipulátoru se předpokládá, že pro každé rameno mohou existovat současně až 4 nezávislé aktuátory, 2 typu **P** (reprezentované D-H parametry d_i, a_i) a dva typu **R** (reprezentované D-H parametry θ_i, α_i).

- **Funkce pro plánování trajektorie koncového efektoru:** Za účelem optimalizace kinematiky manipulátorů byly vyvinuty a implementovány některé algoritmy plánování trajektorie pohybu koncového efektoru.

5. Diskuze a závěr

Robotika je bezpochyby vědním oborem, kterému je věnována intenzivní pozornost již řadu let a mnohé problémy jsou dnes prezentovány jako vyřešené a uzavřené, avšak stále lze nalézt zcela zásadní a dosud obecně a systematicky nevyřešené otázky. Jednou z takových otázek je právě návrh a optimalizace robotických architektur, které je věnována předložená práce. Význam návrhu a optimalizace robotických architektur je markantní zejména v případech, kdy budeme uvažovat apriori vývojovou činnost (rapid prototyping) nových nestandardních robotických architektur, které jsou určeny k řešení konkrétních specializovaných úloh a jejich případné nahrazení komerčními systémy se ukazuje jako buď zcela či částečně nevyhovující. Právě tento fakt byl hlavní motivací předložené práce, neboť odpověď na otázku, „Jak navrhnout a parametrizovat vhodný manipulátor pro polohování konkrétní nesené technologie specifickým způsobem (komplexní pohyb koncového efektoru), ve specifických podmínkách (technologické umístění robotu, omezený prostor atd.)?“, byla potřeba nalézt ve všech doposud řešených projektech.

Přesto, že z obecného hlediska lze v souvislosti s optimalizací robotických architektur vymezit dvě zásadní oblasti, a to *strukturální* a *parametrickou* optimalizaci, byla předložená práce věnována zejména tématu *parametrické* optimalizace, a to z následujících důvodů:

- Strukturální optimalizace (syntéza) zahrnující topologickou syntézu manipulátoru ve smyslu volby počtu a typu kloubů či ramen a jejich vzájemného propojení do podoby otevřených či uzavřených kinematických řetězců je velmi komplexní a složitý problém (především z důvodu vlastní definice vhodného kritéria optimality a samotného řešení).
- Strukturální syntéza je často řešena intuitivně na základě zkušeností a „inženýrského“ citu návrháře pečlivě seznámeného s technickou oblastí nasazení manipulátoru.
- Vlastnosti i ne zcela optimálně zvolené kinematické struktury manipulátoru mohou být z velké části vylepšeny vhodnými přístupy parametrické optimalizace.

5. Diskuze a závěr

Hlavní výsledky předložené práce lze shrnout následovně:

- **Vývoj a implementace algoritmů statické optimalizace** s ohledem na nalezení robustního globálního algoritmu optimalizace s „rozumnou“ výpočetní náročností.
- **Optimální řízení redundantních manipulátorů** s ohledem na globální charakter optimalizace založený na integrálním kritériu optimality (založeno na principech optimálního řízení).
- **Využití přístupu optimálního řízení redundantních manipulátorů** s ohledem na intuitivní náhled do „vnitřního chování“ manipulátoru a jeho integrace do přístupu parametrické a strukturální optimalizace.
- **Vytvoření nástroje pro rychlé prototypování** při návrhu nestandardních architektur manipulátorů určených pro speciální aplikace, založené na předimplementovaných softwarových prerekvizitách (knihovna **robotLib**) pro modulární tvorbu simulačních modelů a návrh efektivních optimalizačních algoritmů.

Literatura

- [1] *Mechanism design for global isotropy with applications to haptic interfaces*, Dallas, Texas, 1997. Cited By (since 1996): 5.
- [2] J. Alba, M. Doblaré, and L. Gracia. A simple method for the synthesis of 2d and 3d mechanisms with kinematic constraints. *Mechanism and Machine Theory*, 35(5):645 – 674, 2000.
- [3] J. Baillieul, J. Hollerbach, and R. Brockett. Programming and control of kinematically redundant manipulators. In *Decision and Control, 1984. The 23rd IEEE Conference on*, pages 768–774, Dec 1984.
- [4] J.-F. Collard, P. Duysinx, and P. Fiset. Optimal synthesis of planar mechanisms via an extensible-link approach. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 42(3):403–415, 2010.
- [5] K. L. Doty, C. Melchiorri, E. Schwartz, and C. Bonivento. Robot manipulability. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 11(3):462–468, 1995.
- [6] P. Erdogmus and M. Toz. *Serial and Parallel Robot Manipulators - Kinematics, Dynamics, Control and Optimization*, chapter Heuristic Optimization Algorithms in Robotics. InTech, 2012.
- [7] P. D. J.-F. Collard, P. Fiset. Optimal synthesis of mechanisms using time-varying dimensions and natural coordinates. In *6th World Congresses of Structural and Multidisciplinary Optimization*, Rio de Janeiro, Brazil, June 2005.
- [8] D. C. Karnopp. Random search techniques for optimization problems. *Automatica*, 1(2-3):111 – 121, 1963.
- [9] W. Khalil and E. Dombre. *Modeling, Identification and Control of Robots*. Kogan Page Science paper edition. Elsevier Science, 2004.
- [10] O. Khatib. Redundant manipulators and kinematic singularities the operational space approach. In A. Morecki, G. Bianchi, and K. Kedzior, editors, *RoManSy 6*, pages 131–138. Springer US, 1987.
- [11] T. G. Kolda, R. M. Lewis, and V. Torczon. Optimization by direct search: New perspectives on some classical and modern methods. *SIAM Review*, 45:385–482, 2003.
- [12] D. P. Kroese and R. Y. Rubinstein. Monte carlo methods. *WIREs Comp Stat*, 4, 2012.
- [13] S. Kucuk and Z. Bingul. Comparative study of performance indices for fundamental robot manipulators. *Robotics and Autonomous Systems*, 54(7):567 – 573, 2006.
- [14] J. C. Lagarias, J. A. Reeds, M. H. Wright, and P. E. Wright. Convergence properties of the nelder-mead simplex method in low dimensions. *SIAM Journal of Optimization*, 9:112–147, 1998.
- [15] I. Mansouri and M. Ouali. A new homogeneous manipulability measure of robot manipulators, based on power concept. *Mechatronics*, 19(6):927 – 944, 2009.
- [16] I. Mansouri and M. Ouali. The power manipulability ? a new homogeneous performance index of robot manipulators. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 27(2):434 – 449, 2011. <ce:title>Translational Research ? Where Engineering Meets Medicine</ce:title>.

LITERATURA

- [17] M. V. Mark W. Spong, Seth Hutchinson. *Robot Modeling and Control*. Wiley, 2005.
- [18] J. P. Merlet. *Parallel Robots*. Springer Publishing Company, Incorporated, 2nd edition, 2010.
- [19] B. Moore, J. Schicho, and C. M. Gosselin. Determination of the complete set of shaking force and shaking moment balanced planar four-bar linkages. *Mechanism and Machine Theory*, 44(7):1338 – 1347, 2009.
- [20] J. Nocedal and S. J. Wright. *Numerical Optimization*. Springer New York, 2006.
- [21] W. L. Price. A controlled random search procedure for global optimisation. *The Computer Journal*, 20(4):367–370, 1977.
- [22] G. Reklaitis, A. Ravindran, and K. Ragsdell. *Engineering Optimization: Methods and Applications*. A Wiley-Interscience Publication. Wiley, 1983.
- [23] C. P. Robert and G. Casella. *Introducing Monte Carlo Methods with R*, chapter Monte Carlo Optimization, pages 125–165. Springer New York, New York, NY, 2010.
- [24] L. Sciavicco and B. Siciliano. *Modelling and Control of Robot Manipulators*. Advanced Textbooks in Control and Signal Processing. Springer London, 2000.
- [25] L. F. Shampine, J. Kierzenka, and M. W. Reichelt. Solving boundary value problems for ordinary differential equations in matlab with bvp4c, October 2006.
- [26] J. Snyman. A new and dynamic method for unconstrained minimization. *Applied Mathematical Modelling*, 6(6):449 – 462, 1982.
- [27] J. Snyman. The {LFOPC} leap-frog algorithm for constrained optimization. *Computers & Mathematics with Applications*, 40(8-9):1085 – 1096, 2000.
- [28] J. Snyman. *Practical Mathematical Optimization: An Introduction to Basic Optimization Theory and Classical and New Gradient-Based Algorithms*. Applied Optimization. Springer, 2005.
- [29] J. Snyman. On non-assembly in the optimal synthesis of serial manipulators performing prescribed tasks. In J. Lennarčič and B. Roth, editors, *Advances in Robot Kinematics*, pages 349–356. Springer Netherlands, 2006.
- [30] J. Snyman and A. Hay. The spherical quadratic steepest descent (sqsd) method for unconstrained minimization with no explicit line searches. *Computers & Mathematics with Applications*, 42(1-2):169 – 178, 2001.
- [31] J. Snyman, N. Stander, and W. Roux. A dynamic penalty function method for the solution of structural optimization problems. *Applied Mathematical Modelling*, 18(8):453 – 460, 1994.
- [32] L. Stocco, S. E. Salcudean, and F. Sassani. Fast constrained global minimax optimization of robot parameters. *Robotica*, 16(6):595–605, Nov. 1998.
- [33] L. Stocco, S. E. Salcudean, and F. Sassani. Matrix normalization for optimal robot design. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 434–439, 1998.
- [34] J. Wang and C. M. Gosselin. Static balancing of spatial three-degree-of-freedom parallel mechanisms. *Mechanism and Machine Theory*, 34(3):437 – 452, 1999.
- [35] J. Wang and C. M. Gosselin. Static balancing of spatial four-degree-of-freedom parallel mechanisms. *Mechanism and Machine Theory*, 35(4):563 – 592, 2000.
- [36] X. Wang. Solving optimal control problems with matlab - indirect methods.
- [37] S. Zargarbashi, W. Khan, and J. Angeles. The jacobian condition number as a dexterity index in 6r machining robots. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 28(6):694 – 699, 2012.

A. Životopis autora

Martin Švejda se narodil v roce 1983 v Klatovech. Bakalářský a inženýrský titul v oboru Kybernetika a řídicí technika získal na Fakultě aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni v letech 2006 a 2008. Od roku 2008 se věnuje základnímu a aplikovanému výzkumu v oblasti teorie řízení. V rámci řešitelského týmu programu *Výzkum a vývoj nových pokročilých metod a algoritmů řízení strojů a procesů a prostředků pro jejich implementaci* ve výzkumném centru NTIS Západočeské univerzity se podílí na výzkumných a vývojových projektech. Mezi jeho hlavní oblasti výzkumu patří řízení průmyslových procesů, mechatronika a robotika (zejména návrh, optimalizace a řízení robotických architektur pro speciální aplikace). Kromě výzkumu se dále věnuje pedagogické činnosti na Katedře kybernetiky Západočeské univerzity.

Martin Švejda je ženatý a společně se ženou Janou vychovává dvou a půl letou dceru Elišku ve vesnici nedaleko Klatov. Ve volném čase se věnuje hře na pozoun a bariton, mezi jeho další zájmy patří především včelaření.

B. Seznam publikovaných i nepublikovaných prací autora

Publikace

- [1] Švejda, M.: Optimal Kinematic Design of Parallel Spherical Wrist Manipulator. In *International Carpathian Control Conference*, 2010.
- [2] Gouběj, M.; Švejda, M.: Research and design of modular robotic manipulator for chemical aggressive environment. In *Carpathian Control Conference (ICCC), 2011 12th International*, May 2011, s. 374–378, doi: 10.1109/CarpathianCC.2011.5945883.
- [3] Svejda, M.; Gouběj, M.: Innovative design and control of robotic manipulator for chemically aggressive environments. In *Carpathian Control Conference (ICCC), 2012 13th International*, May 2012, s. 715–720, doi: 10.1109/CarpathianCC.2012.6228739.
- [4] Gouběj, M.; Svejda, M.: Dynamic analysis and control of robotic manipulator for chemically aggressive environments. In *Mechatronics (ICM), 2013 IEEE International Conference on*, Feb 2013, s. 273–278, doi: 10.1109/ICMECH.2013.6518548.
- [5] Švejda, M.: New Robotic Architecture for NDT Applications. In *World Congress IFAC*, ročník 19, 2014, s. 11761–11766, doi: 10.3182/20140824-6-ZA-1003.00989.
- [6] Svejda, M.; Cechura, T.: Interpolation method for robot trajectory planning. In *Process Control (PC), 2015 20th International Conference on*, June 2015, s. 406–411, doi: 10.1109/PC.2015.7169997.

Ostatní práce

- [1] Švejda, M.: Kinematic Analysis of Parallel Spherical Wrist Manipulator. Technická zpráva, Západočeská univerzita v Plzni, 2009.
- [2] Švejda, M.: Overview of parallel architectures for gearing robot. Technická zpráva, Západočeská univerzita v Plzni, 2009.
- [3] Švejda, M.: Analýza a optimalizace planárního paralelního robotu. Technická zpráva, Západočeská univerzita v Plzni, 2010.

B. Seznam publikovaných i nepublikovaných prací autora

- [4] Švejda, M.: Kinematická a dynamická analýza robotických architektur pro potřeby moderních ultrazvukových kontrol. Technická zpráva, Západočeská univerzita v Plzni, 2011.
- [5] Švejda, M.: Kinematika robotických architektur. Katedra Kybernetiky, ZČU v Plzni, 2011.
- [6] Gouběj, M.; Švejda, M.; Schlegel, M.: Úvod do mechatroniky, robotiky a systémů řízení pohybu (skripta). Západočeská univerzita v Plzni, 2012.
- [7] Švejda, M.: Inverzní kinematická a statická úloha manipulátoru AGEBOT. Technická zpráva, Západočeská univerzita v Plzni, 2012.
- [8] Švejda, M.: Kinematická kalibrace sériových a paralelních manipulátorů (Aplikace kalibračních metod na sério-paralelní manipulátor AGEBOT). Technická zpráva, Západočeská univerzita v Plzni, 2012.
- [9] Švejda, M.: Úvod do robotiky a mechatroniky. Přednášky k předmětu, Západočeská univerzita v Plzni, 2012.
- [10] Švejda, M.: Výběr architektury manipulátoru, plánování trajektorií. Technická zpráva, ZČU v Plzni, 2013.
- [11] Švejda, M.: Přímá a inverzní kinematika manipulátoru pro NDT (implementační poznámky) (varianta 2: RRPR manipulátor). Technická zpráva, ZČU v Plzni, 2013.
- [12] Švejda, M.: Řídicí systém směšovacího ventilu automatického kotle. *Studentská vědecká konference FAV ZČU v Plzni 2013*, květen 2013, s. 89–90,
- [13] Švejda, M.: Aplikace robotiky na katedře kybernetiky FAV ZČU v Plzni. *11. výjezdní zasedání Síťového centra robotiky a setkání členů Klubu robotiky, Technická univerzita v Liberci*, červen 2013.
- [14] Švejda, M.: Manipulátor pro NDT (varianta 2: RRPR manipulátor), implementační poznámky. Technická zpráva, Katedra Kybernetiky, ZČU v Plzni, 2013.
- [15] Švejda, M.: Algoritmy řízení pro vybranou variantu manipulátoru pro NDT - návrh realizace. Technická zpráva, ZČU v Plzni, Katedra kybernetiky, 2013.
- [16] Švejda, M.; Čechura, T.: Případová studie navrhovaných architektur manipulátorů pro NDT svarů potrubí. Technická zpráva, ZČU v Plzni, Katedra kybernetiky, 2013.
- [17] Švejda, M.: Existing methods and tools for optimization of mechatronic systems in terms of structure, parameters and control (WP3-D3.17). Technická zpráva, University of West Bohemia, 2015.
- [18] Švejda, M.: Paralell structures in robotics and possible applications for special robots operating in chemically aggressive environments (WP5 D5.11). Technická zpráva, University of West Bohemia, 2015.
- [19] Švejda, M.: Algoritmy plánování pohybu manipulátoru Sáva. Technická zpráva, Západočeská univerzita v Plzni, 2015.
- [20] Švejda, M.: Kinematika a dynamika manipulátoru pro výukové účely. Technická zpráva, Západočeská univerzita v Plzni, 2015.

B. Seznam publikovaných i nepublikovaných prací autora

- [21] Švejda, M.; Čechura, T.; Jáger, A.: Manuál (referenční příručka) k manipulátoru pro kontrolu potrubních svarů s omezeným přístupem (pro ŠJS). Technická zpráva, Západočeská univerzita v Plzni, 2015.
- [22] Švejda, M.: Kinematical, kinetostatical and dynamical analysis of 4DoF manipulator, parametric optimization of mechanical construction (WP5-DV026). Technická zpráva, NTIS, ZČU v Plzni, 2015.
- [23] Švejda, M.: Comparison of serial and parallel structures for 3-link manipulator arm, advanced parametric optimization of special construction. Technická zpráva, NTIS, ZČU v Plzni, 2015.
- [24] Švejda, M.: Kinematical, kinetostatical and dynamical analysis of 7DoF manipulator, parametric optimization of mechanical construction (WP5-DV027). Technická zpráva, NTIS, ZČU v Plzni, 2015.
- [25] Švejda, M.; Čechura, T.; Jáger, A.: Výukový model pro robotiku (projekt ZČU: VS-14-019, příloha k závěrečné zprávě). Technická zpráva, Západočeská univerzita v Plzni, 2015.
- [26] Švejda, M.; Čechura, T.; Jáger, A.: Výukový model pro robotiku - rozšíření, moderní algoritmy v robotice (projekt ZČU: VS-15-011, příloha k závěrečné zprávě). Technická zpráva, Západočeská univerzita v Plzni, 2016.