

Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojího inženýrství
Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Ing. Robert Grepl

**Využití komplexních dynamických modelů
při návrhu a řízení kráčejího robotu**

**Use of Complex Dynamic Models in Design and Control
of Walking Robots**

ZKRÁCENÁ VERZE PH.D. THESIS

Obor: Aplikovaná mechanika
Školitel: doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.
Škol. spec.: prof. Ing. Ctirad Kratochvíl, DrSc.
Oponenti: prof. RNDr. Jan Šklíba, CSc.
prof. Ing. Igor Ballo, DrSc.
doc. RNDr. Ing. Tomáš Březina, CSc.

Datum obhajoby: 7. 4. 2004

KLÍČOVÁ SLOVA:

mobilní robot, modelování dynamiky mechanismů, umělé neuronové sítě, Matlab-SimMechanics

KEY WORDS:

mobile robot, modelling of dynamics of mechanisms, artificial neural networks, Matlab-SimMechanics

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE:

Oddělení pro vědu a výzkum FSI VUT v Brně

© 2004 Robert Grepl

ISBN 80-214-2666-7

ISSN 1213-4198

Obsah

1	Úvod	5
2	Formulace problému a cíle řešení	7
3	Přehled současného stavu řešení problematiky	8
3.1	Metody modelování kinematiky a dynamiky mechanismů	8
3.2	Modelování dynamiky robotických soustav	9
3.3	Tepelné modely	10
4	Volba metod řešení problému	11
4.1	Modelování dynamiky v SIMMECHANICS	11
4.2	Teorie náhradní tepelné sítě	12
4.3	Numerické aproximátory	12
4.3.1	Umělé neuronové sítě	12
4.3.2	Metoda Lazy Learning	13
5	Přehled nejdůležitějších výsledků práce	14
5.1	Model pantografické nohy robotu	14
5.2	Kinematický model celého robotu	14
5.3	Dynamický model stability (DyMS)	16
5.3.1	Motivace návrhu DyMS	16
5.3.2	DyMS realizovaný v SIMMECHANICS	16
5.3.3	DyMS realizovaný aproximátorem	17
5.4	Tepelný model motoru	18
5.5	Komplexní model robotu KMR	18
6	Závěr	20
	Publikace autora	22
	Použitá literatura	24
	Summary	27

VĚNOVÁNO RODIČŮM

Poděkování

Je mou milou povinností na tomto místě poděkovat všem lidem, kteří se přímo či nepřímo zasloužili o to, že tato práce mohla vzniknout.

Po odborné stránce to byli zejména Doc. Čestmír Ondrůšek a Prof. Ctirad Kratochvíl, dále pak Radek Vlach a členové pracovní skupiny okolo projektu čtyřnohého robotu – Doc. Tomáš Březina, Jiří Krejsa, Pavel Houška, Pavel Miček a další.

V osobním životě pak zaslouží hluboký dík především moji rodiče za vedení a podporou během celé doby studia. Dále bych chtěl poděkovat Kamile, Bennymu, Bohdanovi, Myšákovi, Ferrovi a ostatním, Instruktorům Brno, pánům Coveyovi, Pacovskému, Clarkovi, Bradburymu, Waltarimu, Merlemu, Velechovskému, Smithovi, Nohavicovi, Fialovi . . . za inspiraci, myšlenky a dojmy.

1 Úvod

-
1. Robot nesmí ublížit člověku nebo svou nečinností dopustit, aby člověku bylo ublíženo.
 2. Robot musí uposlechnout příkazů člověka, kromě případů, kdy tyto příkazy jsou v rozporu s prvním zákonem.
 3. Robot musí chránit sám sebe před zničením, kromě případů, kdy tato ochrana je v rozporu s prvním nebo druhým zákonem.

Isaac Asimov, Já robot, 1950

Hlavní oblastí zájmu robotiky byla a stále je problematika průmyslové automatizace. Robot je zde chápán jako stroj s určitým stupněm samostatnosti chování, přičemž není jednoznačné a jednoduché definovat, kdy již můžeme hovořit o inteligenci. Průmyslový robot je nejčastěji stacionární a jeho fyzická podobnost s člověkem, jehož práci nahrazuje, je většinou minimální.

V určitém období existovaly vize uspořádání světa, kde roboty(i) nahradí veškerou lidskou práci. Nyní je zřejmé, že taková představa není udržitelná. Problémem je jednak současná (a možná vůbec prakticky dosažitelná) úroveň umělé inteligence robotů, především však společenský aspekt věci. Práce spojená s pocitem vlastní realizace a užitečnosti celé společnosti je jednou ze základních životních potřeb člověka. Snaha zbavit člověka práce pomocí strojů se pak jeví ještě nesmyslnější, uvědomíme-li si způsob, jak získaný volný čas většina lidí využije. Závislost spokojenosti člověka a délky pracovní doby není ani nepřímo úměrná ani lineární.

Poněkud odlišnými problémy a otázkami v porovnání s průmyslovými roboty se zabývá konstrukce *mobilitních robotů*. Cílem je navrhnout stroje schopné samostatného pohybu v různých prostředích a za různých podmínek, s různou mírou přítomnosti člověka. To je už samo o sobě podstatně více přibližuje k charakteru slova *robot*, tak jak ho vytvořil K. Čapek a jak je v povědomí společnosti. Mobilní roboty (roboti ?) zcela přirozeně vyžadují vyšší stupeň autonomního chování, vyšší úroveň umělé inteligence. Stejně tak přirozeně je s nimi spojena větší možnost jejich zneužití, která je patrná i z výše uvedených „Tří zákonů robotiky“ Isaaca Asimova. Neméně jasná je pak maršnost jakékoli snahy o apriorní vyloučení takové možnosti.

Přesto se domnívám, že stále existuje pozitivní motivace výzkumu a konstrukce mobilních robotů. Šancí je využití robotů právě při řešení problémů, které si člověk za pomoci techniky způsobuje. Příkladem může být inspekční

a servisní činnost v nepřístupných nebo nebezpečných prostředích (chemická a jaderná zařízení) nebo odstraňování nášlapných min. Samostatnou oblastí je pak kosmonautika.

Vedlejším avšak neméně důležitým důsledkem studia problematiky mobilní robotiky je získání poznatků využitelných při konstrukci technických zařízení zcela jiného určení. Tímto způsobem lze podle mého názoru podat i plně zdůvodnění existence výzkumných projektů zabývajících se mobilními roboty v prostředí české vysoké školy.

Jedním z přirozených kritérií rozdělení mobilních robotů je typ „podvozku“. Roboty se tak dělí na kolové, pásové, kráčející a jiné. *Kráčející roboty* se nejvíce podobají živým organismům (hmyzu, zvířatům, člověku), jejich konstrukce umožňuje větší manévrovací schopnosti, je ale také obtížnější. „Dědí“ všechny problémy robotů kolových a pásových jako jsou globální a lokální navigace, s tím související rozpoznávání obrazu, tvorba map prostředí, vyhýbání se překážkám, plánování atd.

Navíc se objevují náročné otázky konstrukce pohonových soustav a samotných noh robotů, kinematiky jejich pohybu, synchronizace řízení pohonů, vlivu dynamiky pohybu na stabilitu, otázky účinnosti a optimalizace chůze a další.

Výzkum a vývoj robotických kráčejících mechanismů je aktuálním vědeckým problémem. Bylo vytvořeno množství nejrůznějších experimentálních konstrukcí robotů s různým počtem noh, různými pohony i způsobem řízení. Bádání v této oblasti není možno v žádném případě považovat za uzavřené, naopak, jedná se o v současnosti velmi významné a atraktivní téma.

Tato práce se soustřeďuje na otázky modelování kinematiky a dynamiky mechanismu, dále pak na modelování pohonů a jejich tepelného chování. Celkově je snahou vytvořit komplexní model robotu, který by při únosné výpočetní náročnosti podal co nejvěrnější obraz o chování reálného objektu a byl by využitelný minimálně v prvotní a střední etapě konstrukčního návrhu. V budoucnu by pak bylo možno získané zkušenosti aplikovat na návrh robotu s vyšším stupněm dynamického chování.

2 Formulace problému a cíle řešení

Problematika modelování krácejících robotů představuje velmi širokou a moderní oblast základního i aplikovaného výzkumu. Ve své obecné podobě má také multidisciplinární charakter. Prvním úkolem bylo dostatečně vymezit předmět zkoumání a definovat požadované cíle práce.

Již při počátečních úvahách jsme se soustředili především na otázku modelování dynamiky robotu jako celku, tedy na komplexní přístup k modelování. Některé výhody takto navrženého modelu jsou popsány v kap. 5.5. Poznamenejme jen, že při práci s dynamickým modelem mechanismu robotu potřebujeme téměř nezbytně také kinematický model. Jeho návrh v numerické podobě je však ve srovnání s dynamickým modelem velmi dobře zvládnut.

Dalším faktorem ovlivňujícím obsah práce byla úvaha nad rozdílnými požadovanými kvalitami vytvořeného komplexního dynamického modelu. Máme zde především na mysli jeho aplikaci. Značně rozdílné vlastnosti může a musí mít model určený výhradně na simulační výpočty na počítači typu PC oproti modelu určenému pro on-line řízení a provozovanému na mikrokontroleru.

Na základě výše uvedených úvah byly formulovány následující cíle disertační práce:

- vytvořit a odladit komplexní výpočtový model celého robotu zahrnující mechanickou část (čtyřnohý robot, určený tvar a parametry pantografické nohy), elektrickou část (model stejnosměrného motoru, parametry dány motory použitými na fyzikálním modelu), tepelnou část
- tento komplexní model bude využitelný jako generátor dat pro zvolenou aproximační metodu, např. umělou neuronovou síť
- vytvořit, natrénovat a verifikovat výsledky aproximačního modelu pro zjištění statické a dynamické stability robotu
- experimentálně určit potřebné parametry tepelného modelu motoru
- navrhnout tepelný model, který zajistí možnost krátkodobého proudového (momentového) přetěžování motorů s cílem dosažení vyššího výkonu celé soustavy

3 Přehled současného stavu řešení problematiky

3.1 Metody modelování kinematiky a dynamiky mechanismů

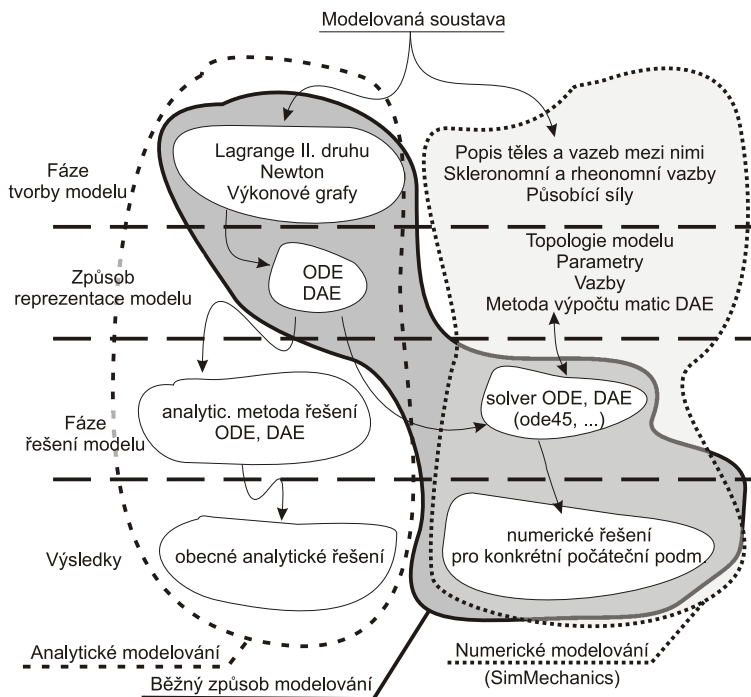
Modelování kinematiky mechanismů je poměrně dobře zvládnuto a relativně široce rozšířeno. Vždy je možné sestavit analytický přímý kinematický model soustavy (pro polohy snadno, rychlosti a zrychlení dostaneme derivací). Často je možno sestavit i analytický inverzní kinematický model a pokud tomu tak není, poměrně jednoduše použijeme model numerický ([57, 58, 1, 16]). Kinematický model je velmi často implementován i do různých CAD systémů nebo animačních programů.

Z hlediska obtížnosti řešení je na zcela jiné kvalitativní úrovni modelování dynamiky mechanismů. Pokud přesáhne úloha minimální obtížnost, objevuje se problém se samotným sestavením dynamického modelu. Na obr. 3.1 jsou schématicky znázorněny možnosti řešení úlohy dynamiky postupně od tvorby modelu přes jeho reprezentaci a řešení až po obdržení výsledků. Poznamenejme, že se v této práci zabýváme výhradně modelováním mechanismů složených z tuhých těles propojených vazbami (multi rigid body system).

Metody použité k modelování dynamiky lze rozdělit podle dvou základních kritérií:

1. podle **matematické povahy** metody na
 - metody analytické
 - metody numerické
2. podle **pořadí metody v procesu řešení** problému dynamického modelování na
 - metody sestavení dynamického modelu
 - metody řešení dynamického modelu

Klasický a historicky nejstarší způsob sestavení i řešení dynamiky Newtonovým přístupem nebo Lagrangeovými rovnicemi není pro složitější úlohy dostačující. Ruční sestavení pohybových rovnic (zvláště v prostoru) začíná velmi rychle přesahovat lidské možnosti. Proto vznikají programy, které umožňují automatické sestavení matematického modelu. Takto sestavený model je numerický (matice popisující soustavu nejsou vyjádřeny v uzavřeném tvaru, dopočítávají se iteračně při každém kroku řešení).



OBR. 3.1: PŘEHLED METOD MODELOVÁNÍ DYNAMIKY SOUSTAV TUHÝCH TĚLES

Ze známějších produktů lze jmenovat ADAMS [26, 50], Promechanica [63] a také SIMMECHANICS. ADAMS i Promechanica jsou oproti SIMMECHANICS více inženýrsky orientované. Modelování v nich probíhá podobně jako v CAD systémech, případně je možné geometrii těles importovat. Na druhou stranu, jedná se o software podstatně méně otevřený, propojení s jinými programy a využití specializovaných analýz je obtížnější. V neposlední řadě byla při výběru software důležitá i ta skutečnost, že s MATLABem i SIMMECHANICS má autor dlouhodobější zkušenosti, a na Ústavu mechaniky těles je licencován.

3.2 Modelování dynamiky robotických soustav

Při studiu konkrétních aplikací modelování kinematiky a dynamiky jsme se zaměřili na dostupnou literaturu z oblasti průmyslové robotiky [67, 66]. Pokud se tyto publikace zabývají otázkami dynamiky, pak výhradně jednoduchými modely otevřených kinematických mechanismů, nejčastěji lineárními či lineárnizovanými, tak aby byla zaručena možnost řízení klasickou teorií.

Hlavním zdrojem informací a inspirace však byly články vyhledané na Internetu. Velké množství autorů se věnuje návrhům modelů chůze [60, 36, 60, 52, 50, 64], v poslední době se zájem soustřeďuje na dynamickou chůzi, jsou používány různé metody, např. ZMP (zero moment point) [50], PFA (Periodic Function Approach)[60] a neuronové sítě [73, 45, 46, 47]. Jako zkoumané soustavy jsou voleny nejčastěji dvounohé a čtyřnohé roboty, modely noh jako otevřené kinematické řetězce. Energetická bilance robotu bývá zkoumána nejčastěji pouze na mechanické soustavě.

Zajímavými příspěvky jsou např. [32], kde je řešeno modelování čtyřnohé robotu Silo 4. Dynamika noh robotu je modelována odděleně, což sice pro některé úlohy řízení postačuje, ale rozhodně není použitelné při komplexním modelování chůze.

V práci [43] je popsáno řešení statické stability robotu MERO. V úvahu se bere tvar a poddajnost terénu, koeficienty tření mezi koncovými efekty a také pasivní odpory v kloubech mechanismu.

V článku [50] je popsán návrh způsobu dynamické chůze, výpočtové simulace jsou provedeny v prostředí ADAMS. Vzhledem k tomu, že se práce soustředila na otázku stability, není uvažován vliv pohonových soustav a jejich dynamika.

3.3 Tepelné modely

Problematika tepelných výpočtů elektrických strojů nabývá stále více na významu, často totiž představuje jedinou oblast, ve které je možno pracovat na zlepšení parametrů stroje i celé mechatronické soustavy. Tepelný výpočet často navazuje na výpočet ventilační, kdy bývá cílem i snížení hlučnosti stroje (optimalizace regulačních parametrů vnějšího zdroje ventilace).

Při modelování oteplení elektrického stroje jsou možné dva základní přístupy:

- modelování metodou konečných prvků (FEM)
- modelování pomocí náhradní tepelné sítě

FEM tepelný model umožňuje podstatně detailnější a přesnější pohled na rozložení teploty v analyzovaném systému, pochopitelně je za to třeba zaplatit náročnější tvorbou modelu a podstatně větší výpočetní náročností (podstata FEM je dostatečně známá a její popis přesahuje rámec a cíle této práce).

Metoda náhradní tepelné sítě pracuje s podstatně jednodušší strukturou, počet prvků je řádově jednotky až desítky, elektrický stroj je nahrazen soustavou těles odpovídajících jednotlivým částem stroje, které jsou mezi sebou propojeny místy, ve kterých dochází k přenosu tepla.

4 Volba metod řešení problému

4.1 Modelování dynamiky v SimMechanics

SIMMECHANICS patří mezi tzv. „multi-domain“ modelovací nástroje. Je založen na velmi rozšířeném nástroji pro simulace dynamických systémů MATLAB–SIMULINK. Abstraktní signálové toky jsou nahrazeny toky konkrétních fyzikálních veličin, jakými jsou síly, momenty, polohy, rychlosti a zrychlení. Možnosti SIMULINKu jsou tak rozšířeny o přímou možnost simulace mechanických systémů. SIMMECHANICS obsahuje knihovny SIMULINKovských bloků jako jsou tělesa, vazby, senzory, aktuátory a pod. Pomocí aktuátorů a senzorů je zajištěno propojení s bloky klasického SIMULINKu. Můžeme tak velmi jednoduše kombinovat modely mechanické, elektrické, tepelné a jiné, stejně tak jako využívat dostupné toolboxy MATLABu nebo vlastní dříve napsané zdrojové kódy [41, 42].

Základním rozdílem v přístupu k modelování mechanických systémů v čistém MATLABu či SIMULINKu a v SIMMECHANICS je způsob tvorby modelu. Při modelování v MATLABu musíme ručně nebo v jiném software (případně v Symbolic Math Toolbox) odvodit matematický model systému (ODE - soustava obyčejných dif. rovnic, případně DAE - soustava algebrodiferenciálních rovnic), který pak přepíšeme do zdrojového m-file, případně vyjádříme pomocí SIMULINKovských bloků. Oproti tomu při modelování v SIMMECHANICS definujeme pouze strukturu modelu, tj. geometrii a kinematické vazby mezi tělesy. SIMMECHANICS si pak sám převede tento strukturální model do podoby interního matematického modelu [54]. Podrobnější informace o tvorbě tohoto interního modelu a obecně o numerickém modelování dynamiky vázaných systémů lze najít v [72].

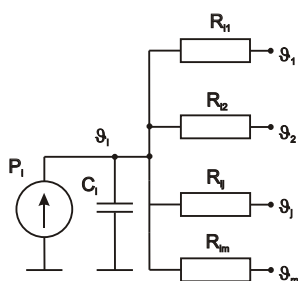
K definici struktury modelu postačuje zadat tvar každého z těles pouze pomocí inerční matice a polohy těžiště. Dále na tělese definujeme body, kterými je těleso propojeno s vazbami. Takto je určena geometrie mechanismu. Dále definujeme vazby a aktuátory působící na tělesa a ve vazbách. Z praktického hlediska je klíčovým požadavkem alespoň jeden stupeň volnosti celé soustavy. Podrobně jsou podmínky správné topologie modelu popsány v [54] a také v dalším textu.

Požadavek na zadání inerční matice, hmotnosti a polohy těžiště tělesa jako jediných parametrů ale znamená, že ani při vizualizaci nelze očekávat zobrazení reálného tvaru tělesa. K dispozici je síťové schéma (convex hulls) a zobrazení pomocí reprezentace inerční matice (equivalent ellipsoids). Řešením umožňujícím lepší kvalitu vizualizace může být použití Virtual Reality Toolboxu, se kterým je v SIMMECHANICS uvažováno jako s možným nástro-

jem. Principiálně je možné exportovaný soubor z 3D CADu použít pro vizualizaci propojením ze SIMULINKU.

4.2 Teorie náhradní tepelné sítě

Teorie náhradní tepelné sítě vychází z analogie s elektrickým obvodem. Používá i stejné označení prvků obvodu, dynamika je popsána kvalitativně stejnou soustavou diferenciálních rovnic.



OBR. 4.1: OBEČNÝ PŘÍKLAD TEPELNÉHO UZLU

Základem metody je rozdělení stroje na vhodné menší části (např. stator, rotor), které jsou mezi sebou a okolím propojeny vazbami, ve kterých dochází k přenosu tepla. Taková soustava představuje model cest tepelných toků ve stroji. Náhradní tepelná síť se skládá ze zdrojů (ztrát) tepla, uzlů, tepelných odporů a tepelných kapacit.

Tepelná rovnováha jednoho tělesa (obr. 4.1) náhradní sítě je popsána jednou obyčejnou diferenciální rovnicí prvního řádu [71]

$$C_i \frac{d\vartheta_i}{dt} + \sum_{j=1}^m \frac{1}{R_{ij}} (\vartheta_i - \vartheta_j) = P_i \quad (4.1)$$

kde C_i je tepelná kapacita tělesa, ϑ_i je teplota tělesa, m je počet těles, které mají tepelnou vazbu s tělesem i , R_{ij} je tepelný odpor při přenosu tepla z tělesa j na i a P_i je tepelný výkon přiváděný do tělesa i .

4.3 Numerické aproximátory

4.3.1 Umělé neuronové sítě

Umělé neuronové sítě (artificial neural networks) tvoří jednu obsáhlou třídu metod umělé inteligence (artificial intelligence - AI). Obecně fungují jako nelineární aproximátory a liší se podle aktivační funkce (nejčastěji prostá soumace), signálové funkce použité v neuronech (lineární, logistická), topologie (dopředné, rekurentní), podle způsobu práce (sítě s učitelem, samoorganizující se sítě), podle metody použité v procesu učení (stochastické metody, genetické algoritmy, gradientní metody) apod. [49].

Existuje velké množství různých variant neuronových sítí lišících se výše uvedenými vlastnostmi, nejpoužívanější však zůstává dopředná vícevrstvá síť s úplnou topologií a učícím algoritmem Back-Propagation (algoritmus zpětného šíření). S tímto typem sítí (NN) budeme pracovat také zde, přesněji s jeho implementací v Neural Network Toolbox for MATLAB.

4.3.2 Metoda Lazy Learning

Neuronové sítě, stejně jako mnoho dalších aproximačních metod, patří mezi tzv. globální aproximační metody. Vytváří globální model aproximované funkce.

Jinou skupinou aproximátorů jsou metody lokálního modelování. Pracují pouze s malým okolím dotazovaného bodu, vytvářený model nemusí postihovat širší souvislost funkce a lze tedy použít podstatně jednodušší matematické metody. Tento přístup je také výhodnější v případě dodatečného doučování aproximátoru.

Lazy Learning (LL) je větší skupina metod vzniklá v roce 1997. V dalším textu budeme mít pod pojmem LL na mysli výhradně implementaci této metody v The Lazy Learning Toolbox for Use with MATLAB. Tento nástroj vyvinuli G. Bontempi a M. Birattari v rámci projektu IRIDIA[27]. Toolbox je volně použitelný pro nekomerční a nevojenské aplikace.

Metoda LL všechny potřebné výpočty provádí až v okamžiku obdržení dotazu. Při každé predikci je vytvořen vlastní lokální model, obecně probíhá strukturální a parametrická identifikace. Strukturální identifikace provádí výběr vhodné rodiny lokálních aproximátorů, výběr metriky pro posouzení vhodnosti aproximace a také velikosti oblasti, jejíž reprezentanti jsou použiti. Parametrická identifikace pak vykonává optimalizaci nastavení parametrů lokálních aproximátorů.

Při implementaci v toolboxu je výběr rodiny aproximátorů, tj. strukturální identifikace, prováděn manuálně, jsou použity polynomy různých stupňů. Metrika pro posouzení vhodnosti aproximace je dána. Problém volby vhodné oblasti se redukuje na problém volby počtu nejbližších sousedů. V okamžiku požadavku na predikci je na základě dotazu vytvořena množina lokálních modelů s polynomy různých stupňů a s různým počtem použitých sousedů. Každý model je ohodnocen a finální predikce je pak vytvořena kombinací nebo výběrem z množiny modelů, použit je algoritmus rekurzivní metody nejmenších čtverců.

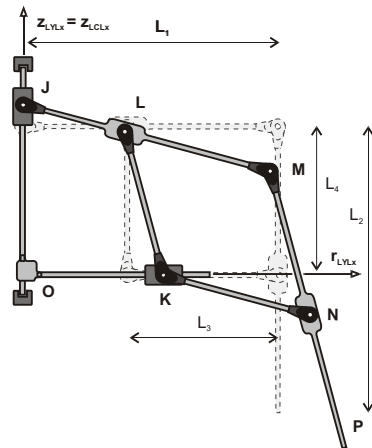
5 Přehled nejdůležitějších výsledků práce

5.1 Model pantografické nohy robotu

Práce na tvorbě mechanické části komplexního modelu zcela přirozeně začaly návrhem nejjednoduššího modelu mechanismu ve 2D (v rovině $r - z$ v LYLx souř. syst.). Pro první experimenty sloužící především k získání zkušeností a vývoji vhodných postupů byl použit model robotické nohy typu „dvojitě kyvadlo“. Z numerického hlediska má tento model významnou výhodu v tom, že má otevřenou topologii¹. Odpadají tak některé potíže s řešiči vazeb². Podobný postup byl později zvolen i pro návrh modelu celého robotu.

Po odladění algoritmů a odstranění počátečních problémů bylo přistoupeno k návrhu modelu respektujícího co možná nejpřesněji vlastnosti skutečného fyzikálního modelu nohy. Geometrie fyzikálního modelu nohy je patrná z obrázku 5.1. Jednotlivé části mechanismu jsou specifikovány hmotností, maticí momentů setrvačnosti a polohou těžiště. Některé prvky mechanismu jsou zjednodušené a uvažované např. jako hranol o proměnné délce tak, aby bylo možno automaticky ve výpočtu měnit rozměry mechanismu.

Vytvořený dynamický model jedné nohy byl následně použit jako inverzní kinematický a dynamický model. Opět se dá říci, že se jednalo o práci vedoucí k ověření navržené filosofie řešení. Ukázalo se, že návrh inverzního kinematického modelu je v SIMMECHANICS velmi jednoduchý a nevyžaduje formulaci kinematického modelu jako tomu bylo např. v přístupu publikovaném autorem v [16].



OB. 5.1: LOKÁLNÍ CYLINDRICKÝ SOUŘADNÝ SYSTÉM NOHY ROBOTU (LYLx)

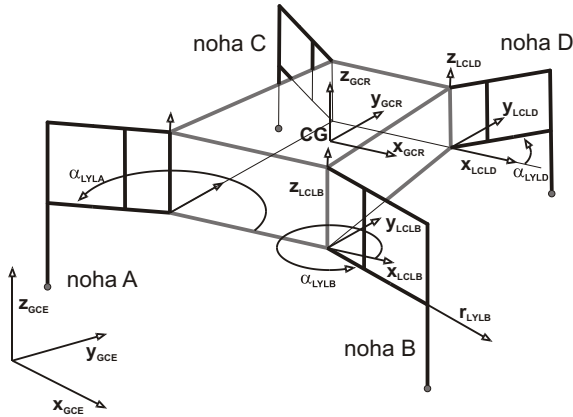
5.2 Kinematický model celého robotu

Po zkušenostech s modelováním jedné nohy v rovině $r - z$ jsme přistoupili k tvorbě modelu celého robotu v prostoru. Ukázalo se, že při návrhu kinema-

¹Termín v SIMMECHANICS : open loop topology

²Termín v SIMMECHANICS : constraints solver

tického modelu vystačíme s výše popsány a na modelu jedné nohy osvědčenými postupy, zatímco dynamický model vyžaduje zcela nový přístup. IKM



OBR. 5.2: GLOBÁLNÍ KARTÉZSKÝ SOUŘADNÝ SYSTÉM ROBOTU (GCR), LOKÁLNÍ KARTÉZSKÝ SOUŘADNÝ SYSTÉM NOHY ROBOTU (LCLX)

celého robotu realizuje transformaci z lokálního kartézského souř. systému robotu do s.s. pohonů (*LDL*). Geometrie robotu je na obr. 5.2.

Kinematický model jsme sestavili relativně jednoduše přidáním těla, rámu každé nohy otáčejícího se kolem osy z a příslušných kinematických vazeb a podmínek. Veškeré rozměry noh, těla a počáteční polohy a rychlosti jsou parametrizované, např. pro potřeby optimalizačních metod.

Jedna z možností aplikace tohoto modelu je zjištění kinematicky dostupného pohybového prostoru robotu. Můžeme zvolit tři nebo čtyři nohy v kontaktu s povrchem (libovolná poloha - neregulární terén) a polohy těžiště. Model určí polohy jednotlivých pohonů pokud je úloha kinematicky realizovatelná, případně je jeho výstupem informace o nerealizovatelnosti požadované konfigurace (programově ošetřeno strukturou *try-catch*). Kinematický model ovšem nelze použít pro dynamickou nebo statickou analýzu, nelze pomocí něj vyhodnocovat síly v kontaktu nohy a povrchu. Pro tyto úlohy je nutná konstrukce dynamického modelu. Použitelný dynamický model pak již nemůže být univerzální (na rozdíl od modelu kinematického) a musí být konstruován speciálně pro daný požadavek (dynamický model stability, model pro chůzi, model pro staticky nestabilní chůzi atd.).

5.3 Dynamický model stability (DyMS)

5.3.1 Motivace návrhu DyMS

Zajištění stability je prvním a nejdůležitějším úkolem každého řízení chůze kráčivého robotu. V případě šestinohých robotů je situace podstatně jednodušší, často bývají navrženy tak, že prakticky nestabilní stav (pád) robotu nastat nemůže. U čtyřnohých robotů je s ním naopak nutno počítat vždy.

Čtyřnohé experimentální roboty bývají nejčastěji navrženy tak, že předpokládají tzv. „statickou chůzi“. Robot se pohybuje tak, že tři nohy stojí na zemi a určují tak stabilitu, tělo robotu je buď v klidu nebo se pohybuje v rozsahu trojúhelníku stability a to velmi pomalu. Čtvrtá noha robotu se pomalu přesunuje do nové pozice, následně jsou v kontaktu s povrchem všechny nohy a může dojít k přesunu těla. V dalším kroku je trojúhelník stability určen jinými třemi nohami.

Tomuto přístupu k řízení je podřízena i celá konstrukce robotu. Nohy jsou navrhovány co nejlehčí, motory jsou pokud možno přesunovány směrem do těla robotu. Dynamický i statický vliv nohy na stabilitu musí být co nejmenší.

Je zřejmé, že pro návrh a řízení kráčejícího robotu s vlastnostmi alespoň mírně se přibližujícími živým organismům je výše popsán přístup nedostatečný. Pro dostatečně rychlý pohyb je již vliv setrvačných účinků nohy nezanedbatelný, také je nutno postupně opustit předpoklad pouze statické chůze.

Motivací návrhu DyMS byl tedy návrh podstatně dokonalejšího modelu stability, který bude schopen zohlednit vliv pohybu volné nohy, rozložení konkrétních hmotností jednotlivých noh, externí silové působení a pohyb těla robotu. Jak bude popsáno dále, je možno takovýto model sestavit v SimMechanics a s jistými omezeními, která jsou dána výpočetními limity dnešních počítačů, na jeho základě vytvořit i aproximační model vhodný pro on-line řízení.

5.3.2 DyMS realizovaný v SimMechanics

Algoritmus DyMS lze shrnout takto:

1. Zadání vstupních kinematických veličin všech noh a těla robotu, vnějšího silového působení a směru vektoru gravitačního zrychlení.
2. Výpočet IKM celého robotu. Výstupem jsou kinematické veličiny všech motorů robotu.
3. Simulace DyMS. Výstupem jsou kontaktní síly v došlapu.
4. Posouzení stability (většinou prohlásíme za stabilní stav, kdy jsou všechny kontaktní síly kladné).

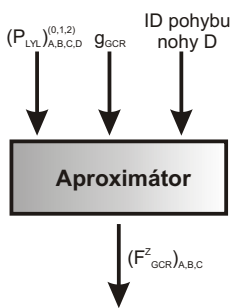
Hlavním problémem, který se při tvorbě DyMS objevuje, je kinematická přeürčenost modelu. Zcela přirozeně bychom navrhli model tak, že by koncový došlap pevné nohy byl svázán s terénem sférickou vazbou (v prvním přiblížení uvažujeme kontakt nohy s terénem bez prokluzu). Uvažujme, že jsou v kontaktu se zemí tři nohy robotu, čtvrtou zanedbáme. Výsledná soustava má pak šest stupňů volnosti (lze si představit tak, že tělem robotu je vskutku možno pohybovat ve všech šesti stupních volnosti a poloha noh je jednoznačně dána). Přitom ale předepisujeme polohu devíti motorů (9 st.voln.).

Řešením tohoto problému je zvýšení počtu stupňů volnosti mechanismu. Přirozeným postupem odpovídajícím i realitě je nahrazení „tvrdých“ sférických vazeb nohy s terénem vazbami pružnými. Tyto vazby pak lze chápat dvojm způsobem: buď jako čistě výpočtový trik zajišťující řešitelnost problému nebo jako vylepšení mechanického modelu o submodel taktilních gumových senzorů, kterými bude reálný fyzikální model vybaven.

Řešení tohoto problému bylo publikováno v [11].

5.3.3 DyMS realizovaný aproximátorem

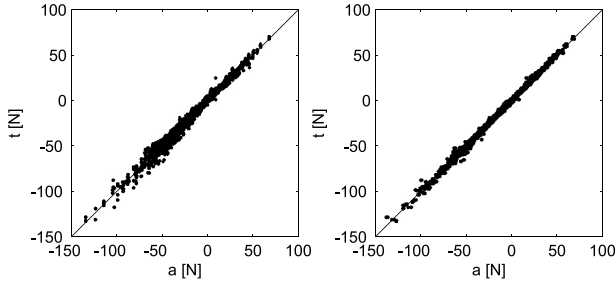
Jak jsme již zmínili při formulaci problému, je třeba rozlišovat různé požadavky na dynamický model určený pro prvotní konstrukční a simulační výpočty a pro on-line řízení robotu mikrokontrolerem. Vhodně navržený aproximátor může nahradit relativně pomalý simulační výpočet v *SimMechanics*.



OBR. 5.3: OBECNÉ SCHÉMA APROXIMAČNÍHO MODELU

Na obr. 5.3 je znázorněno základní schéma aproximačního modelu. Stále uvažujeme statickou chůzi, tzn. tři nohy v kontaktu s terénem a čtvrtá se přesouvá. Vstupem do modelu jsou proměnné charakterizující stav robotu, výstupem jsou síly v kontaktu. Stavem robotu zde rozumíme mimo kinematické veličiny popisující pohyb tří noh v kontaktu také směr vektoru gravitačního zrychlení vzhledem k s.s. GCR a pohyb nohy *D*. Předpokládáme, že je tento vybírán s určité malé množiny předdefinovaných pohybů a určen identifikátorem.

V textu práce jsme se detailně věnovali numerickým experimentům s neuronovými sítěmi jako globálními aproximátory a také využitím lokálních aproximátorů. Jako příklad uvedeme kvalitu naučené neuronové sítě. Učení a verifikace byly prováděny na různých datech. Shoda testovacích dat a odezvy sítě je na obr. 5.4.



OBR. 5.4: VERIFIKACE SÍŤE 6-X-1 (VLEVO 8-1 T-P)(VPRAVO 22-1 T-P)

5.4 Tepelný model motoru

Popis návrhu dynamického tepelného modelu pohonové soustavy tvoří relativně samostatnou část práce. Nejdůležitějším požadavkem byla především jednoduchost a dobrá praktická použitelnost modelu při on-line řízení.

Pomocí teorie tepelné sítě byl sestaveno náhradní schéma o dvou uzlech (rotor a stator) a odvozeny příslušné rovnice (analytický model).

Na základě poměrně rozsáhlých měření byly stanoveny parametry tohoto modelu (tepelné odpory a tepelné kapacity) a model byl testován.

Následně byl model integrován do komplexního modelu, jehož popis následuje.

Podrobnější informace přesahují rámec tohoto textu a byly publikovány v [4] a [6].

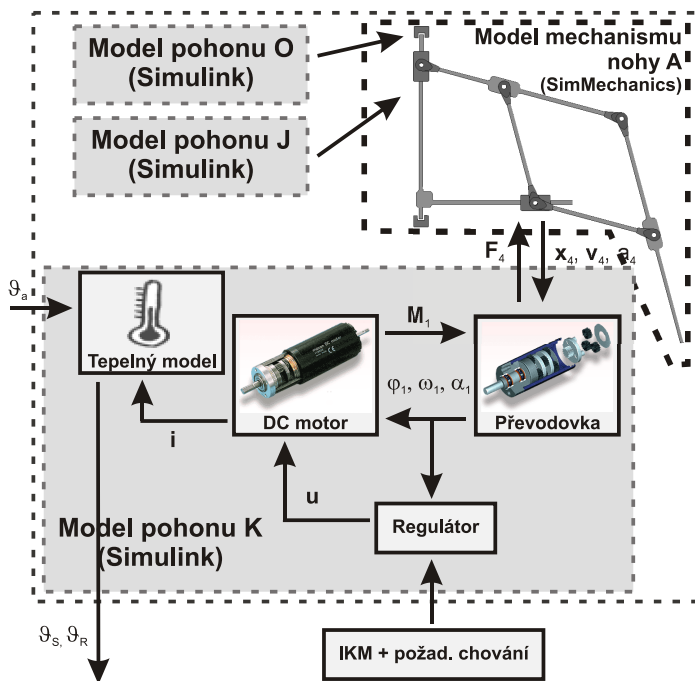
5.5 Komplexní model robotu KMR

Návrh KMR lze považovat za nejdůležitější element této práce. Dáno je to i tím, že z části integruje výsledky dříve popsané. Snaha navrhnout KMR vycházela z potřeby řešení některých problémů, které se jeví jako obtížně řešitelné, případně neřešitelné, pouze s využitím jednotlivých submodelů (kinematický, dynamický, tepelný, model motoru). Jedná se např. o modelování momentového zatížení jednotlivých pohonů během pohybu robotu, volbu optimálního nastavení parametrů regulátoru pohonů, dále vliv nepřesnosti řízení pohonů na zatížení motorů, zjištění okamžitého elektrického výkonu odebíraného ze zdroje (důležité pro návrh baterií a výkonové elektroniky), modelování vyšší úrovně řízení (reakce na vysoké oteplení motorů, úlohy udržení stability) apod.

Při návrhu KMR bylo nutno uvážit, jaké všechny problémy do modelování zahrnout a do jakých detailů při jejich popisu zajít. Vždy se jedná o otázky obtížnosti řešení, nalezení parametrů sestavených modelů a věrohodnosti výsledků, přičemž složitější model nemusí samozřejmě znamenat kvalitnější výsledky.

Zvolená struktura KMR obsahuje následující submodely: model mechanismu robotu, model převodového ústrojí každého pohonu, model stejnosměrného motoru každého pohonu, model regulace pohonů, tepelný model každého pohonu.

KMR umožňuje vypočítat hodnoty momentů, proudů a oteplení motorů každého pohonu robotu při režimu statické chůze, kdy robot stojí třema nohama na zemi a čtvrtou přesouvá na jinou pozici (nemá kontakt s terénem). Přitom se může měnit poloha těžiště robotu. Model sám neošetrí nestabilitu vlivem záporné kontaktní síly v ose z v kterékoli z dotýkajících se noh, pouze o tom poskytuje informaci.



OBR. 5.5: SCHÉMA ČTVRTINY KMR

6 Závěr

V prostředí MATLAB byl vytvořen komplexní dynamický model čtyřnohého krácejícího robotu (KMR). Mechanická část soustavy byla modelována pomocí MATLAB/SIMULINK/SimMechanics, modely pohonů zahrnující elektromotor, převodové ústrojí a regulaci, stejně tak jako tepelné modely elektromotorů byly realizovány v čistém SIMULINKU. Všechny části komplexního modelu jsou vytvořeny parametricky, čímž je umožněna velmi jednoduchá změna konstrukčních parametrů bez zásahu do vlastního modelu.

Cíle této práce definované v kap. 2 se podařilo v plném rozsahu splnit.

Vytvořený komplexní model umožňuje analyzovat chování robotu při statické chůzi, kdy jsou v dotyku s terémem tři nohy, tělo robotu a čtvrtá noha se pohybuje. Z modelu lze získat informace o velikosti sil v koncových bodech došlapu, momentovém zatížení motorů, proudu a napětí na nich. Dále lze zjistit silové zatížení kloubových spojení mechanismu, což může být užitečné při návrhu konstrukce. Velmi jednoduše lze testovat kvalitu a vlastnosti regulačních algoritmů jednotlivých pohonů. Díky znalosti chování každého z motorů je možné určit okamžitý odebíraný výkon ze zdroje i celkově spotřebovanou energii při definovaném pohybu.

Praktická využitelnost dynamického modelu vytvořeného v SIMMECHANICS byla prokázána při návrhu řízení fyzikálního modelu nohy robotu. V SIMULINKU byly ke komplexnímu modelu jedné nohy přidány bloky regulace a opakovaným provedením simulačních výpočtů se určily konstanty regulátorů. Následně se provedlo naprogramování mikrokontrolerů a prototyp fungoval. Detailně je postup popsán v příspěvku [7] a diplomové práci [10].

Speciálně pro potřeby řízení byl sestaven dynamický model stability robotu (DyMS). Při použití v prostředí MATLAB umožňuje velmi rychlé zhodnocení stability robotu stojícího na třech nohách a pohybujícího tělem a čtvrtou nohou. Navíc může být zavedeno působení externí síly a měněn směr vektoru gravitačního zrychlení. Bylo provedeno velké množství počítačových experimentů s učením neuronových sítí, zde je silné omezení velikostí paměti a rychlostí učících metod na současných počítačích. Je však možné použít jednodušší stabilitní model, pro který lze natrénovat neuronovou síť nebo rozdělit úlohu na několik submodelů.

V každém případě se podařilo vytvořit dynamický model stability realizovaný neuronovou sítí pro rovinný případ pohybu robotu, který je podstatně lepší než doposud užívaný statický model. Nejlepšího výsledku bylo dosaženo se sítí s 22 neurony ve skryté vrstvě, dobrý výsledek dává i síť s osmi neurony.

Provedením série oteplovacích zkoušek motoru Maxon se podařilo získat dostatek potřebných dat k provedení identifikačních výpočtů. Byly stano-

veny potřebné parametry simulačního tepelného modelu, přičemž se objevila zajímavá závislost tepelné kapacity pláště - závislost na tom, zda se jedná o oteplování či ochlazování motoru. Výpočtový model s identifikovanými parametry byl použit jako generátor tréninkových dat pro neuronovou síť. Takto vytvořený model lze využít jako prediktor možnosti tepelného (proudového) přetížení motoru.

Přínosy předkládané disertační práce lze shrnout do následujících bodů:

1. Navržení metodiky tvorby komplexního dynamického modelu v prostředí MATLAB vhodného pro počáteční simulační a střední prototypové experimenty (řízení fyzikálního modelu přímo z PC). Práce se soustřeďuje na modelování kráčejícího robotu, výsledky jsou ale zobecnitelné na širší okruh technických soustav obsahujících mechanickou a elektrickou část a vybavených (intelligentním) řízením.
2. Rozšíření tradičního přístupu k modelování mobilních kráčejících robotů o tepelný model motoru, což v důsledku umožňuje snížení spotřeby energie robotu a zlepšení jeho dynamických vlastností.
3. Využití metod umělé inteligence ve fázi přenosu výpočetně náročného modelu pracujícího na počítači typu PC na mikrokontroler použitý při řízení mechatronické soustavy s konkrétní aplikací v případě stabilitní úlohy a návrhu prediktoru tepelného chování elektrického pohonu.

Zkoumanou problematiku nelze v žádném případě považovat za uzavřenou. Další práce lze směřovat do několika oblastí. Velice zajímavou se jeví možnost využití komplexního modelu robotu při studiu staticky nestabilní chůze a výrazně dynamického chování např. dopad robotu na zem z výšky, tlumení dopadu s cílem minimalizovat sílu přenesenou do těla apod. Důležitá je možnost verifikace výsledků simulací na fyzikálním modelu celého robotu. Navržená koncepce komplexního robotu se jeví jako extrémně výhodná pro provádění optimalizačních výpočtů, připomeňme, že celý model je navržen parametricky a je možno jej opakovaně spouštět z prostředí MATLAB.

Práce vznikla za podpory pilotního projektu ÚT AV ČR č. 52020 "Řízení kráčivého robotu s využitím metod umělé inteligence", následujícího projektu "Realizace základních řídicích členů kráčivého robotu" a projektu MŠMT MSM 262100024 "Výzkum a vývoj mechatronických soustav".

Publikace autora

- [1] GREPL, R., MIČEK, P., BŘEZINA, T.: *Robot leg modelling using the artificial intelligence methods*, časopis Inženýrská mechanika, v recenzním řízení, 2004
- [2] GREPL, R.: *Dynamic model for stability control of walking robot*, Colloquium Dynamics of Machines 2004, Praha, 10.-11.2., 2004
- [3] GREPL, R., KREJSA, J., VĚCHET, S.: *Návrh globálních a lokálních aproximátorů pro model stability kráčejícího robotu*, Colloquium Dynamics of Machines 2004, Praha, 10.-11.2., 2004
- [4] GREPL, R., WIERCIAK, J., VLACH, R.: *Computational Modelling of Thermal Behavior of DC Motor*, EPVE 2002, ÚVEE BUT, Brno, Czech Republic, 2003
- [5] VLACH, R., GREPL, R., CHALUPA, M., ONDRŮŠEK, Č.: *Výpočtové modelování dynamických vlastností pásového vozidla*, Výpočtová mechanika 2003, Nečtiny, Česká republika, 2003
- [6] GREPL, R., VLACH, R., KRATOCHVÍL, C.: *Návrh tepelného modelu stejnosměrného motoru pro řízené momentové přetěžování*, Výpočtová mechanika 2003, Nečtiny, Česká republika, 2003
- [7] BEZDÍČEK, M., SAJFRT, L., GREPL, R.: *Návrh řízení servopohonů pantografické nohy v SimMechanics*, Výpočtová mechanika 2003, Nečtiny, Česká republika, 2003
- [8] CHMELÍČEK, J., GREPL, R.: *Návrh mechaniky a řízení dvounohého kráčejícího robotu*, diplomová práce, ÚMT FSI VUT v Brně, 2003
- [9] KADLEC, J., GREPL, R.: *Paralelizace evolučních algoritmů v prostředí běžných počítačových sítí*, diplomová práce, ÚMT FSI VUT v Brně, 2003
- [10] SAJFRT, L., GREPL, R.: *Inverzní kinematické řízení pohybu pantografické nohy robotu*, diplomová práce, ÚMT FSI VUT v Brně, 2003
- [11] GREPL, R.: *Kinematic and Dynamic Modelling of Quadruped Walking Robot*, Mechatronika 2003, 6th International Symposium On Mechatronics, 18.-20. června, Trenčianské Teplice, Slovensko, 2003
- [12] GREPL, R., ONDRŮŠEK, Č.: *Inverzní kinematické modelování v SIMMECHANICS a jeho aplikace na robotické mechanismy*, Inženýrská mechanika 2003, 12.-15. května, Svatka, Česká republika, 2003
- [13] GREPL, R., KRATOCHVÍL, C.: *Robotic Leg Inverse Dynamic Modelling and Design Optimization in SimMechanics*, Mechatronics, Robotics and Biomechanics 2003, mezinárodní konference, Hrotovice, Česká republika, 2003
- [14] GREPL, R., ONDRŮŠEK, Č.: *Vývoj flexibilního systému pro komplexní analýzu mechatronických mechanismů*, Závěrečná zpráva projektu FRVŠ č. 1912, Ústav mechaniky těles, FSI VUT v Brně prosinec 2002
- [15] GREPL, R., VLACH, R., ONDRŮŠEK, Č.: *Návrh tepelného modelu krokového motoru*, EPVE 2002, Brno, Česká republika, 2002

- [16] GREPL, R., KRATOCHVÍL, C.: *Inverzní kinematický model robotické nohy metodou Lazy Learning*, Výpočtová mechanika 2002, 29.-31. října, Nečtiny, Česká republika, 2002
- [17] GREPL, R., ONDRŮŠEK, Č.: *Návrh pohonu s krokovými motory s ohledem na dynamické vlastnosti mechanické subsoustavy s využitím MATLAB SIMMECHANICS*, Výpočtová mechanika 2002, 29.-31. října, Nečtiny, Česká republika, 2002
- [18] KRATOCHVÍL, C., PROCHÁZKA, F., GREPL, R.: *Identifikace a modelování vlivu parazitních kmitů v pohonových soustavách*, Výpočtová mechanika 2002, 29.-31. října, Nečtiny, Česká republika, 2002
- [19] KRATOCHVÍL C., KREJSA J., GREPL R.: *Contribution to solution of drive system with tooth wheels*, International Conference Dynamics of Gear Drives, 19.-22. června, Závažná Poruba, Slovensko, 2002
- [20] GREPL, R., ONDRŮŠEK, Č., SUCHOMEL, L.: *Návrh struktury modulární výukové soustavy pro řízení krokových motorů*, Inženýrská mechanika 2002, 13.-16. května, Svratka, Česká republika, 2002
- [21] KRATOCHVÍL C., GREPL R.: *Rázy v pohonových soustavách a jejich identifikace*, Inženýrská mechanika 2002, 13.-16. května, Svratka, Česká republika, 2002
- [22] GREPL, R.: *Využití umělých neuronových sítí při aproximaci výsledků optimalizačních výpočtů víceparametrických systémů*, Výpočtová mechanika 2001, Nečtiny, Česká republika, 2001
- [23] GREPL, R., ONDRŮŠEK, Č.: *Using of artificial intelligence methods for control of manipulators with rotary arm*, Inženýrská mechanika 2001, Svratka, Česká republika, 2001
- [24] GREPL, R., VESELÝ, M., ONDRŮŠEK, Č.: *Polohové řízení mostového jeřábu v reálném čase*, Diagnostika a aktivní řízení 2000, Třešť, Česká republika, 2000
- [25] GREPL, R., ONDRŮŠEK, Č.: *Aktivní tlumení pohybu břemene mostového jeřábu*, diplomová práce, Ústav mechaniky těles, FSI, VUT v Brně, 2000

Použitá literatura

- [26] MSC SOFTWARE: *ADAMS - Full simulation package*, <http://www.adams.com>, 2003
- [27] BONTEMPI G., BIRATTARI M., BERSINI H.: *Lazy learning for modeling and control design*, International Journal of Control, 72(7/8), pp. 643-658, 1999
- [28] BUŠOV: *Tvorba a řešení inovačních zadání*, skriptum VUT v Brně, 1997
- [29] CHEE-MUN ONG: *Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab Simulink*, Prentice Hall, 1998
- [30] CORKE, P.I.: *A Robotics Toolbox for Matlab*, IEEE Robotics and Automation Magazine, pp.24-32, 1996
- [31] FLORIAN, Z., ONDRÁČEK, E., PŘIKRYL, K.: *Mechanika těles - statika*, skriptum VUT v Brně, 1992
- [32] GARCIA, E., GALVEZ, J.A. AND GONZALEZ DE SANTOS, P.: *A mathematical model for real-time control of the SILO4 leg*, 3rd International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Professional Engineering Publisher, U.K., pp: 447-459, 2000
- [33] HAK, J. , OŠLEJŠEK, O.: *Výpočet chlazení elektrických strojů*, VUES Brno, 1973
- [34] HAK, J. , LIBORA, K. , LIST, V. , OŠLEJŠEK, O.: *Termika elektrických strojů točivých*, SNTL Praha, 1969
- [35] HARDT, M., STRYK, O.: *The Role of Motion Dynamics in the Design, Control and Stability of Bipedal and Quadrupedal Robots*, RoboCup 2002, International symposium, Fukuoka, Japan, 2002
- [36] HARDT, M., STRYK, O.: *Increasing Stability in Dynamic Gaits using Numerical Optimization*, Proc. 15th IFAC World Congress on Automatic Control, Barcelona, Spain, July 21-26 (Elsevier Science) 1636-1641., 2002
- [37] HORACEK, P.: *Systémy a modely*, Vydavatelství ČVUT, ISBN 80-01-01923-3 , 1999
- [38] HOUŠKA, P., BŘEZINA, T., SINGULE, V.: *Koncepce mechatronické soustavy nohy kráčivého robotu*, Inženýrská mechanika 2002, Svratka, Česká republika, 2002
- [39] HOUŠKA, P., BŘEZINA, T., SINGULE, V.: *Control and synchronization drive unit of leg of walking robot*, Mechatronics, Robotics and Biomechanics 2003, international conference, Hrotovice, Czech Republic, 2003
- [40] HUMUSOFT: *SimMechanics - mechanika pro MATLAB a Simulink*, tisková zpráva, <http://www.humusoft.cz/pub>, 21.2.2002
- [41] HUMUSOFT: *SimMechanics - popis produktu*, <http://www.humusoft.cz/pub>, 2002

- [42] HUMUSOFT: *MATLAB a Simulink - nová verze R13 přináší rychlejší a efektivnější výpočetní a vývojové prostředky*, <http://www.humusoft.cz/pub>, 2.8.2002
- [43] ION, I., SIMIONESCU, I., UNGUREANU, M.: *Stability Analysis of Gaits of Quadruped Walking Robot MERO*, WMRC 2001, National Workshop, Craiova, Rumunsko, 2001
- [44] JANÍČEK, P., ONDRÁČEK, E.: *Řešení problémů modelováním - Téměř nic o téměř všem*, skriptum VUT v Brně, PC-DIR Real, 1998
- [45] KIMURA, H., FUKUOKA, Y., KONAGA, K.: *Adaptive dynamic walking of quadruped robot by using neural system model*, Graduate School of Information Systems, Univ. of Electro-Communications, Chofu-ga-oka 151, Chofu, Tokyo 182-8585, Japan, 2000
- [46] KIMURA, H., FUKUOKA, Y., HADA, Y., TAKASE, K.: *3D Adaptive Dynamic Walking of a Quadruped Robot by Using Neural System Model*, Graduate School of Information Systems, Univ. of Electro-Communications, Chofu-ga-oka 151, Chofu, Tokyo 182-8585, Japan, 2001
- [47] FUKUOKA, Y., KIMURA, H., COHEN, A. H.: *Adaptive Dynamic Walking of Quadruped Robot on Irregular Terrain based on Biological Concepts*, International Journal of Robotics Research, 2003
- [48] KRATOCHVÍL, C., SLAVÍK, J.: *Mechanika těles-dynamika*, PC-DIR, skriptum VUT Brno, 1997
- [49] KREJSA, J.: *Simulační modelování technických objektů pomocí neuronových sítí*, disertační práce, Ústav mechaniky těles, FSI, VUT v Brně, 2000
- [50] KURAZUME, R., YONEDA, K.: *Feedforward and feedback dynamic trot gait control for quadruped walking vehicle*, Autonomous Robots, 2002
- [51] LEINVEBER, J., ŘASA, J., VÁVRA, P.: *Strojnické tabulky*, Scientia, spol. s r. o., pedagogické nakladatelství, Praha, 1999
- [52] LEWIS, M. A.: *Gait Adaptation in a Quadruped Robot*, Iguana Robotics Inc., Autonomous Robots, 2002
- [53] MALENOVSKÝ, E.: *Kinematika (předřešené grafické úlohy)*, skriptum VUT v Brně, 1991
- [54] MATHWORKS INC.: *Manuál k programu Matlab-SimMechanics*, www.mathworks.com, 2002
- [55] MATHWORKS INC.: *Manuál k The Neural Network Toolbox*, www.mathworks.com, 2003 —
- [56] MAXON MOTOR: *Key information, Standard specification, Technology, RE36*, firemní informační materiály, <http://www.maxonmotor.com>, 2002
- [57] MIČEK, P.: *Návrh a optimalizace parametrů pantografické nohy robota*, pojednání k státní doktorské zkoušce, Ústav mechaniky těles, FSI, VUT v Brně, září 2001
- [58] MIČEK P.: *Omezení vlivu singularit při posuzování neuro-fuzzy modelu*, Engineering Mechanics 2002, Svratka, Czech Republic
- [59] MLÁDEK, J., LOPRAIS, A.: *Sbírka příkladů z kinematiky*, skriptum VUT v Brně, 1987

- [60] NICHOLLS, E.: *Bipedal Dynamic Walking in Robotics*, thesis, Department of Electrical and Electronic Engineering, The University of Western Australia, 1998
- [61] ONDRUŠKA, E. , MALOUŠEK, A. : *Ventilace a chlazení elektrických strojů točivých*, SNTL Praha, 1985
- [62] PŘIKRYL, K.: *Kinematika*, skriptum VUT v Brně, 1994
- [63] PARAMETRIC TECHNOLOGY CORPORATION: *ProMechanica - Model Reference for Structure and Thermal*, Release 17.0, 2003
- [64] QUEIROZ, C., GONCALVES, G., MENEZES, P.: *A study on static gaits for a four leg robot*, Institute of Systems and Robotics, Department of Electrical Engineering, Faculty of Sciences and Technology - University of Coimbra, Portugal, 1999
- [65] RYBIČKA, J.: *LaTeX pro začátečníky*, Konvoj, 2. vydání, 1999
- [66] ŠOLC, F.: *Robotické systémy*, skriptum VUT v Brně, 1990
- [67] TALÁCKO, J., MATIČKA, R.: *Konstrukce průmyslových robotů a manipulátorů*, skriptum ČVUT v Praze, 1995
- [68] VALÁŠEK M. A KOL.: *Mechatronika*, Vydavatelství ČVUT Praha, 1995
- [69] VLACH, R.: *Řízení ventilace elektrického stroje s využitím metod umělé inteligence*, disertační práce, Ústav mechaniky těles, FSI, VUT v Brně, 2002
- [70] WIERCIAK, J.: *Measuring systems for investigation into thermal phenomena appearing in drive systems with electric micromotors*, Journal of Theoretical and Applied Mechanics, No.3, Vol.38, pp.669-691, 2000
- [71] WIERCIAK, J.: *Modelling of thermal phenomena in electric micromotors for drive system's designing purposes*, Mechatronics, Robotics and Biomechanics 2003, international conference, Hrotovice, Czech Republic, 2003
- [72] WOOD, G.D.: *Simulating mechanical systems in Simulink with SimMechanics*, The MathWorks Inc., www.mathworks.com, 2002
- [73] ZALZALA, A.M.S., MORRIS, A.S.: *Neural Networks for Robotic Control*, Ellis Horwood, 1996

Summary

Use of Complex Dynamic Models in Design and Control of Walking Robots

Research and development of mobile walking robots is a current scientific and technical problem. A variety of experimental robot designs with various numbers of legs, various drives and controls have been developed. The research in this field is motivated positively with the possibility of using robots to solve problems arising due to engineering, for example for inspection and service in inaccessible or dangerous environment (chemical and nuclear plants) or to remove mines. Another separate field is astronautics.

At work on the design of a walking robot, some serious problems must be solved which are absent or less important in case of wheel or caterpillar undercarriages. These problems include design of driving systems and robot legs, their kinematics, synchronization of drive controls, influence of the dynamics of movement on stability, walking efficiency and optimization, etc.

The thesis concentrates on the simulation of robot dynamics. The complex dynamic model includes the robot mechanism, electromechanical driving system, and, to extend the traditional approach, also thermal behaviour of motors. Optimal use of drives and their controlled overloading seems to be one of a limited number of possibilities how to increase total output of the system.

The mechanical subsystem is simulated as a multi rigid body system in the environment of the modern simulation tool Matlab/Simulink/SimMechanics, the other dynamic models are connected to it and simulated in Matlab/Simulink. The simulation is parametric, which enables optimization and inclusion of changes in construction.

Use of numerical approximators (in particular, artificial neural networks) replacing dynamic simulation models is also solved in the thesis. It is motivated with reduced calculation costs so that the results of dynamic models may be used in on-line control. Methods of local simulation were tested successfully, too.

The results of the thesis may be used in the phases of construction and testing of robot designs. It is possible to monitor in details the state of driving units (load, current, revolutions), their warming, to test control units, to change geometrical and other parameters, to monitor total power consumption of robots, etc. In future, it would be possible to apply the acquired experience to a robot design having a higher level of dynamic behaviour.

Curriculum Vitae

Osobní údaje

Jméno: **Robert Grepl**
Datum narození: 24. listopadu 1976
Kontakt: Ústav mechaniky těles,
mechatroniky a biomechaniky
FSI VUT v Brně
Technická 2, 616 69 Brno
grepl@umt.fme.vutbr.cz



Vzdělání

2000 - 2004 doktorské studium
obor Aplikovaná mechanika,
ÚMT, FSI, VUT v Brně
1995 - 2000 inženýrské studium, specializace mechatronika,
ÚMT, FSI, VUT v Brně
1991 - 1995 SPŠ strojnická, Brno

Pracovní zkušenosti

2004 ÚMTMB, FSI, VUT v Brně
odborný asistent
2001 - současnost Ústav termomechaniky, Akademie věd ČR
výzkumný pracovník
2001 - současnost FSI VUT v Brně
09/2001 - 03/2002 UMOE Schat-Harding, Norway – konstrukční a výpočtové
práce, řešení vlastního vývojového projektu testovací věže (pro-
jekt byl realizován), překladatelská činnost
1999 dvouměsíční pracovní stáž v dánské firmě REDAN. Práce
v projekčním a obchodním oddělení, překladatelská činnost
1996 měsíční stáž v rakouské firmě Tauernkraft A.G. Mayerhofen,
údržba a provoz vodních elektráren, práce v konstrukčním odd.

Brno, únor 2004