

VYUŽITÍ NÁSTROJŮ MATLAB, SIMULINK A SIMMECHANICS PŘI NÁVRHU A OPTIMALIZACI MOBILNÍCH KRÁČEJÍCÍCH ROBOTŮ

R. Grepl

Laboratoř mechatroniky a robotiky,
společné pracoviště Ústavu mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, FSI, VUT v Brně
a Ústavu termomechaniky AV ČR

Abstrakt

V tomto článku se stručně zmíníme o možnostech využití nástrojů Matlab, Simulink, SimMechanics v procesu počítačového návrhu mobilního kráčejíciho robotu. Zmíníme se o řešení těchto základních úloh modelování mechatronického systému: přímá a inverzní kinematická úloha; analýza dynamiky, modelování vlivu pohonů a jejich řízení, vizualizace stavu a pohybu systému, modelování interakce systému s prostředím, realtime řízení.

1 Úvod

Výzkum a konstrukce mobilních robotů patří dlouhodobě mezi důležité oblasti zájmu řady zahraničních univerzit, komerčních společností ale i laické veřejnosti. Na Marsu se pohybují vozidla s podvozkem smíšeného charakteru¹ a Toyota pracuje na projektu sériově vyráběného humanoidního robotu, který by měl nahradit člověka mimo jiné v oblasti pečovatelských služeb. Je možné se domnívat, že společenská potřeba inteligentních mobilních strojů schopných v některých specifikovaných úkolech zastoupit člověka bude spíše růst (vyhledávání min, servisní činnosti v nebezpečných prostředích, záchranářství). Kráčejíci robot je za určitých podmínek schopen nabídnout vyšší manévrovatelnost a prostupnost terénem než robot vybavený kolovým či pásovým podvozkem.

V prostředí výzkumu a výuky na univerzitě se objevuje další aspekt, který považujeme za důležitý. Kráčejíci mobilní robot totiž představuje značně složitý systém, při jehož návrhu, optimalizaci, simulaci apod. je nutno uplatnit multioborový přístup. Mechatronika, která bývá nejstručněji charakterizována jako synergická kombinace přesné mechaniky, elektroniky, řízení a umělé inteligence, nabízí perspektivní cestu k řešení. Základním nástrojem mechatronického přístupu je počítačové modelování. O takovéto pojetí výzkumu a výuky se také snažíme v Laboratoři mechatroniky a robotiky.

Při návrhu kráčejíciho robotu s libovolným typem a počtem noh se obecně setkáme s typickými úlohami modelování, jejichž realizace za pomoci nástrojů Matlab je v článku dále popsána. Proces počítačového modelování je demonstrován na konkrétním příkladu experimentálního čtyřnohého robotu, který vznikl jako testovací platforma pro systémy sensoriky, algoritmy chůze a navigace robotu apod. Stejně tak ovšem mohou být uvedené metody a přístupy použity při konstrukci jakéhokoli jiného interaktivního mechatronického systému.

2 Základní problémy modelování kráčejíciho robotů

Při návrhu kráčejíciho robotu s libovolným typem a počtem noh se obecně setkáme s těmito úlohami modelování:

¹Kola podvozku jsou zavěšena na nohách, takže lze nezávisle aktivně měnit jejich polohu. Další informace např. na [na stránkách NASA](#).

- přímá a inverzní kinematická úloha
- statická analýza
- analýza dynamiky robotu, případně samostatného pedového mechanismu
- modelování pohonů a jejich řízení
- vizualizace stavu a pohybu robotu
- modelování interakce robotu s prostředím
- realtime řízení reálného robotu, generování zdrojového kódu pro řídicí hardware

Každá z úloh přitom může mít různou míru složitosti, jemnosti modelu a tomu odpovídající výpočetní náročnost a také potřebnou dobu k sestavení a odladění modelu. Jako optimální se zdá cesta postupného přibližování k cílovému stavu modelu iteračním způsobem. Jako typický příklad je možno zmínit inverzní kinematiku.

Obecně není inverzní kinematická úloha řešitelná analyticky a numerický výpočet také není zcela bez problémů. Je proto vhodné, při řešení praktického zadání, nejprve sestavit kinematický model v nástroji, který tvorbu provádí automaticky na základě geometrie soustavy, např. Matlab-SimMechanics. Tento model je možno strukturálně i parametricky snadno optimalizovat, a obdržet relativně velmi rychle dostatek kvalitních výsledků na posouzení zvoleného přístupu.

Teprve po ověření vlastností modelu můžeme přistoupit k pracnému odvození analytického modelu. V případě, že řešení v uzavřeném tvaru nelze najít, vytvoříme numerický model využívajícího výpočtu jakobiánu a jeho inverze, přičemž model v SimMechanics může být použit jako referenční. Poznamenejme jen, že je vhodné, když všechny potřebné úlohy modelování je možno provést v jednom nástroji. Tato koncepce je znázorněna na obr. 1, kde je také uvedeno začlenění detailního návrhu pohonů, 3D CAD konstrukce, řízení, pevnostních výpočtů a dále komponent HiL, SiL, MiL apod.

Celý postup směřuje k přesunu co možná největšího podílu testování a ladění celého systému na počítačovou simulaci. Výsledkem je (může být) značná úspora nákladů a především času.

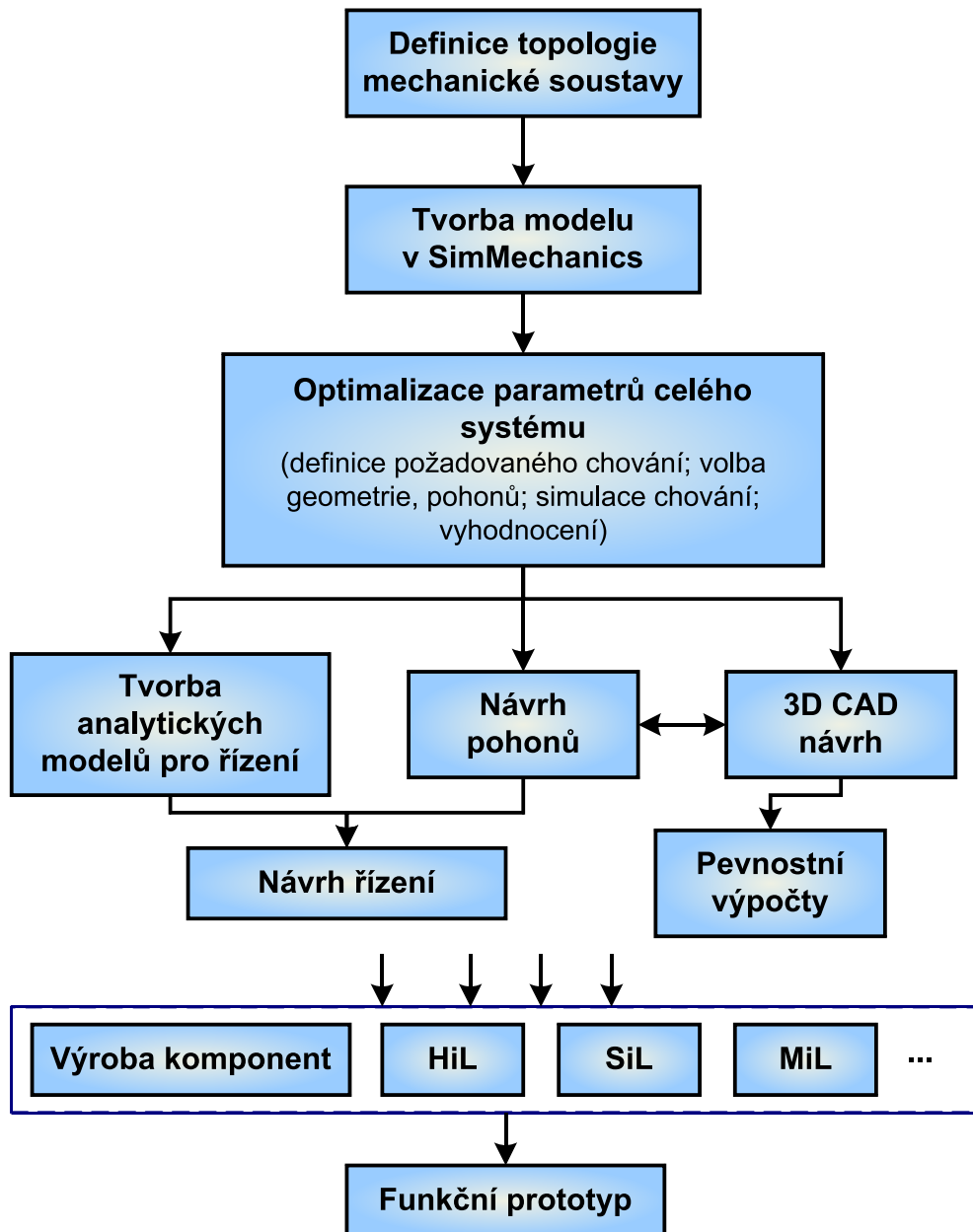
V následující části textu popíšeme náš konkrétní případ, kdy byl Matlab a jeho nástavby použit jako modelovací nástroj podporující vývoj experimentálního čtyřnohého robotu.

3 Návrh čtyřnohého robotu

3.1 Koncepce, topologie a kinematický model

Prvním krokem návrhu experimentálního kráčejícího robotu byla volba počtu noh a počtu stupňů volnosti a topologie každé z nich. Již na počátku práce se počítalo s využitím malých RC servopohonů firmy Hitec a tomu byla přizpůsobena velikost konstrukce. Toto řešení je často u podobných konstrukcí využíváno a jeho výhodou je především jednoduchost řízení servopohonů, jejich cenová dostupnost a výhodný poměr moment/hmotnost. Zvolená geometrie konstrukce je na obr. 2.

Na základě volby topologie byl v SimMechanics sestaven model robotu. Veškeré části konstrukce robotu jsou uvažovány jako tuhá tělesa propojená vazbami (MBS). Tvorba takového modelu v prostředí SimMechanics je poměrně snadná a rychlá, uvážíme-li klasické alternativy



Obrázek 1: Základní schéma návrhu mechatronického systému s využitím simulačního modelování

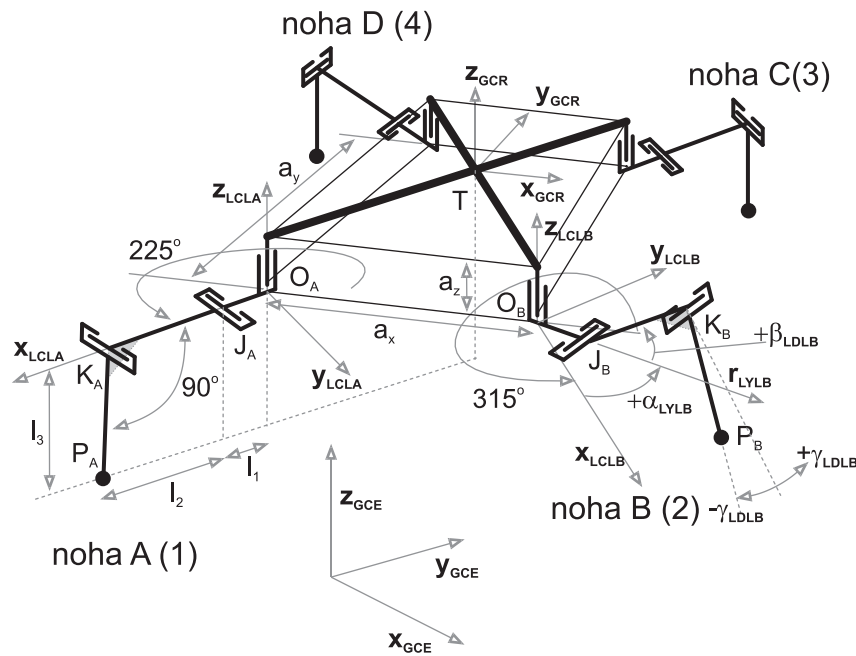
použití metod kinematiky a dynamiky (formulace kinematických modelů pomocí transformačních matic, dynamický model pomocí metody Newtona nebo Lagrange, případně kinetostatika).

Přirozeným přístupem je tvorba modelu *parametricky*², což umožňuje v dalším kroku optimalizaci.

3.2 Návrh a optimalizace parametrů systému

Dalším, a zásadním krokem práce byla optimalizace parametrů robotu. Jednalo se především o volbu rozměrů l_1 , l_2 a l_3 , dále o volbu typu servopohonu.

²Definice parametrů se provede v skriptu Matlabu.



Obrázek 2: Geometrie experimentálního čtyřnohého robotu

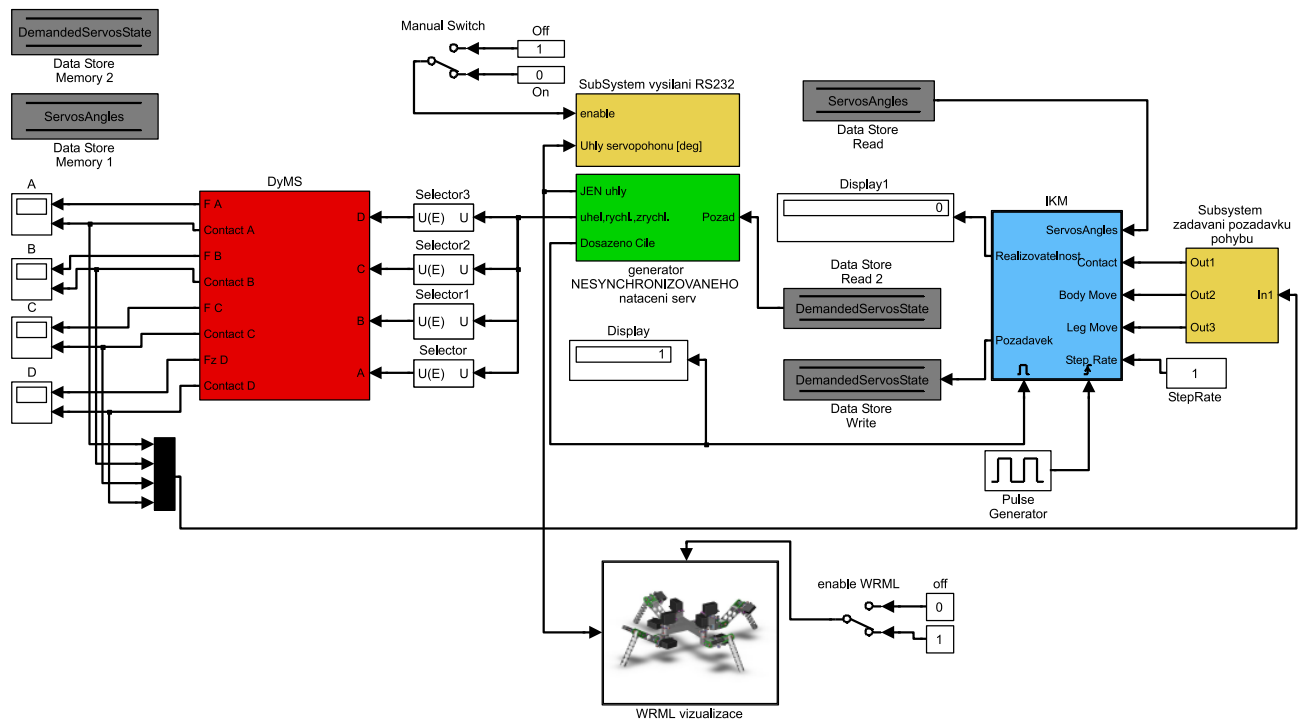
Hlavním kritériem optimalizačního procesu byla maximalizace pohybových možností robotu (rychlost, rozsah poloh noh robotu, stabilita) při zachování nízké hmotnosti a využití dostupných servopohonů³.

Optimalizace byla provedena za použití simulačního modelu, který je na obr. 3. Model obsahuje tyto základní bloky:

- Blok zadávání požadovaného pohybu robotu – zde byly zadány požadované pohyby, resp. polohy robotu.
- Inverzní kinematický model robotu – tvořen bloky SimMechanics, vychází z topologie robotu definované na obr. 2, výstupem jsou natočení jednotlivých servopohonů potřebná pro realizaci požadované polohy těla a noh robotu.
- Nesynchronní řízení servopohonů – cílem bylo testování vlastností soustavy při řízení mikrokontrolerem s významně nižším výkonem. Inverzní kinematický model se pak počítá pouze v uzlových bodech trajektorie nohy robotu, mezi nimi pak interpolujeme.
- Dynamický model robotu – tvoří jádro celého simulačního schématu, slouží k výpočtu kontaktních sil mezi nohou robotu a terénem a tím určuje stabilitu robotu. Kontakt mezi nohou robotu a terénem je modelován pomocí virtuální n-dimenzionální pružiny s tlumičem. Dále jsou výstupem z modelu síly v pohonech. Model je realizován v SimMechanics.
- Model vizualizace ve VRML – blok, který propojuje Matlab–Simulink s prostředím virtuální reality. Uživatel pak v běžném html prohlížeči⁴ sleduje chování robotu a může mnohem lépe vyhodnotit příčiny problémů při modelování. Tento blok jsme používali jednak na kontrolu definice požadovaného pohybu robotu a především v průběhu vývoje algoritmů chůze - [VRML 3D video záznam zde](#).

³Informace o dostupných servopohonech lze zjistit např. [na stránkách firmy Hitec](#).

⁴Po nainstalování příslušného plug-in, např.: [Cortona VRML Client](#) nebo [Bitmanagement Software](#)



Obrázek 3: Simulační model v prostředí Simulink/SimMechanics pro manuální řízení robotu

- Blok dálkového řízení robotu (RS232) – v pokročilejším stádiu řízení byl použit pro přímé řízení robotu – viz oddíl 3.4.

Pomocí tohoto modelu mohlo být komplexně simulováno chování robotu včetně částečného modelování algoritmů později implementovaných v řídicím mikrokontroleru.

Hlavním a zásadním výstupem z optimalizačního výpočtu však byly zvolené pohony a rozměry nohy a těla robotu.

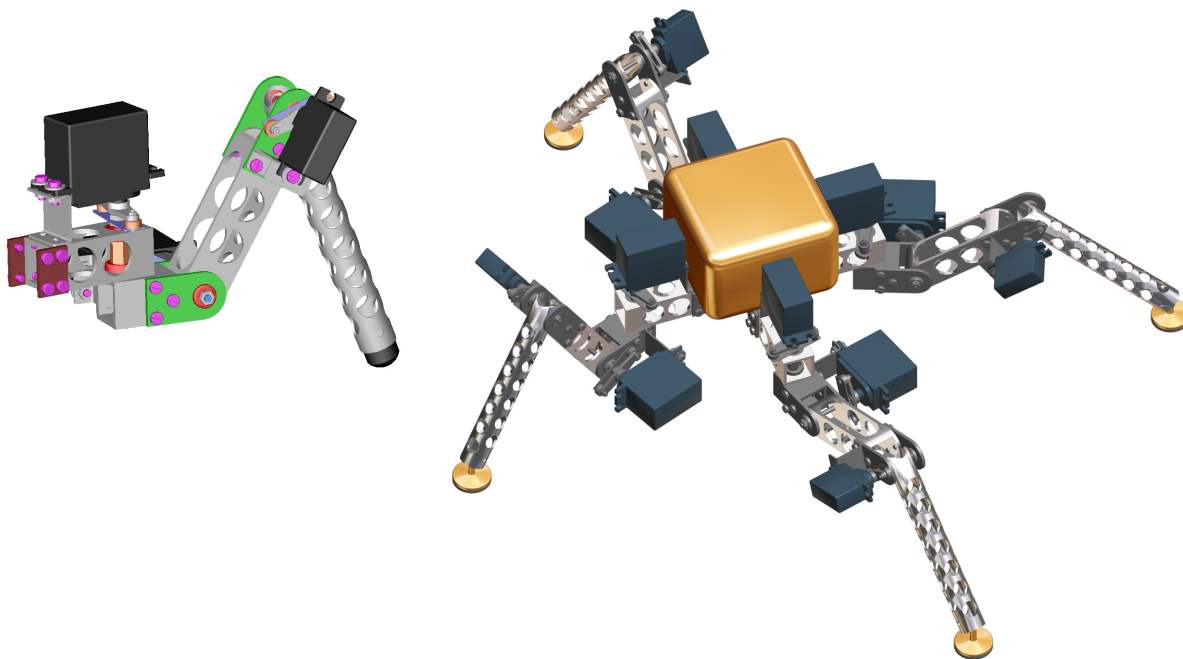
3.3 Konstrukce a realizace robotu

Na základě provedených výpočtových simulací bylo možno přikročit k návrhu konkrétní konstrukce v prostředí 3D CADu SolidWorks. Nejprve byla vytvořena konstrukce jedné nohy robotu a vyroben funkční vzorek (obr. 4). Na něm bylo provedeno několik experimentů s cílem porovnat výsledky výpočtů a teprve pak byla vytvořena a následně vyrobena celá konstrukce robotu.

3.4 Testování vlastností konstrukce, vývoj elektroniky

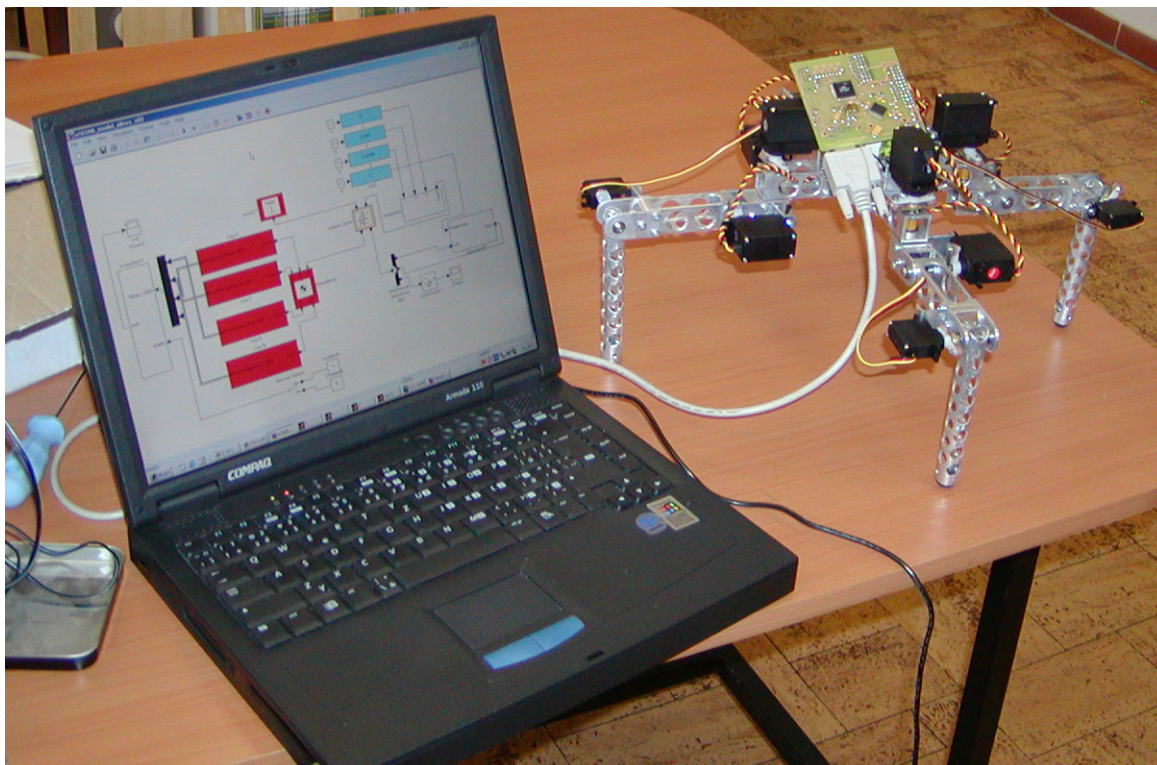
Po vyrobení mechanické části následovalo její testování. Použit byl simulační model na obr. 3, přičemž byl aktivní blok řízení přes RS232. Veškeré výpočty kinematiky a stability se tedy prováděly v Simulinku. Servopohony byly řízeny jednoduchým obvodem, který komunikuje s PC přes RS232 (obr. 5). Tímto způsobem bylo možno rychle ověřit vlastnosti mechanické konstrukce a odladit menší nedostatky (vůle v určitých kinematických uzlech apod.) bez nutnosti poměrně náročného vývoje elektroniky a programování mikrokontrolerů.

Teprve potom jsme přistoupili k vývoji řídicí elektroniky, která má podstatně širší vlast-



Obrázek 4: 3D CAD model robotu

nosti, umožňuje dálkové řízení robotu přes rádiový modul, autonomní chůzi robotu, zpracování sensorických informací a další. Řídící jednotka je postavena na několika spolupracujících mikrokontrolerech Atmel ATmega [3].



Obrázek 5: Přímé řízení robotu z prostředí Matlab/Simulink/SimMechanics přes RS232



Obrázek 6: Experimentální čtyřnohý robot

3.5 Využití kinematického modelu v SimMechanics pro trénink ANN

Mikrokontrolery použité v navržené řídicí jednotce mají poměrně malý výpočetní výkon a proto je žádoucí navrhnout co nejjednodušší algoritmy výpočtu kinematiky. Geometrie nohy robotu umožňuje sice analytické řešení inverzní kinematické úlohy, přesto však nebylo možno dosáhnout uspokojivých časů výpočtu. Jako dobrá možnost jeho urychlení se ukázala aplikace umělých neuronových sítí (ANN) jako aproximátoru. Použita byla dopředná vícevrstvá neuronová síť. Tréninková data byla získána simulací modelu v SimMechanics, k učení sítě byl použit Neural Network Toolbox. Implementace vytvořené sítě je pak snadná, detaily např. [na stránkách www.mathworks.com](http://www.mathworks.com).

4 Závěr

Výsledkem práce je funkční laboratorní experimentální model čtyřnohého robotu schopný v omezené míře autonomního chování a který je možno dálkově řídit z PC přes modul rádiové komunikace nebo BlueTooth.

Koncepce popsaná v části 2 umožnila velice rychlý postup konstrukčních prací, především díky využití rychlého návrhu kinematických, statických a dynamických modelů mechanismu robotu v prostředí Matlab/SimMechanics.

Model vytvořený v SimMechanics byl dále použit pro generování tréninkových dat pro učení umělé neuronové sítě (ANN) pro realizaci chůze po rovinném terénu, dále bylo využito propojení Simulinku a Virtual Reality Toolboxu pro vizualizaci chování robotu.

Ukázky vizualizace ve VRML a video lze nalézt na [stránkách autora](#).

Acknowledgement

Výsledky prezentované v tomto příspěvku byly dosaženy za podpory projektu AV0Z20760514.

Reference

- [1] 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
- [2] Wood, G.D.: *Simulating mechanical systems in Simulink with SimMechanics*, The MathWorks Inc., www.mathworks.com, 2002
- [3] Grepl, R., Bezdíček, M., Chmelíček, J., Švehlák, M.: *Experimental quadruped walking robot: conception, design, control*, Elektronika, 8-9/2004, ISSN 0033-2089, Polsko, 2004
- [4] Grepl, R.: *Simulation and control of mobile walking robot using complex dynamic model*, Journal Elektronika, 8-9/2004, ISSN 0033-2089, Poland, 2004
- [5] Grepl, R., Vlach, R., Ondrůšek, Č.: *Complex Dynamic Modelling of Mobile Robot*, ASME/JSME Pressure Vessels and Piping Conference 2004, San Diego, USA, z25.-29.7., ISBN 0-7918-4669-5, 2004

Robert Grepl

Laboratoř mechatroniky a robotiky, společné pracoviště Ústavu mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, FSI, VUT v Brně a Ústavu termomechaniky AV ČR

web: <http://www.umt.fme.vutbr.cz/> rgrepl/

e-mail: grepl@fme.vutbr.cz