



Národní konference s mezinárodní účastí
INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2002

13. – 16. 5. 2002, Svatka, Česká republika

KONCEPCE MECHATRONICKÉ SOUSTAVY NOHY KRÁČIVÉHO ROBOTU

Pavel Houška¹, Tomáš Březina², Vladislav Singule³

Abstract: The contribution is focused on design of multi-legged robot leg as an autonomous system. Leg is composed of the leg mechanism, 3 leg drives, sensor and control system. The paper deals with the influence of mechanical design and particular sensors positions on leg control.

Keywords: mechatronics, walking robots, pantographic leg , control system

1 Úvod

Robot je zařízení, jehož účelem je ulehčit lidem práci a nahradit je v prostředích, která jsou pro ně nebezpečná. V současnosti nejvíce rozvinutou kategorií lokomočních robotů jsou kolové roboty. Tato kategorie mobilních robotů se vyznačuje závažnými omezení pro pohyb v neregulárním terénu. Nejlepší příklad problematického terénu je schodiště. Pohyb kolového robotu po schodech je velmi obtížný (robot musí mít několikanásobně větší průměr kola než je výška schodů), ne-li nemožný. Částečné zmírnění tohoto omezení lze dosáhnout použitím pásových podvozků. Z hlediska dosažitelné mobility je však nejlepším řešením použití kráčivých robotů.

Mezi výhody mobilních kráčivých robotů patří kromě podstatně snazšího překonávání terénních nerovností i velká manévrovatelnost, dosahovaná vysokým počtem stupňů volnosti pohybového mechanismu. Přes těchto několik podstatných výhod, mají kráčivé roboty velké množství omezení a nevýhod. Mezi nevýhody patří hlavně podstatně složitější mechanická konstrukce pohybového ústrojí robotu, velké množství pohybujících se součástí, vysoká náročnost na výkon jednotlivých pohonů a s ní spojená nízká účinnost robotu jako celku. Další problém, který je spojen s kráčivými roboty, jsou vysoké nároky na řízení. Každá noha robotu má obvykle tři (výjimečně jen dva) stupně volnosti. Úkolem řízení je tudíž kromě řízení pohybu v jednotlivých osách (které odpovídají jednotlivým stupňům volnosti) i zajištění vzájemné synchronizace těchto pohybů.

Vysoký počet stupňů volnosti pohybového ústrojí kráčivých robotů poskytuje širokou škálu variant při volbě počtu a tvaru noh robotu. Na základě zvoleného počtu noh a počtu stupňů volnosti každé nohy lze navrhnout i velké množství variant způsobů řízení samostatných noh a následně několikanásobně větší počet strategií řízení chůze robotu. Kráčivá chůze dále poskytuje mnoho způsobů řešení nestandardních situací, jako je například porucha jedné či více noh, a následně velmi zajímavé úlohy řešící chování částečně poškozeného robotu. Kráčivé roboty tudíž představují vynikající platformu pro zkoumání různých inteligentních způsobů řízení využívajících fuzzy množin, neuronových sítí, genetických algoritmů, opakovaně posilovaného učení a jiných.

¹ Pavel Houška, Ing., ÚMT FSI VUT Brno, Technická 2, 616 69 Brno, ČR,
e-mail: houska@umt.fme.vutbr.cz

² Tomáš Březina, Ing. RNDr. CSc., ÚAI FSI VUT Brno, Technická 2, 616 69 Brno, ČR,
e-mail: brezina@uai.fme.vutbr.cz

³ Vladislav Singule, Doc. Ing. CSc., ÚVSSaR FSI VUT Brno, Technická 2, 616 69 Brno, ČR
e-mail: singule@zam.fme.vutbr.cz

Na základě předešlých úvah byl v Centru mechatroniky při ústavu ÚMT FSI VUT Brno zřízen projekt čtyřnohého kráčivého robotu jako platforma pro ověřování metod umělé inteligence pro řízení mechatronických soustav. Projekt byl nazván **Kráčmera I.**

2 Základní charakteristika projektu kráčivého robotu

Jako základní cíle projektu byly stanoveny:

- vysoká manévrovatelnost
- schopnost zachování funkčnosti robotu při poruše.

Na základě vytyčených požadavků byly zvoleny parametry podle tab. 1

Tab. 1: Parametry kráčivého robotu

počet noh	4
počet stupňů volnosti každé nohy	3

Řízení robotu bylo dekomponováno na úrovně, uvedené v tab. 2(v pořadí od nejnižší po nejvyšší).

Tab. 2: Úrovně řízení robotu

název úlohy	počet instancí
řízení pohonů jednotlivých stupňů volnosti každé nohy	12x
lokální řízení polohy každé nohy	4x
řízení polohy celého robotu – koordinace pohybu všech noh vůči těžišti	1x
řízení stability robotu	1x
řízení pohybu robotu v pracovním prostředí – navigační úloha	1x

V tabulce je rovněž uveden počet instancí jednotlivých úrovní robotu. U robotu se přísně dodržuje hierarchie jednotlivých úrovní. Dodržování spočívá v tom, že vyšší úroveň řídí pouze bezprostředně nižší úroveň bez ovlivňování ostatních. Vychází se z toho, že každá úroveň má přesně stanovené úkoly, které provádí na základě požadavků úrovně bezprostředně vyšší. Bezprostředně vyšší úroveň je pak následně na dotaz zpravena o úspěšnosti a kvalitě splnění zadaných podmínek.

3 Noha kráčivého robotu v systémovém pojetí

Noha jako mechatronický systém je tvořena mechanickou a elektrickou soustavou, soustavou řízení (informační soustava) a vzájemnými interakcemi mezi nimi.

3.1 Elektromechanická soustava

Mechanická část nohy se skládá ze čtyřčlenného mechanismu, vertikálního a horizontálního vedení nohy, horizontální a vertikální pohonné jednotky, základny a pohonné jednotky natáčení nohy okolo vertikální osy.

Tvar nohy a funkce jednotlivých jejích částí je zřejmá z jejího 3-d modelu, který je uveden na obr.1. Jedná se o prototyp. Vertikální a horizontální lineární pohyb zajišťují pohybové šrouby, rotační pohyb natáčení nohy robotu zajišťuje šnekový převod.

Čtyřčlenný mechanismus pro konstrukci nohy byl zvolen na základě studia materiálů, zabývajících se konstrukcí a řízením kráčivých robotů. Mechanismus je výhodný jak po stránce mechanické, tak i po stránce řízení. Zvolený tvar mechanismu má rovněž výhodu v jednoduchém inverzním modelu, který je nezbytný pro řízení pohybu nohy.

Požadavky na pohyb nohy robotu při jeho dané hmotnosti jsou uvedeny v tab. 3.

Tab.: 3: Požadavky na pohyb nohy

minimální zdvih nohy robotu	200mm
rychlost pohybu robotu	5km·h ⁻¹
hmotnost robotu	40kg

Rozměry se konstrukce jsou určeny požadavkem, aby byl robot schopen pohybu po schodech, tj. požadovaný minimální zdvih nohy musí být cca.200mm. Z rozměrů nohy byly předběžně vypočítány zátěžné síly a momenty. Následovala volba způsob převodu rotačního pohybu na posuvný. Byl vybrán převod pomocí pohybového šroubu. Dalším požadavkem na robota je, aby



Obr. 1: 3-D model nohy robotu

poměru 1:14,5 a inkrementální rotační čidlo polohy typu HEDS 5511. Dále je každý pohon vybaven jednostupňovým převodem, který přenáší rotační pohyb na pohybový šroub. Pro přeměnu rotačního pohybu na translační byl použit pohybový šroub, který posouvá kamenem ve vedení. Kamenem prochází čep, ke kterému je otočně připojeno táhlo čtyřčlenného mechanismu. Výhodou sestavy MAXON je velmi dobrý měrný výkon a vynikající dynamické vlastnosti, nevýhodou je poměrně vysoká cena.

Jako pohon pro natáčení nohy, kde nejsou kladeny tak vysoké nároky na velikost a hmotnost pohonu, byl vybrán stejnosměrný motor BAUTZ s permanentními magnety a výkonem 100W při 2000 min⁻¹. Kroutící moment motoru je na nohu přenášen šnekovým převodem. Šnekové kolo je zároveň i čepem pro otáčení nohy. Dále je motor vybaven dvoukanalovým inkrementálním rotačním čidlem polohy.

Uvedená konstrukce nohy slouží k ověření funkčnosti zvoleného přístupu. Po praktických testech použitelnosti a výpočtové optimalizaci tvaru nohy budou vyrobeny zbývající tři nohy.

rychlost jeho pohybu byla rovna alespoň rychlosti pohybu dospělého člověka, tj. : 5km·h⁻¹. Následně byl určen výkon pohonů jednotlivých os, který je přibližně 60 až 100W pro každou. Při výběru pohonů bylo nutno řešit kompromis mezi požadavky na výkon, rozměry a cenu při daném nízkém napájecím napětí. Optimálnímu řešení brání fakt, že většina výrobců má v rozmezí 50 až 250W velmi omezený (většina žádný) sortiment. Z dosažitelného sortimentu byly zvoleny následující pohonné jednotky.

Pro vertikální a horizontální pohon byla zvolena pohonná sestava firmy MAXON. Sestavu tvoří stejnosměrný motor MAXON RE36 s permanentními magnety a výkonem 75W při 5000 min⁻¹, planetová převodovka MAXON GP32C o převodovém

3.2 Elektrická soustava

Elektrická soustava je tvořena systémem napájení pohonných jednotek, soustavu snímačů a mikroprocesorovou soustavu.

Soustava napájení pohonných jednotek tvoří čtyřkvadrantové PWM měniče postavené na bázi integrovaného obvodu L6203 firmy SGS-THOMSON. Měnič je schopen pracovat při napětí 5 až 48V, s proudem maximálně 4A. Uvedený pracovní rozsah je dán použitým obvodem L6203, který obsahuje vnitřní tepelnou ochranu, která chrání obvod před přehřátím odpojením napájení silové části obvodu.

Soustavu snímačů tvoří IRC snímač a snímač proudu a snímač napětí každého motoru. Dále je použito taktilní čidlo pro identifikaci došlapu nohy. Krajní polohy jednotlivých pohonů budou určovány z velikosti proudu protékajícího motorem. Taktilní čidlo bude dále poskytovat informaci o síle, kterou působí noha na terén.

Mikroprocesorová soustava je tvořena mikroprocesorovým modulem TOS-CPU-3.0 firmy UNIS, spol s r.o., Brno. Modul tvoří 16-bitový procesor Toshiba TMP96C141AF, paměť typu FLASH AM29F400 o velikosti 512KB, paměť typu SDRAM UM62256 o velikosti 32 KB, dva sériové kanály(UART) a čtyři A/D převodníky.

Elektrická soustava byla navržena obdobně, jako elektrická soustava autonomního lokomočního robotu OMR-III. Oproti ní je návrh rozšířen o měření proudů, které odebírají jednotlivé motory, měření napájecího napětí motorů, jsou použity tříkanálové IRC snímače typu HEDS 5511 a taktilní snímač „došlapu“ nohy.

Ve snaze o minimalizaci mechanických snímačů, které jsou náchylné k poruchám, bylo rozhodnuto o zjišťování krajních poloh mechanismů použitím proudové zpětné vazby s inteligentním vyhodnocováním vzniklých stavů. Vhodnost zvoleného přístupu bude prakticky ověřena.

Zatěžovací spektrum jednotlivých pohonů je velmi úzce spjato se zvolenou strategií chůze robotu. Proto bylo rozhodnuto o zavedení ochrany motoru před tepelným přetížením. Ochrana je založena na principu měření příkonu motoru, který za zvolenou časovou jednotku nesmí překročit určenou maximální hodnotu. Maximální hodnota je stanovena dle zátěžné křivky motoru.

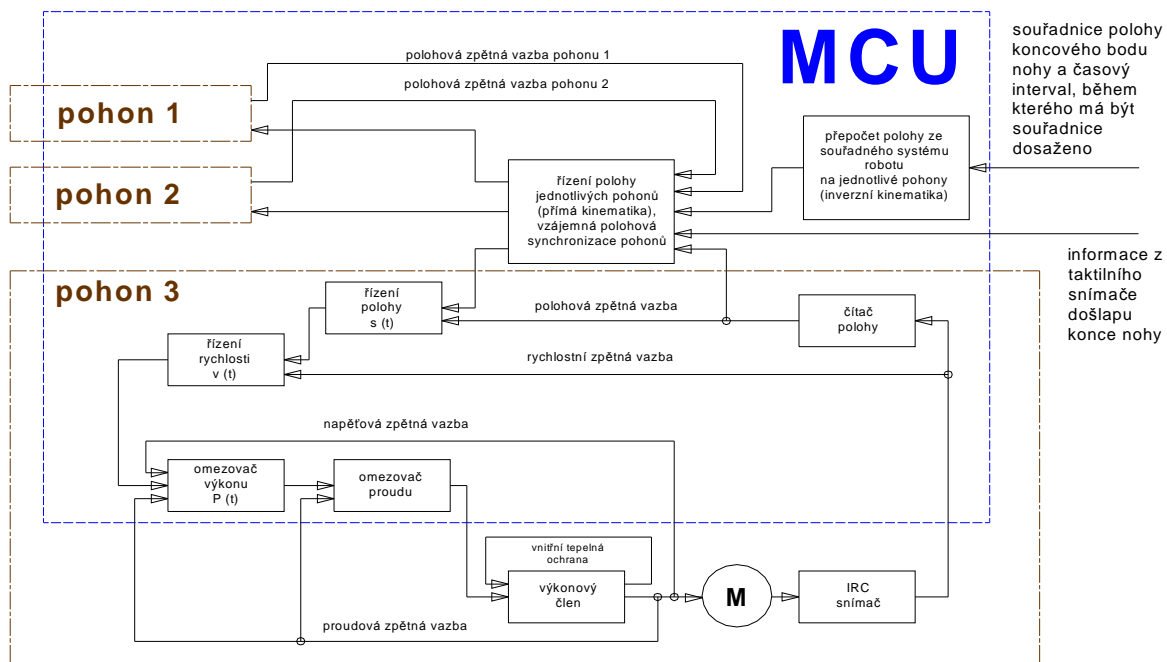
Pro „došlap“ nohy je určeno taktilní čidlo, které poskytuje informaci o síle, kterou působí noha na terén. Rozlišujeme stav, kdy je noha zdvižena (síla je ~ 0 N), noha je v kontaktu s podložkou (síla je v rozmezí $0 < \text{síla} < \text{minimální síla došlapu}$), noha pevně stojí na podložce (síla $\geq \text{minimální síla došlapu}$). Minimální síla došlapu odpovídá síle, kterou způsobuje 1/4 hmotnosti robotu.

3.3 Řídící systém nohy

Řízení nohy je hierarchicky rozloženo podle obr. 2. Na nejvyšší úrovni hierarchie je jednotka přepočtu souřadnic polohy koncového bodu nohy. Jednotka získává souřadnice poloh nohy od nadřazené jednotky řízení chůze robotu. Získané souřadnice jsou v lokálním souřadném systému robotu $[x_l, y_l, z_l]$, jehož počátek je umístěn do osy otáčení nohy. Souřadnice lokálního systému nohy jsou přepočítány do každé samostatné řízené osy $[x_s, y_s, z_s]$ s využitím aparátu inverzní kinematiky. Jednotka musí u vypočítaných souřadnic určit, zda zadaný bod leží uvnitř pracovního prostoru nohy nebo ne. V případě, že se bod nenachází v pracovním prostoru nohy, je požadavek vyhodnocen jako neplatný a jednotka musí určit souřadnice nového bodu, který je nejbližší k předchozímu požadavku.

Souřadnice $[x_s, y_s, z_s]$ jsou předány jednotce kontroly dosažené polohy a vzájemné synchronizace pohonů. Pro kontrolu polohy a synchronizaci pohonů se využívá polohové zpětné vazby každého

pohonu. Souřadnice $[x_s, y_s, z_s]$ jsou jednotkou převedeny na požadované souřadnice v čase a dále distribuovány jednotlivým pohonům $[x_{pd}]$, $[y_{pd}]$, $[z_{pd}]$.



Obr 2: Blokové schéma hierarchie řízení nohy

Každý pohon se z pohledu úrovní řízení chová jako samostatný blok, jehož vstupem je požadovaná poloha a výstupem je údaj dosažené polohy získaný z IRC.

Vnitřní struktura bloku pohonu tvoří hierarchii, která je zřejmá rovněž z obr.2. Jsou řešeny následující úlohy:

- řízení polohy s polohovou zpětnou vazbou
- řízení rychlosti pohybu s rychlostní zpětnou vazbou
- výkonový omezovač s proudovou a napěťovou zpětnou vazbou
- proudový omezovač s proudovou zpětnou vazbou

Proudový omezovač slouží jako ochrana výkonové části před přetížením a jeho hlavním úkolem je omezení proudu na maximální přípustnou hodnotu při akceleraci a brždění protiproudem motoru. Výkonový omezovač poskytuje ochranu proti přehřátí motoru při dlouhodobějším přetížení.

Pro jednotlivé řídicí úlohy bude postupně ověřováno několik řídicích strategií od PID regulátoru až po robustní řízení založené na bázi opakovaně posilovaného učení. Hlavním hodnotícím kritériem bude chování při nestandardních a krizových stavech robotu. Záměrem projektu je vytvoření strategie, která bude nestandardní či krizový stav stabilizovat tak, aby noha zůstala alespoň z části funkční.

4 Závěr

Při řešení projektu se vychází ze zkušeností z řešení projektu kolového autonomního mobilního robotu OMR-III, který byl z části řešen v téže laboratoři. Popisované řešení nohy slouží k zhotovení, oživení a testování funkčnosti prototypu nohy včetně řízení. Po praktických zkouškách bude zhodnocena zvolená koncepce a bude rozhodnuto o úpravách a následně pak o konstrukci a stavbě celého robotu. Během ověřování prototypu bude především kladen důraz na rozměrovou optimalizaci nohy, na vyhodnocení úplnosti informací sensorické soustavy nohy a funkčnosti řídicího systému nohy.

Poděkování

Výzkumné a vývojové práce na kráčivém robotu probíhají za podpory pilotního projektu ÚT AV ČR číslo 52020 "Řízení kráčivého robotu s využitím metod umělé inteligence".

Použitá literatura

- [1] MacDonald, W.S.: Design and implementation of a multilegged walking robot, [A senior honors thesis] UMASS, USA 1994
- [2] Skalický, J.: Elektrické servopohony, FEI VUT v Brně, Brno 2001, druhé vydání
- [3] Houška P.: Návrh architektury řídicího systému mobilního robotu OMR III, [Diplomová práce], ÚMT FSI VUT v Brně, Brno 1999
- [4] Manko, D.J.: A general model of legged locomotion on natural terrain, Kluwer Academic Publisher, USA 1992
- [5] Coelho, J.A.JR.: Multifingered grasping: Grasp reflexes and control context, [dissertation], UMASS, USA 2001