

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice PhD Thesis, sv. 408*

*ISSN 1213-4198*

*thesis* IS

*Ing. Pavel Miček*

# Návrh a optimalizace parametrů pantografické nohy robota

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

Ing. Pavel Miček

**NÁVRH A OPTIMALIZACE PARAMETRŮ  
PANTOGRAFICKÉ NOHY ROBOTA**

**DESIGN AND OPTIMATION  
OF ROBOT PANTOGRAPHIC LEG**

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

*Obor:* Inženýrská mechanika

*Školitel:* Doc. RNDr. Tomáš Březina, CSc.

*Oponenti:* Doc. Ing. Vladimír Singule CSc.

Prof. Ing. Vladimír Řeřucha, CSc.

*Datum obhajoby:* 2.3.2007

## **Klíčová slova**

*optimalizace, kráčeující robot, neuro-fuzzy model, kinematický model, dynamický model, inverzní model, simulace.*

## **Key Words**

*optimization, walking robot, neuro-fuzzy model, kinematic model, dynamic model, inverted model, simulation.*

Místo uložení disertační práce: FSI, VUT v Brně

# Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>1</b>
1.1	Motivace . . . . .	1
<b>2</b>	<b>SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY</b>	<b>2</b>
2.1	Používané přístupy tvorby modelů . . . . .	2
2.2	Používané přístupy při optimalizaci . . . . .	2
<b>3</b>	<b>CÍL PRÁCE</b>	<b>3</b>
3.1	Formulace problému . . . . .	3
3.2	Dílčí cíle práce . . . . .	4
<b>4</b>	<b>ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ</b>	<b>4</b>
4.1	Vymezení prostoru řešení . . . . .	4
4.2	Vybrané metody a prostředky řešení problému . . . . .	4
<b>5</b>	<b>HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE</b>	<b>6</b>
5.1	Model robotu . . . . .	6
5.1.1	Přímý kinematický model noh . . . . .	6
5.1.2	Inverzní kinematický model noh . . . . .	7
5.1.3	Přímý dynamický, kinematický a statický model noh . . . . .	7
5.1.4	Inverzní dynamický model noh . . . . .	7
5.2	Celkový model robotu . . . . .	8
5.3	Pro/Mechanica Motion jako generátor dat . . . . .	9
5.3.1	Cílový 3D dynamický model . . . . .	9
5.3.2	Návrh simulace . . . . .	11
5.3.3	Průběh tréninku a vyhodnocení . . . . .	11
5.4	Optimalizace parametrů noh robotu . . . . .	13
5.4.1	Návrh kritérií optimalizace . . . . .	14
5.4.2	Návrh parametrů optimalizace . . . . .	16
5.4.3	Opakované spouštění simulačních výpočtů . . . . .	17
5.4.4	Průběh hodnot kritérií optimalizace . . . . .	17
<b>6</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>19</b>
6.1	Praktický přínos . . . . .	19
6.2	Teoretický přínos . . . . .	20
<b>7</b>	<b>POUŽITÁ LITERATURA</b>	<b>21</b>
<b>8</b>	<b>ABSTRACT</b>	<b>24</b>
<b>9</b>	<b>ŽIVOTOPIS</b>	<b>25</b>



# 1 ÚVOD

## 1.1 Motivace

Vývoj robotů a manipulátorů pro průmyslové aplikace běží léta, existují řady příkladů jejich úspěšného použití (automobilový průmysl a další automatizované provozy). Motivací prosazování praktického použití robotů a manipulátorů je zejména nahrazení velmi těžké, monotónní nebo velmi nebezpečné lidské práce prací robotů. Tyto často nasazované aplikace se vyznačují obvykle nízkým stupněm mobility, nebo jsou zcela stacionární.

V současné době je silná snaha rozvoje mobilní robotiky o masivnější vývoj robotů pro nasazení v nejrůznějších oblastech lidské činnosti. Úspěšné aplikace jsou ve výzkumu cizích planet, geologickém výzkumu, při provádění revizních úkonů (kontrola hrází, jaderných reaktorů) apod.

Rozšíření použití je omežováno jednak náročností aplikace inteligentního řízení, jednak energetickou náročností provozu robotů a v neposlední řadě i náročností konstrukce lokomočního mechanismu. Pro překonávání těchto a dalších problémů je konstrukce mobilních robotů často záležitostí univerzitních projektů.

Pro schopnost překonávat členitý terén, v případě vnitřního prostředí schody, bude další pozornost bude v této práci věnována kráčejičím robotům.

Nejmenší počet noh pro zajištění statické stability robota je 3. Aby se robot mohl pohybovat a současně být staticky stabilní (což je jeden z možných režimů chůze) potřebuje tedy nejméně 4 nohy.

K dalšímu zkoumání byla vybrána pantografická noha. Pantografická noha je často používaným základem motorické soustavy kráčejičích robotů. Oproti nepantografickým nohám má pantografická především tu výhodu, že minimalizuje zatížení jednotlivých členů nohy od hmotností pohonů.

Návrh komplikované mechatronické soustavy, jakou lokomoční ústrojí kráčejičícího robota bezesporu je, je bez využití systémového přístupu k návrhu a optimalizace nesmírně obtížný [32].

Tato práce se soustřeďuje na řešení některých problémů konstrukce podvozku mobilního kráčejičícího robota pomocí simulačního modelování, hlavním problémem je pak návrh postupu vytvoření takového modelu, který by splnil podmínky použití při optimalizaci konstrukčních parametrů lokomočního mechanismu.

## 2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

### 2.1 Používané přístupy tvorby modelů

V oblasti výpočtového modelování mechanismů jsou využívány nejrůznější přístupy a prostředky k tvorbě potřebných modelů. Tyto metody a prostředky je možno rozdělit podle typu tvořených modelů.

- Pro kinematické modely jsou to např.:
  - matematické modely využívající Eulerových transformačních matic [24],
  - modely využívající jakobiánů pro přenos rychlosti [24],
  - další metody, z nichž některé se používají pro tvorbu dynamických modelů.
- Pro dynamické modely jsou to např.:
  - Lagrangeovy rovnice II. druhu,
  - linearizované a zjednodušené matematické modely [24],
  - automatizovaná tvorba pomocí dynamických formalizmů, např. algoritmem Newton-Eulera [2] se simulací využívající numerických metod,
  - využití vizualizovaného modelování `Simmechanics` [4],
  - využití softwarových balíčků (ADAMS, Pro/Mechanica).

Nepříjemnost využití hotových softwarových balíčků (ADAMS, Pro/Mechanica) spočívá zejména ve značně problematickém modelování mechatronických vlastností mechanismů.

V současné době je také snaha používat pro tvorbu modelů tzv. numerických aproximátorů. Jsou využívány zejména neuronové sítě [16], metoda `Lazy learning` [1], fuzzy aproximátory [15], neuro-fuzzy aproximátory [21].

### 2.2 Používané přístupy při optimalizaci

Prameny dotýkající se optimalizace mechanických soustav se často nezmiňují o použité konkrétní metodě optimalizace [8, 19, 26], literatura [14] však zmiňuje v technické praxi jako často používanou metodu Nelder-Meadovu [14] a časté je také použití genetického algoritmu [14, 27].

Obecně existuje celá řada postupů užívaných k optimalizaci. Jejich použití závisí na druhu optimalizace. Základní dělení je na optimalizaci jednokriteriální a multikriteriální.

Jednokriteriální optimalizace poskytuje základní nástroje pro optimalizaci obecně, které pak mohou být použity i pro multikriteriální optimalizaci.

Multikriteriální optimalizace se snaží maximálně vyhovět stanoveným kritériím. Protože obvykle není možné vyhovět všem zcela, bývá výsledkem kompromisní varianta řešení. Jako vhodná varianta je pak brána ta, k níž neexistuje žádná varianta lepší ve všech kritériích (tzv. efektivní nebo nedominovaná případně paretoovsky optimální varianta).

Metody multikriteriální optimalizace jsou založeny na opakovaném použití metod jednokriteriální optimalizace. Jsou-li známy preference jednotlivých kritérií, lze např. využít [14]:

- agregaci kritérií (vyžitím váženého součtu jednotlivých kritérií se úloha převede na jednokriteriální optimalizaci,
- lexikografickou optimalizaci (kritéria postupně zužují množinu přípustných řešení,
- minimalizaci vzdálenosti řešení od ideálního vektoru.

Není-li známa předem preference jednotlivých kritérií, pak jsou preference vyhodnocovány průběžně při řešení jednotlivých provizorních řešeních, např.:

- na základě informací o mírách substituce (vyhodnocuje se, nakolik zlepšení jednoho kritéria způsobilo zhoršení jiného kritéria),
- na základě informací o úrovni kritérií (na základě hodnoty kritéria provizorního řešení se stanovuje nové omezení kritérií),
- na základě výběru z množiny generovaných provizorních řešení (vybrané řešení je pak výchozí pro generování dalších řešení).

## 3 CÍL PRÁCE

### 3.1 Formulace problému

Základním cílem práce je návrh a ověření postupu umožňujícího optimalizaci parametrů mechatronické soustavy s ohledem na požadovaný pohyb (chůzi) podle vybraných kritérií.

Klíčovým problémem v tomto postupu bude tvorba modelu umožňující zahrnutí podstatných vlivů a vyhodnocení zkoumaných kritérií.

Práce je součástí provádění komplexního úkolu, na němž se podílí řada pracovníků. Předchozí práce, na něž se zde navazuje, podstatným způsobem ovlivnily formulaci problému a cílů práce.



## 3.2 Dílčí cíle práce

S ohledem na základní cíl práce lze charakterizovat dílčí cíle práce:

- vytvořit modely umožňující posoudit vybrané konstrukce pantografických noh z kinematického a dynamického hlediska,
- při posuzování umožnit zohlednění vlivů pohonů,
- na základě simulačního výpočtu dynamické chůze robotu provést optimalizaci podstatných parametrů nohy.

Základní konstrukční zpracování pantografických noh bylo provedeno v rámci diplomových prací Z. Hadaše [9], J. Rýznara [23], L. Sajfrta [25] a v rámci disertační práce P. Houšky [12].

Pro potřeby optimalizace byla jako testovací pohyb vybrána dynamická chůze robotu po rovině.

# 4 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

## 4.1 Vymezení prostoru řešení

Hlavní nadřazené restriktce vymezující prostor řešení jsou: konstrukční řešení noh [9, 25, 12], volba a elektromechanické modely pohonů [4], styl chůze (navrhl S. Věchet při řešení pilotního projektu AV ČR č. 52016 „Řízení pohybu pedové soustavy robotů“).

Široce pojatý problém vyplývající ze stanovených cílů zahrnuje několik činností:

- vytvoření modelu umožňujícího vyhodnotit podstatné vlastnosti a chování zkoumané mechatronické soustavy,
- provedení optimalizace vybraných parametrů soustavy podle navržených kritérií.

Každý z těchto bodů je sám o sobě velmi náročným problémem, pro tuto práci však bude klíčovým problémem sestavení modelů použitelných k multikriteriální optimalizaci parametrů mechatronické soustavy. Celá práce bude orientovaná na výpočetní modelování.

## 4.2 Vybrané metody a prostředky řešení problému

K řešení problému byly vybrány následující nástroje:

- Pro kinematickou analýzu vytvoření matematického modelu s využitím systému Maple<sup>1</sup> s ohledem na Denavit-Hartenbergovu transformaci.

---

<sup>1</sup>Maple 6.01

- Pro návrh chůze a řízení simulace dynamického modelu prostředí Matlab<sup>2</sup>.
- Pro simulaci dynamického modelu prostředí Pro/Mechanica<sup>3</sup>.
- Pro simulaci vlastností pohonů prostředí Matlab.
- Pro vyhodnocení variant hodnot parametrů optimalizovaných soustav prostředí Matlab.
- Pro multikriteriální optimalizaci výběr z variant stavovených nezávisle na kriteriích.
- Pro řízení pohybu robotu (návrh elementárních pohybů pro jednotlivé ° volnosti) využití neuro-fuzzy přístupu<sup>4</sup> (`anfis`, Matlab [21]).

Veškeré výpočty budou prováděny na počítači PC s procesorem Intel Pentium IV 2,8GHz, 1GB paměti RAM a operačním systémem Microsoft Windows 2000.

---

<sup>2</sup>Matlab R13 6.5

<sup>3</sup>Pro/Mechanica Release 2001

<sup>4</sup>Neuro-fuzzy model je velmi snadné implementovat v mikrokontroleru s podporou fuzzy instrukcí, jako je např. Motorola MC68HC12.

## 5 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE

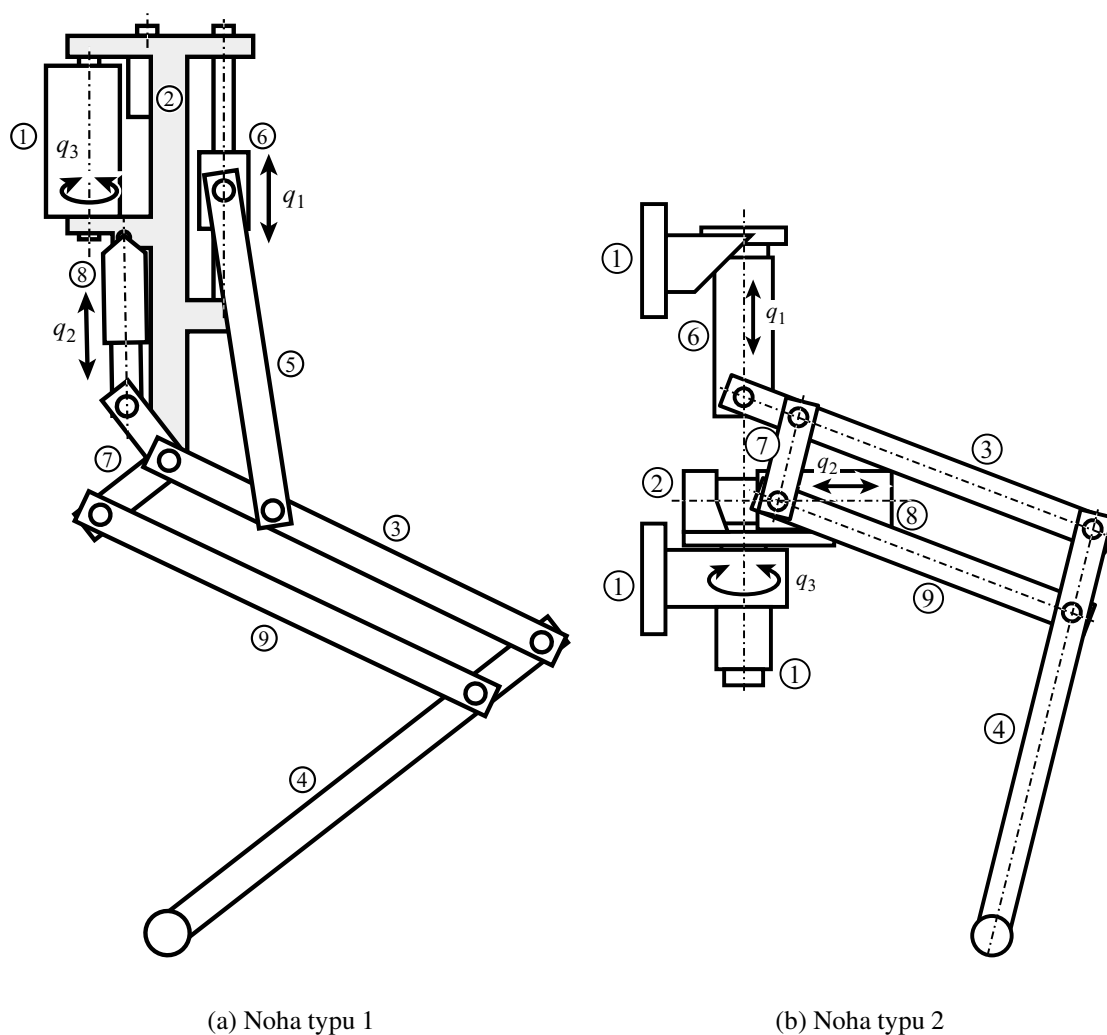
### 5.1 Model robotu

Model robotu zahrnuje: model 2 typů pantografických noh, model těla a model okolního prostředí.

Modely pantografických noh zahrnují: model mechanismu nohy, model převodů pohonů, pohybových šroubů a model stejnosměrných motorů.

#### 5.1.1 Přímý kinematický model noh

Na obr. 5.1 jsou znázorněna výchozí schémata zkoumaných typů pantografických noh. Vybrané mechanismy mají  $3^{\circ}V$ , 1 rotační a 2 translační (označeny jsou zobecněné polohy pohonů  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$ ).



Obr. 5.1: Výchozí schéma

Přímý kinematický model mechanismu byl vytvořen v podobě matematického

modelu ve tvaru dle rov. 5.1 a 5.2.

$$[x_2^A, y_2^A] = f(q_1, q_2) \quad (5.1)$$

$$[x_1^A, y_1^A, z_1^A] = f(x_2^A, y_2^A, q_3) \quad (5.2)$$

### 5.1.2 Inverzní kinematický model noh

Inverzní kinematický model nohy typu 1 byl vytvořen jako sada neuro-fuzzy modelů. Inverzní kinematický model nohy typu 2 byl vytvořen modifikací přímého modelu a byl navřen algoritmus, který iteračními výpočty umožnil získat potřebné veličiny.

### 5.1.3 Přímý dynamický, kinematický a statický model noh

Obr. 5.2<sup>1</sup> ukazuje model mechanismu nohy 1 v systému Pro/Mechanica, analogický model nohy typu 2 je na obr. 5.3. Červeně jsou v něm vyznačeny vazby mezi tělesy, modře pohony  $q_1, q_2, q_3$ , reprezentované *drivery*.

Na základě zadaných pohybů pohonů  $q_1, q_2, q_3$  a zatížení koncového bodu nohy silou je možno ze systému Pro/Mechanica získat jak zatížení pohonů, tak práci a výkon v pohonech, případně zatížení klíčových bodů mechanismu. Při Motion analýze je možno zjišťovat průběh kinematických veličin vázaných na zkoumaná místa mechanismu.

### 5.1.4 Inverzní dynamický model noh

Byl navržen a využíván následující postup získání inverzního dynamického modelu:

1. příprava první simulace inverzního kinematického modelu v Matlabu,
2. první simulace inverzního kinematického modelu v Matlabu,
3. v Matlabu provedené zpracování dat pro řízení druhé simulace,
4. druhá simulace přímého dynamického modelu v Pro/Mechanice.

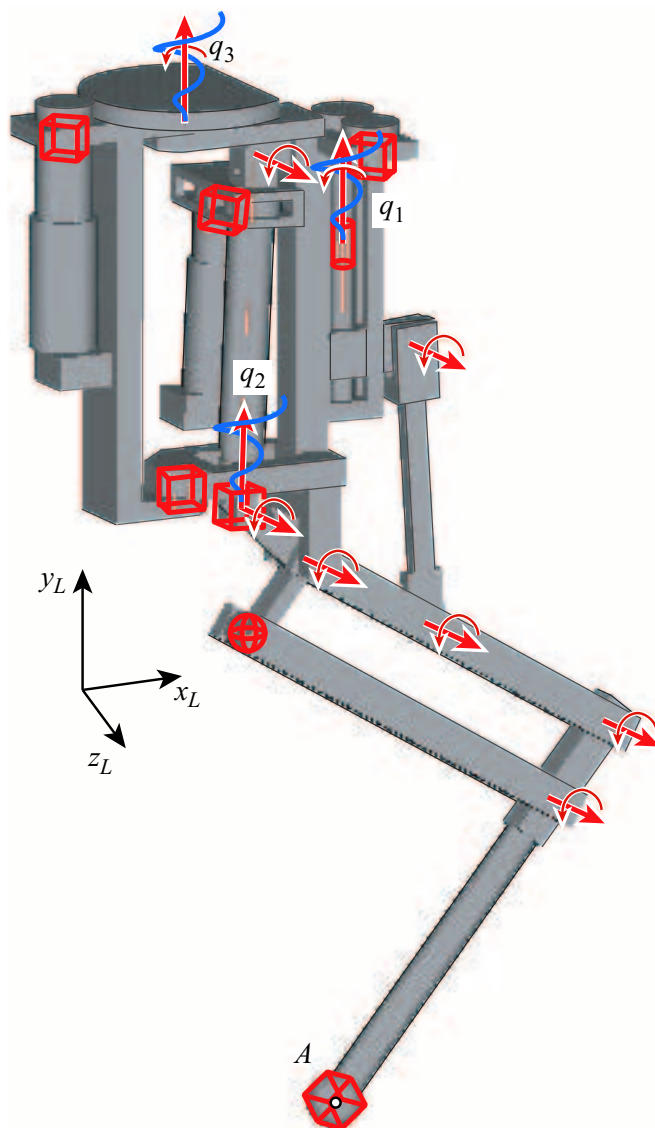
V Matlabu vytvořené prostředí umožňovalo provádět kroky 1-3 automaticky, takže po sestavení návrhu první simulace a spuštění výpočtu v Matlabu byly získávána data pro řízení simulace v Pro/Mechanice.

Navržený postup a vytvořené prostředí Matlabu urychlili a zjednodušili simulaci inverzního dynamického modelu<sup>2</sup> v Pro/Mechanice.

---

<sup>1</sup>Model na obr. 5.2 byl vytvořen Z. Hadašem v rámci jeho diplomové práce [9]. Model byl z práce převzat včetně řešení modelu třecích vazeb v pohonových šroubech.

<sup>2</sup>Pro/Mechanica nabízí možnost simulace inverzního dynamického modelu provedením 2 simulačních výpočtů, tento postup je však poměrně pracný.

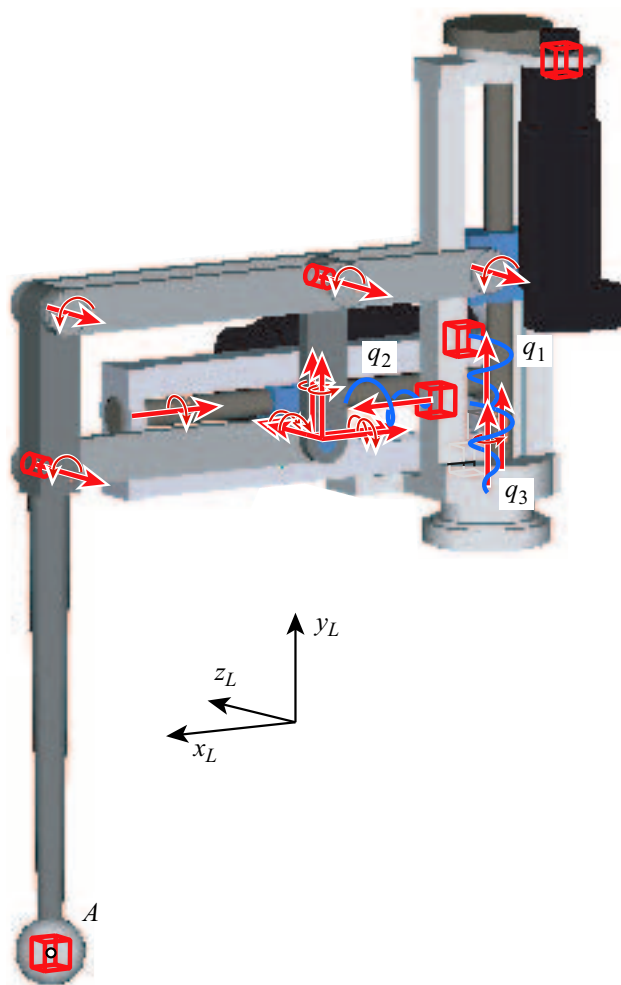


Obr. 5.2: Model nohy 1 v Pro/Mechanice

## 5.2 Celkový model robotu

Celkový pohled na implementaci dynamického modelu robotu v Pro/Mechanice pro nohu typu 2 ukazuje obr. 5.4.

Propojením modelů v Pro/Mechanice pomocí exportní funkce Matlab  $\rightarrow$  Pro/Mechanica (v Matlabu vytvořená funkce `ProMech`) a inverzní exportní funkce Pro/Mechanica  $\rightarrow$  Matlab (funkce `read_grt`) spolu s vytvořenými kinematickými modely a implementací chůze vzniká virtuální model použitelný pro potřeby optimalizace. Vnitřní uspořádání virtuálního modelu naznačuje obr. 5.5.



Obr. 5.3: Model nohy 2 v Pro/Mechanice

### 5.3 Pro/Mechanica Motion jako generátor dat pro tvorbu neuro-fuzzy modelu

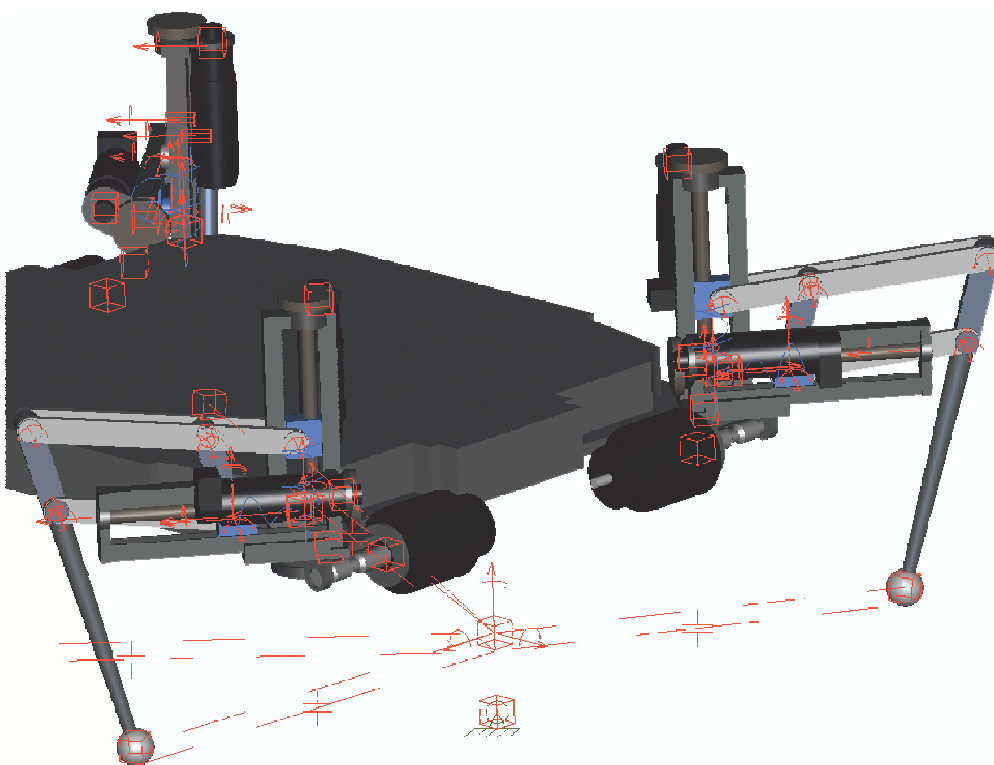
Klíčovou záležitostí při vytváření neuro-fuzzy modelů je získání kvalitního souboru dat, který charakterizuje chování technické soustavy modelované neuro-fuzzy modelem.

Systém Pro/Mechanica Motion<sup>3</sup> lze využít pro simulaci pohybu mechanismu. Získané průběhy kinematických a dynamických veličin je pak možno využít jako tréninková data pro vytvoření neuro-fuzzy modelu mechanismu.

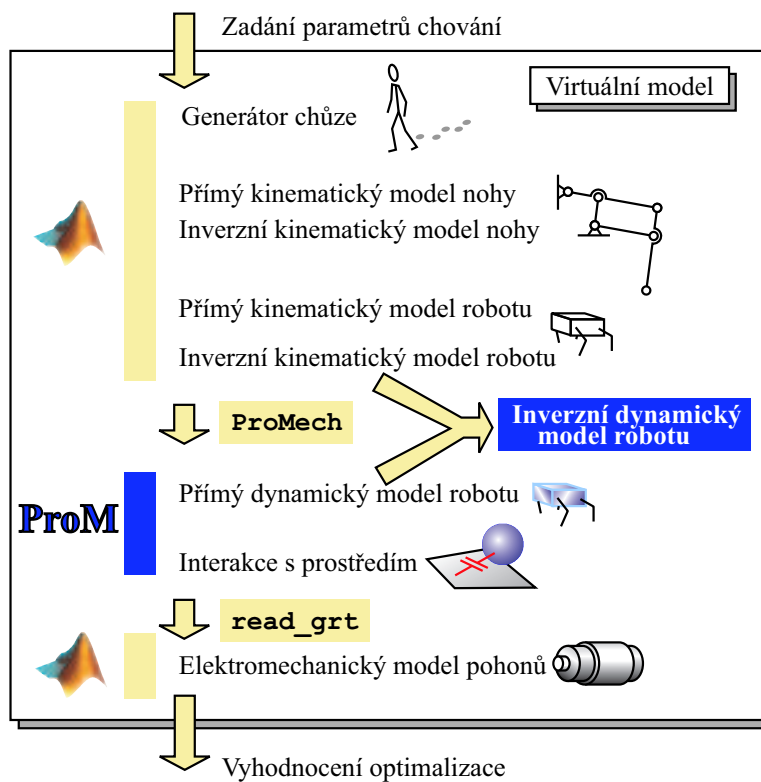
#### 5.3.1 Cílový 3D dynamický model

Pro ověření použitelnosti následujícího postupu byl zadán cíl vytvořit 3D inverzní dynamický model mechanismu nohy typu 1 (podkap. 5.1.3).

<sup>3</sup>Pokud se v této práci píše o Pro/Mechanice, jedná se vždy o Pro/Mechanica Motion Release 2001 spuštěnou v integrovaném módu. Další části balíku Pro/Mechanica (např. Structure) nebyly v této práci využívány.



Obr. 5.4: 3D model robotu s nohou typu 2



Obr. 5.5: Virtuální model robotu

Pro snížení složitosti modelu nebyly zahrnuty následující vlivy:

- zatížení konce nohy od podložky (3 vstupní proměnné)
- vliv změny orientace robotu v prostoru (2 vstupní proměnné).

Model bez zahrnutí těchto vlivů má 9 vstupních proměnných a předpokládá se jeho použití pro predikci dynamických účinků pohybu nohy bez kontaktu s podložkou.

### 5.3.2 Návrh simulace

Pro simulaci v Pro/Mechanice je nutno stanovit vstupní kinematické veličiny simulace tak, aby se zásadně nelišily od možného pohybu mechanismu. Simulace byla navržena na základě výběru a kombinace:

- výchozích bodů jednotlivých pohybů simulace,
- základních směrů pohybu,
- pohybu v základním směru.

### 5.3.3 Průběh tréninku a vyhodnocení 3D dynamického neuro-fuzzy modelu

Průběh tréninku a vyhodnocení získaných modelů jsou zachyceny v tab. 5.1 a v obr. 5.6-5.8. Celková doba tréninku a průběžného vyhodnocení těchto modelů byla přibližně 184h (tj. více než 7,5 dnů).

Hlavní pozornost byla věnována vlivu hodnoty parametru  $radii$  (a tedy stupně příslušnosti vstupů) na výslednou odchylku chování neuro-fuzzy modelu od chování modelu v Pro/Mechanice.

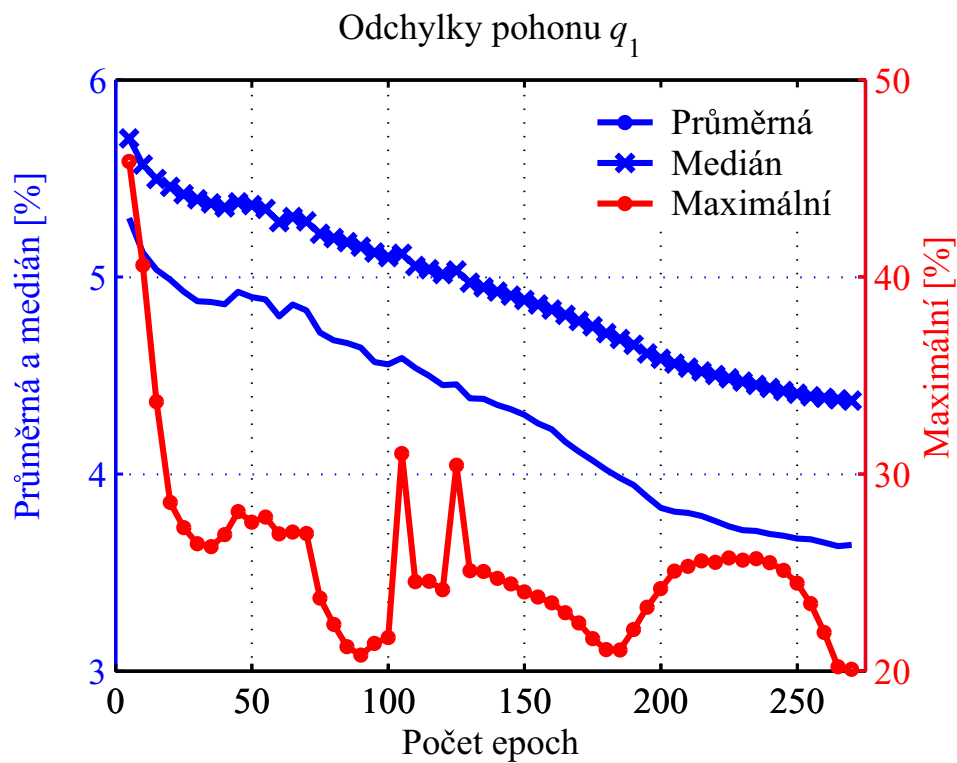
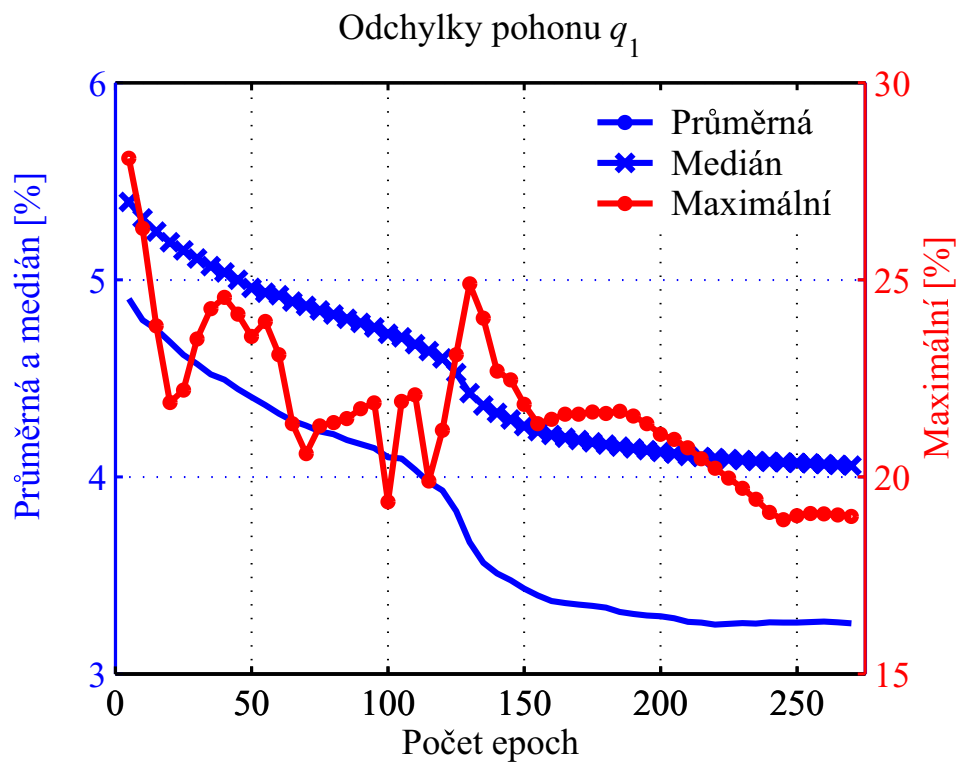
Parametr $radii$	0,4	0,3	0,2
St. příslušnosti vstupů	20	39	84
Doba tréninku 5 epoch	3min	13min	53min
Počet epoch	270	245	235
Průměrná odchylka	4,3%	4,1%	4,4%
Medián odchylky	3,6%	3,3%	3,7%
Max. odchylka	20,1%	18,9%	19,6%

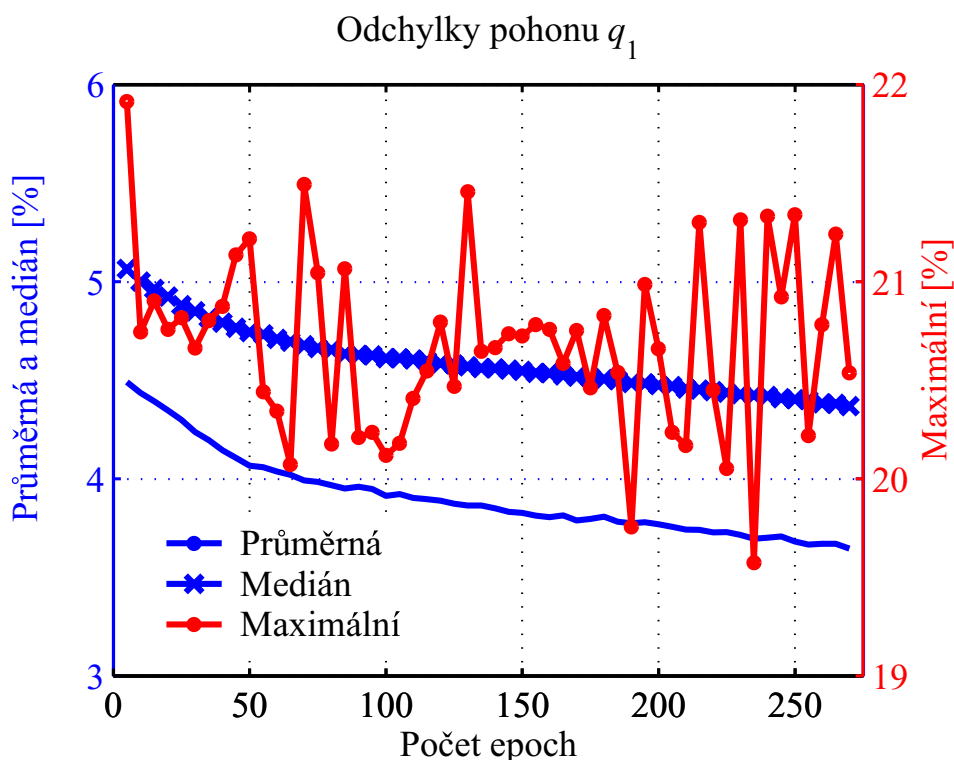
Tab. 5.1: Parametry 3D neuro-fuzzy modelu pohonu  $q_1$

Na základě provedených tréninků a následných průběžně provedených vyhodnocení lze vyhodnotit parametry použité k tvorbě modelů takto:

- pro modely  $q_1$  a  $q_2$ :



Obr. 5.6: Průběh tréninku pohonu  $q_1$ , radii 0,4Obr. 5.7: Průběh tréninku pohonu  $q_1$ , radii 0,3



Obr. 5.8: Průběh tréninku pohonu  $q_1$ , radii 0,2

- hodnota parametru radii 0,3 - nejlépe odpovídala složitosti modelovaného chování a vracela nejlepší výsledky,
  - hodnota parametru radii 0,2 - příliš dlouhé učení, získaný model příliš citlivý na počet epoch tréninku, vzhledem k této citlivosti lze předpokládat větší max. odchylku při jiné struktuře testovacích dat,
  - hodnota parametru radii 0,4 - větší odchylky oproti hodnotě 3, struktura získaného modelu nedostatečná vzhledem ke složitosti modelovaného chování,
- pro model  $q_3$ :
    - hodnota parametru radii 0,3 - opět byl výsledkem model s nejmenšími zjištěnými odchylkami chování, ve srovnání s hodnotami 0,2 a 0,4.

## 5.4 Optimalizace parametrů noh robotu

Vzhledem k širokému rozsahu prací souvisejících se stanovenými cíli není dostatek prostoru věnovat optimalizaci parametrů noh robotu tolik pozornosti, kolik by si zasloužila. Optimalizace parametrů mechanismu je samostatný náročný úkol, který v případě multikriteriální optimalizace řeší zejména: návrh kritérií, sestavení

účelových funkcí, stanovení omezení veličin a parametrů v účelových funkcích a provedení optimalizace vhodnou optimalizační metodou.

Vzhledem k zaměření této práce na simulační modelování zde bude pouze demonstrována možnost využití získaného modelu k optimalizaci bez podrobného prozkoumávání jednotlivých kroků multikriteriální optimalizace.

#### 5.4.1 Návrh kritérií optimalizace

**Maximální dosažitelný pracovní prostor** - měřítkem pro velikost dosažitelného pracovního prostoru nohy je objem obsaženého prostoru. Vzhledem ke komplikovanému tvaru kinematiky mechanismu noh byl zvolen numerický výpočet objemu prostoru dosažitelného koncovým bodem nohy robotu dle rov. 5.3.

$$V = (q_{3\max} - q_{3\min}) (g_s)^2 \sum_i x_2^{Ai} \quad (5.3)$$

V rov. 5.3 značí:

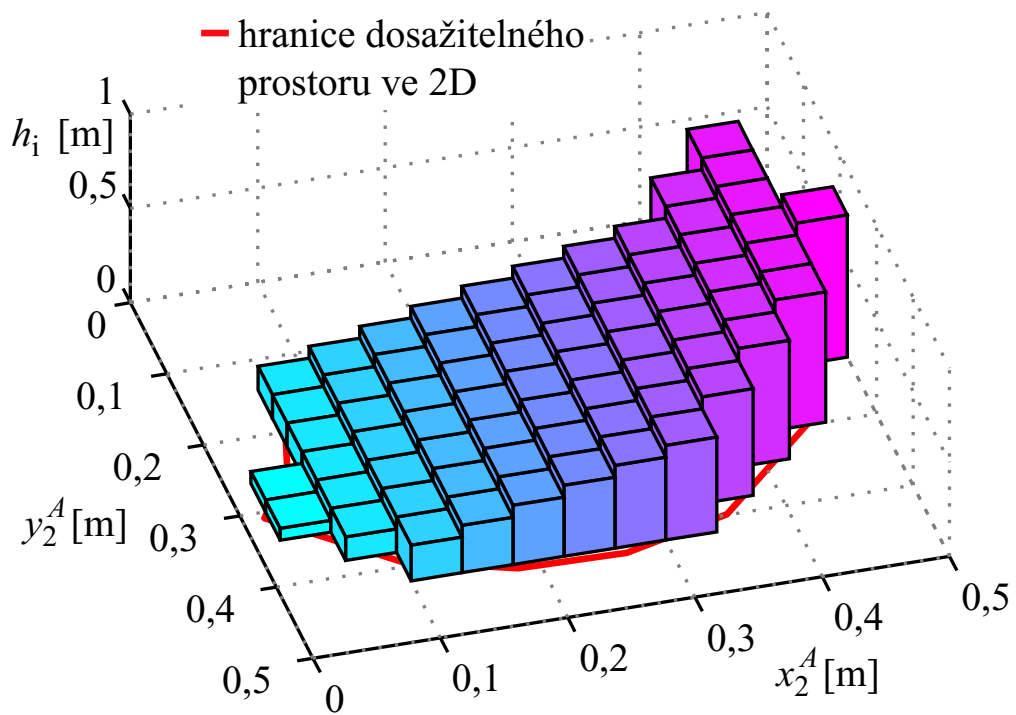
$V$	objem prostoru dosažitelného koncem nohy $A$ ,
$q_{3\max}, q_{3\min}$	mezní hodnoty natočení pohonu $q_3$ ,
$g_s$	vzdálenost mřížky bodů $A_i$ v prostoru daném souřadnicemi $x_2^A, y_2^A$ ,
$x_2^{Ai}$	souřadnice $i$ -té polohy koncového bodu nohy $A$ .

Snižováním hodnoty vzdálenosti bodů mřížky  $g_s$  se dosahuje vyšší přesnosti výpočtu objemu. Při optimalizaci byla použita hodnota  $g_s = 0,003\text{m}$ .

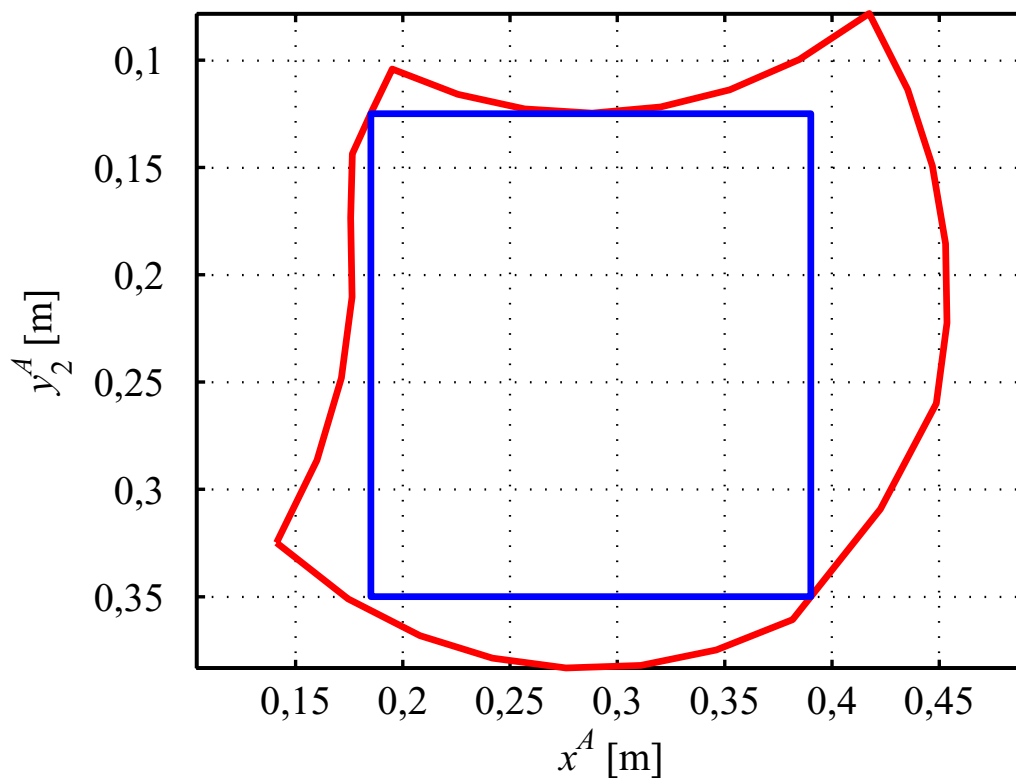
**Tvar dosažitelného pracovního prostoru** Cílem kritéria bylo nalézt největší obdélník (s jednou stranou rovnoběžnou s vodorovnou osou  $x_1$ ) vepsaný do 2D pracovního prostoru a vyhodnotit poměr délek jeho stran. Algoritmus vyhodnocení kritéria:

1. nalezení konečného počtu bodů hranice 2D pracovního prostoru,
2. nalezení možných dvojic bodů hranice, každá dvojice charakterizuje úhlopříčku jednoho obdélníku,
3. výběr těch obdélníků, jejichž strany leží v 2D pracovním prostoru,
4. nalezení obdélníku o maximální ploše.

Ukázka výsledků činnosti algoritmu je na obr. 5.10.



Obr. 5.9: Vizualizace výpočtu objemu



Obr. 5.10: 2D prostor nohy typu 1

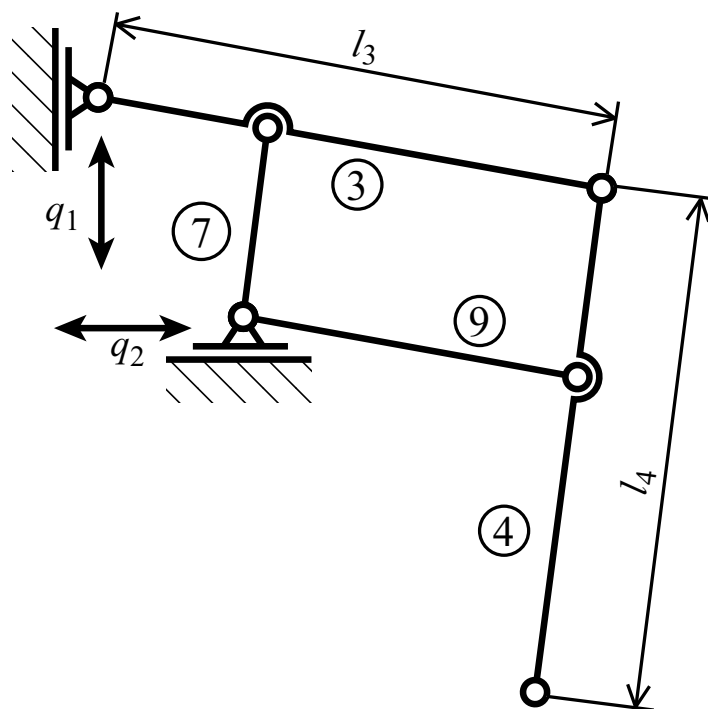
**Minimální energie potřebná pro chůzi** vzhledem k charakteru virtuálního modelu zahrnujícího vliv pohonů stejnsměrnými motory byla minimální energie spotřebovaná 1 pohonem při vykonávání 1 kroku chůze vyhodnocována na základě vztahu:

$$E_j = \sum_1^n u_k i_k t_k \quad (5.4)$$

kde značí:  $u_k$  hodnotu okamžitého napětí na svorkách motoru,  $i_k$  hodnotu okamžitého proudu rotoru,  $t_k$  dobu trvání časového kroku simulačního výpočtu a  $n$  počet kroků simulačního výpočtu potřebných k provedení 1 kroku chůze.

Simulační výpočty byly nastaveny tak, aby celková doba chůze a délka kroku byly konstantní. Tento způsob parametrizace byl pro srovnání jednotlivých variant vhodný.

#### 5.4.2 Návrh parametrů optimalizace



Obr. 5.11: Optimalizované parametry

Pro demonstraci optimalizace byly vybrány dva parametry (ty, které mají mechanismy obou typů noh společné)  $l_3$  a  $l_4$  (viz obr. 5.11). Jako forma vzájemného omezení parametrů byl mezi nimi vytvořen vztah  $l_3 + l_4 = k_p$ .

### 5.4.3 Postup práce při opakovaném spuštění simulačních výpočtů

Během simulačního výpočtu variant optimalizace provádí uživatel vytvořených modelů a souvisejících prostředí následující činnosti.

1. Nastavení mezních hodnot optimalizovaných parametrů a krok změny hodnot v Matlabu.
2. Spuštění generování zadání variant simulačního výpočtu v Matlabu. Výstupem z Matlabu byly sady \*.tab souborů, používaných v Pro/Mechanice k zadávání hodnot driverů tabulkou.
3. Zkopírování \*.tab souborů jedné varianty simulačního výpočtu do pracovního adresáře systému Pro/Mechanica. Spuštění systému Pro/Mechanica a 1. dávky automatického zpracování<sup>4</sup> po níž Pro/Mechanica vyzve uživatele k zadání hodnot optimalizovaných parametrů (toto zadání nelze automatizovat v dávce).
4. Spuštění 2. dávky automatického zpracování, kterou se zahájí simulační výpočet chůze robotu.
5. Po dokončení simulačního výpočtu spuštění 3. dávky automatického zpracování, která ukládá výsledky simulace do \*.grp souborů a jejich zkopírování do adresáře dané simulační varianty Matlabu. Následuje vypnutí systému Pro/Mechanica bez uložení aktuálního stavu simulace (tak je zajištěno, že při dalším simulačním výpočtu Pro/Mechanica opět začne činnost ve stejném stavu).
6. Kroky 3-5 je třeba opakovat tolikrát, kolik je třeba provést variant simulačních výpočtů. Po provedení všech výpočtů se provede spuštění vyhodnocení všech simulačních variant v Matlabu.

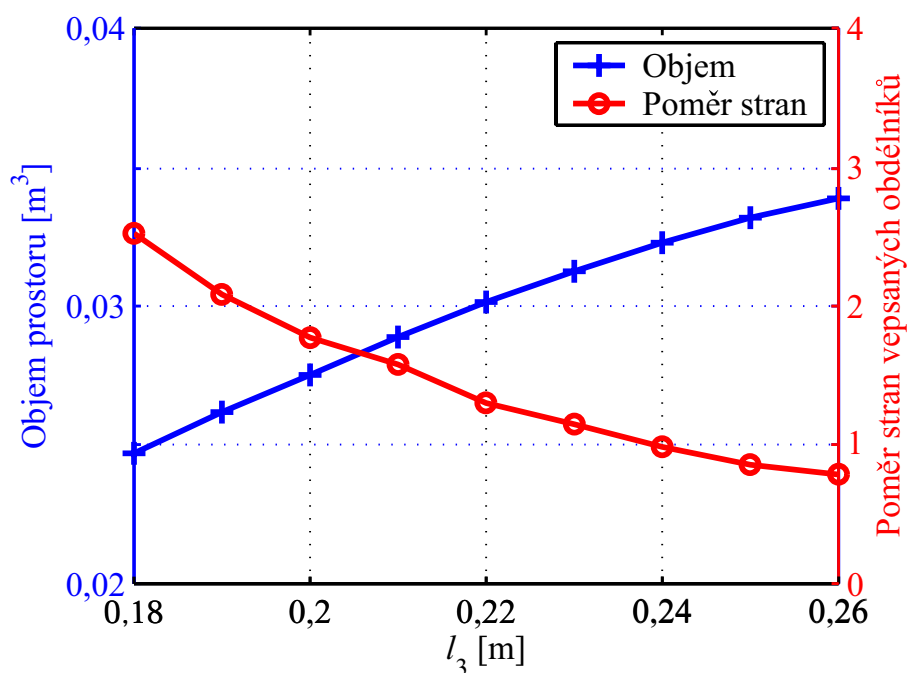
Celkem provedení 18-ti simulačních výpočtů užitých k optimalizaci trvalo přibližně 6h času, největší část času trvalo provádění jednotlivých simulačních výpočtů v Pro/Mechanice.

### 5.4.4 Průběh hodnot kritérií optimalizace

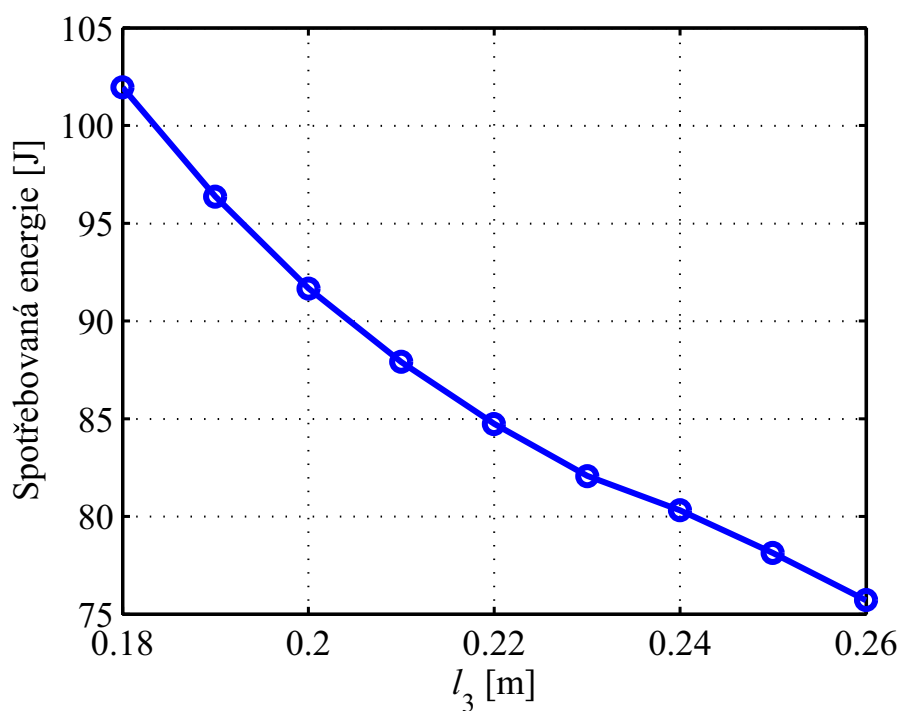
Obr. 5.12 zachycuje změny hodnot kritérií „maximálního dosažitelného pracovního prostoru“ a formalizovaného „tvaru pracovního prostoru“. Spolu s obr. 5.13, který zachycuje průběh kritéria „minimální spotřebované energie při chůzi“, jsou tak zobrazeny podstatné informace pro vizuální nalezení optimální varianty parametrů každého mechanismu.

---

<sup>4</sup>Pro/Mechanica vytváří v průběhu práce tzv. trail soubory, do kterých ukládá informace o činnostech, které provádí uživatel. Tyto soubory lze po změny koncovky trail souboru na \*.txt editovat a opětovně spouštět a provádět tak značnou část činností automatizovaně.



Obr. 5.12: Průběh změn kritérií pracovního prostoru nohy 1

Obr. 5.13: Vliv změny  $l_3$  nohy 1 na spotřebovanou energii

Na základě průběhu hodnot kritérií lze říci, že pro nohu typu 1 je optimální hodnota parametru  $l_3 = 0.23$  m. (limitujícím kritériem je zde poměr stran obdélníku vepsaného 2D pracovnímu prostoru).

## 6 ZÁVĚR

V Matlabu byly vytvořeny přímé a inverzní kinematické modely vybraných konstrukcí pantografických noh a to buď matematické, numerické, nebo formou neuro-fuzzy modelů. Tyto modely byly využity při sestavení kinematických modelů celého robotu.

V Pro/Mechanice s využitím výsledků prací [9, 12] byly vytvořeny dynamické modely robotů s oběma variantami pantografických noh, k nimž byly na základě prací [4, 9] v Matlabu dodány modely elektromechanických vlastností pohonů.

Výše uvedené modely v kombinaci s vytvořeným rozhraním mezi Matlabem a Pro/Mechanicou a implementovaným návrhem kinematického řízení dynamické chůze tvoří virtuální model chování mechanismu kráčejícího robotu během dynamické chůze.

Vytvořením a ověřením uvedených modelů a postupů byly splněny všechny stanovené cíle práce stanovené v kap. 3.

Předložená práce dobře zapadá mezi další práce vytvořené v souvislosti s konstrukcí kráčejícího robotu v Laboratoři mechatroniky a robotiky a na Ústavu mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, zejména se doplňuje s prací [4]:

- postup navržený v [4] umožňuje snažší automatizované spouštění simulačních výpočtů a jednodušší doplňování dalších vlivů zkoumané soustavy (např. oteplení motorů), prozkoumává chování robotu se statickou chůzí,
- předkládaná práce oproti tomu umožňuje snažší modelování dynamických účinků a přesněji vyjádřitelný vliv změny rozměrových parametrů na změnu dynamických účinků, dále prostředí použité k tvorbě dynamického modelu umožňuje snadno pokračovat v dalších konstrukčních činnostech a práce se zabývá chováním robotu s dynamickou chůzí.

Všechny použité výchozí práce jsou uvedeny v seznamu použité literatury a na příslušných místech citovány v textu.

Navržený postup vytvoření virtuálního modelu je také možno využít i pro další složité mechatronické soustavy při zkoumání jejich chování.

### 6.1 Praktický přínos

- Práce obsahuje popis některých problémů, vznikajících při zadávání simulace v Pro/Mechanice a návrh jejich řešení.
- Bylo vytvořeno a úspěšně použito propojení mezi Matlabem a Pro/Mechanicou umožňující pohodlný import dat do Matlabu.



- S využitím propojení mezi Matlabem a Pro/Mechanicou je také možno (oproti tradičnímu přístupu používaném v Pro/Mechanice) snadněji provádět simulační výpočty inverzního dynamického chování mechanismů.
- Byl ukázán možný směr dalších prací. Na základě získaných výsledků a díky vytvořeným modelům v Pro/Mechanice je možno pokračovat na vývoji konstrukce v Pro/Mechanice Structure a dále vývoji fyzikálního modelu. Také je umožněno vyhodnocovat vliv různých stylů chůze, což lze využít i při návrhu chůze s využitím metod umělé inteligence.

## 6.2 Teoretický přínos

- Byla navržena simulace, která umožňuje vytvářet dynamické modely pomocí neuro-fuzzy modelování. Výhodou použití těchto modelů je snadná implementace v mikrokontrolerech s podporou fuzzy instrukcí.
- Byl navržen a ověřen nástroj redukce tréninkových dat, použitelných pro vytvoření neuro-fuzzy modelu popisujícího složité chování modelovaného objektu. Význam redukce tréninkových dat (při zachování dostatečné výstižnosti) roste se stoupající složitostí popisovaného chování, která způsobuje explozivní nárůst množství tréninkových dat a značně tak komplikuje tvorbu numerických aproximátorů obecně.

---

Tato práce vznikla za podpory pilotního projektu AV ČR č. 52016 „Řízení pohybu pedové soustavy robotů“ a projektů MSM 26210024 „Výzkum a vývoj mechatronických soustav“ a MSM 0021630518 „Simulační modelování mechatronických soustav“.

---

## 7 POUŽITÁ LITERATURA

### Reference

- [1] BONTEMPI, G., BIRATTARI, M., BERSINI H.: **Lazy learning for modeling and control design** - International Journal of Control, 72(7/8), pp. 643-658, 1999
- [2] CORKE, P. I.: **A Robotics Toolbox for Matlab** - IEEE Robotics and Automation Magazine, vol. 3, 1996, pp. 24-32
- [3] DAM, E.B., KOCH, M., LILLHOLM, M.: **Quaternions, Interpolation and Animation** - Technical report 98/5, Department of Computer Science, University of Copenhagen 1998
- [4] GREPL, R.: **Využití komplexních dynamických modelů při návrhu a řízení kráčejiho robotu** - Disertační práce, FSI, VUT v Brně, Brno 2004
- [5] EHRENBERGER, Z., KOLÍBAL, Z.: **Průmyslové roboty III** - Vydání 1, Vysoké učení technické v Brně 1993, ISBN 80-214-0530-0
- [6] EHRENBERGER, Z., KRATOCHVÍL, C., BŘEZINA, T.: **Mechatronika pedových robotických soustav II Analýza kvadrupedu** - Projekt UT AV ČR č. 20/12U
- [7] EHRENBERGER, Z., BŘEZINA, T. HOUŠKA, P.: **Quaternion applications for robot** - In Inženýrská mechanika 2002, Svatka 2002, ISBN 80-214-2109-6
- [8] FRISOLI, A.: **Mechanical design and kinematic optimization of a novel six-degree-of-freedom parallel mechanism** - PKM99 1st International Conference on Parallel Kinematic Machines, Milan 1999, Italy
- [9] HADAŠ, Z.: **Vytvoření modelu nohy robota pro optimalizaci hmotnosti mechanismu** - Diplomová práce, FSI, VUT v Brně, Brno 2003
- [10] HOUŠKA, P., BŘEZINA, T., SINGULE, V.: **Koncepce mechatronické soustavy nohy kráčívého robotu** - In Inženýrská mechanika 2002, Svatka 2002, ISBN 80-214-2109-6
- [11] HOUŠKA, P., BŘEZINA, T., SINGULE, V.: **Control and synchronization drive unit of leg of walking robot** - Mechatronics, Robotics and Biomechanics 2003, international conference, Hrotovice 2003, ISBN 80-214-2312-9
- [12] HOUŠKA, P.: **Distribuovaný systém řízení kráčívého robotu** - Disertační práce, FSI, VUT v Brně, Brno 2004
- [13] JANÍČEK, P.: **Řešení problémů modelováním** - Vydání 1., Brno: Fakulta strojní VUT 1998, ISBN 80-214-1233-X
- [14] KLAPKA, J.: **Metody operačního výzkumu** - Vydání 1. Vydavatel Vysoké učení technické v Brně 1996 ISBN 80-214-0817-0
- [15] KOCH, M.: **Fuzzy control: optimale Nachbildung und Entwurf optimaler Entscheidungen** - Kuhn und Jürgen Wernstedt. - München, Wien 1996, ISBN 3-486-23355-6
- [16] KREJSA, J.: **Simulační modelování technických objektů pomocí neuronových sítí** - Disertační práce, FSI, VUT v Brně, Brno 2000
- [17] KVAPIL, A.: **Analýza současného stavu v oblasti navrhování kráčejiých mechanismů lokomočních ústrojí mobilních robotů** - Pojednání ke státní doktorské zkoušce, FSI, VUT v Brně, Brno 2001

- [18] LEHTINEN, H.: **Force control for walking on soft terrains** - Robotica Volume 14 part 2, March-April 1996, Cambridge University Press 1996, pp 165-172, ISSN 0263-5747
- [19] LEMAY, J.: **Configuration engine for modular parallel robot assembly** - Proc. of CCToMM Symp. Mech., Mach., and Mechatronics, June 2001, 2 pages, Montreal 2001
- [20] Mathworks Inc.: **Matlab Help Desk** - Help system for Matlab 5.3
- [21] Mathworks Inc.: **Fuzzy Logic Toolbox User's Guide** - Version 2, 2001
- [22] RÁNKY P., G., HO C.Y.: **Robot modelling** - IFS (Publications) Ltd, UK 1985, ISBN 0-903608-72-3
- [23] RÝZNAR, J.: **Mechanická konstrukce nohy kráčivého robotu** - Diplomová práce, ÚMT FSI, VUT v Brně, Brno 2003
- [24] ŘEŘUCHA, V.: **Inteligentní řízení kráčejiho robota** - Docentská habilitační práce, Vojenská akademie v Brně, Brno 1997
- [25] SAJFRT, L.: **Návrh inverzního kinematického řízení pohybu pantografické nohy kráčivého robotu** - Diplomová práce, ÚMT FSI, VUT v Brně, Brno 2003
- [26] SHIEH, W. B.: **Multiobjective optimization of a leg mechanism with various spring configurations for force reduction** - University of Maryland 1996 Technical Research Report T.R. 96-52
- [27] SLÁMA, L.: **Genetický algoritmus a jeho využití pro řešení identifikačních a optimalizačních úloh inženýrské mechaniky** - Disertační práce, FSI, VUT v Brně, Brno 1999
- [28] SLAVÍK, J., KRATOCHVÍL, C.: **Mechanika těles - Dynamika** - 1. Vydání, Brno: Vysoké učení technické 1988, Číslo publikace 1712

## WWW stránky

- [29] : **Basics of walking technology** - [online] [cit.2001-09-17]  
<<http://www.automation.hut.fi/research/robotics/walking/basics.htm>>
- [30] BOLDIŠ, P.: **Bibliografické citace dokumentů podle ISO 690** - [online], 1999 Poslední revize 2000-13-10 [cit.2001-09-17] <<http://www.cuni.cz/boldisp/citace.html>>
- [31] SCOTT, F.: **Frank Scott's Hexapod Robots** - [online], Poslední revize: 1997-11-27 [cit.2001-09-17] <<http://www.frasco.demon.co.uk/>>
- [32] YEUNG, A.: - [online], [cit.2001-09-17]  
<<http://www.geocities.com/augustoyeung/>>
- [33] ALVAREZ, D.: **Introduction** - [online], [cit.2001-09-17]  
<<http://guinness.cs.stevens-tech.edu/~dalvarez/FINALREPORT.htm>>
- [34] : - [online], Poslední revize: 22-01-2001 [cit.2001-09-17]  
<[http://www.iai.csic.es/dca/rimho\\_i.htm](http://www.iai.csic.es/dca/rimho_i.htm)>
- [35] TSIKALAKIS, M.: **Dante II** - [online], 2001 [cit.2001-09-17]  
<<http://infoeng.ee.ic.ac.uk/~malikz/surprise2001/mt299e/article2/>>

- 
- [36] WILLIAMS, R. P.: **TR 91-82: Design of a Crank-and-Rocker Driven Pantograph: A Leg Mechanism for the University of Maryland's 1991 Walking Robot** - 1991 [cit.2001-09-17]  
<[http://www.isr.umd.edu/TechReports/ISR/1991/TR\\_91-82/TR\\_91-82.phtml](http://www.isr.umd.edu/TechReports/ISR/1991/TR_91-82/TR_91-82.phtml)>
- [37] : **Quadruped Walking Machines TITAN III and TITAN IV** - [online], [cit.2001-09-17]  
<<http://mozu.mes.titech.ac.jp/research/walk/TIII&IV/TIII&IV.html>>
- [38] COCATRE-ZILGIEN, J. H.: **Autopod 0.33, an untethered pneumatic walking metamere robot** - [online], 1996 Poslední revize: 2000-12-24 [cit.2001-09-17]  
<<http://www.prairienet.org/~cocatrez/ap033txt.htm>>
- [39] TRILLANES, R.: **BUGSY by Rainier Trillanes, et al** - [online], [cit.2001-09-17]  
<<http://www.robotics.com/robomenu/bugsy.html>>
- [40] MOUNIOLOUX, S.: **NEO by Stephen Mounioloux** - [online], [cit.2001-09-17]  
<<http://www.robotics.com/robomenu/neo.html>>
- [41] : **NEOS Server for Optimization** - [online], [cit.2001-09-17]  
<<http://www-neos.mcs.anl.gov/>>
- [42] TAPPEINER, H.: **Tappotec: Six Einführung** - [online], [cit.2001-09-17]  
<<http://www.tappotec.com/Six/deuSixEinleitung.htm>>
- [43] : **Quadrupod II Mobile Robot Kit** - [online], [cit.2001-09-17]  
<<http://www.technologyindex.com/education/store/robotics/tss/quad2.html>>
- [44] : **Hexapod II Mobile Robot Kit** - [online], [cit.2001-09-17]  
<<http://www.technologyindex.com/education/store/robotics/tss/hexapod2.html>>

## 8 ABSTRACT

There is a development of robots and manipulators for industry applications in progress. There are lots of examples of successful robots using in an automobile industry and others automated factories.

Replacing of a hard, monotonous or dangerous human duty is the motivation for the practical using of robots and manipulators. These often-used applications are characterized by the low amount of mobility or they are completely stationary.

Nowadays, there is a strong attempt to develop mobile robots to be able to use robotics in lots of applications and in various areas of human activity. The successful applications are for example astronautics survey, underwater survey, geological survey of volcanoes, revision duty (of retaining dams or atomic reactors); repairing duties (rodding) or removing mines.

Expansion of making and using the mobile robots is restricted by many problematic areas for example the difficulty of creating an intelligent control, the energy demand on mobile robots working and by the design difficulties of mobile subsystem.

This subsystem has to fulfill intensive requests for example enough mobility in the robot working area, low energy consumption and breakdown rate. These requirements lead to a multicriterial optimization using.

This work concentrates on solving some problems of the mobile subsystem design. Computed modeling is the main method used to solve these problems. Created model is possible to use to optimize the design parameter of mobile subsystem.

There are many particular models. Robot kinematics is modeled by the using of analytical model in Matlab. Robot dynamics is modeled by using Pro/Mechanica as a rigid body system. Electromechanical actuator properties are modeled analytically in Matlab too. There are created tools for design and the simulation control of robot walking in Pro/Mechanica and functions for the easy export of simulation parameters from Matlab to Pro/Mechanica. Functions for the import of simulation results from Pro/Mechanica into Matlab are created too. With the using of these tools are models concatenated to one virtual model. This virtual model is used to optimize the design parameters of robot mobile subsystem.

There is also solved the creation of numerical approximators. Those can substitute kinematic and dynamic models that are implemented by the use of neuro-fuzzy approach. These approximators are possible to use by the implementation of intelligent robot control. The advantage of using neuro-fuzzy approximators is the implementation support of fuzzy approach in microcontrollers.

The results of this thesis can be used as a support for designing the sophisticated walking mechanism or by the creating complicated neuro-fuzzy models of mechanical system.

## 9 ŽIVOTOPIS

### Ing. Pavel Miček

narozen: 16. 4. 1975  
 rodinný stav: svobodný  
 kontakt: micek@fme.vutbr.cz, +420 541 142 146

### Praxe

- od 2004 FSI, VUT v Brně Brno, ČR  
*Systémový integrátor*  
 Podpora při vytváření a nasazování informačního systému.
- 2002-2004 FSI, VUT v Brně Brno, ČR  
*Technik*  
 Práce v oblasti modelování a optimalizace mechanismů v Pro/Mechanice Motion, tvorba animací v Macromedia Flash, projekt DEUMA, Leonardo
- 1998-2000 Delong Instruments Industrial Brno, ČR  
*Konstruktér*  
 Tvorba nástrojů pro AutoCAD v jazyce AutoLisp, spolupráce při konstrukci monochromátoru.

### Studium

- 1998-2001 FSI, VUT v Brně Brno, ČR  
 Doktorské studium, obor Inženýrská mechanika
- 1993-1998 FSI, VUT v Brně Brno, ČR  
 Inženýrské studium, obor Aplikovaná mechanika - mechatronika, diplomová práce Realizace fuzzy regulátoru na mikrokontroleru Motorola MC68HC11.
- 1989-1993 SPŠ strojnická, Sokolská 1 Brno, ČR  
 Středoškolské studium, maturita s vyznamenáním
- 1992 HTBLA Steyer Steyer, Rakousko  
 1 měsíční studijní pobyt na ekvivalentu strojnické průmyslové školy.

**Jazyky** Angličtina, Němčina

**Programovací jazyky**

Pascal, Multi Micro Modula, Maple, Matlab, AutoLisp, Perl, HTML

**Operační systémy na úrovni správce**

Linux , Windows NT, Windows 2000

**Další programové vybavení**

Adobe PageMaker, Illustrator, Photoshop, Macromedia Flash, L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X

MS Office

AutoCAD, Pro/Mechanica Motion, Rhinoceros 3D

V Brně, 18. března 2007