

THE USE OF LEG LANDING INFORMATION FOR WALKING ROBOT CONTROL

P. Houška¹, Z. Ehrenberger², T. Březina³, V. Singule⁴

Summary: *The leg design is described in the contribution. Some possibilities of leg control and requirements related to both sensor system of the leg and complete robot are assigned. The assessment of the force, coming from sensor system, by which the endpoint of the leg acts on the terrain is considerably important. The information about leg landing is necessary for robot control in non-regular terrain. If the landing sensor provides information about magnitude and orientation of landing force, the algorithm of obstacles avoidance could be efficiently implemented based partially on this information.*

1 Úvod

Robot je zařízení, jehož účelem je ulehčit lidem práci a nahradit je v prostředích, která jsou pro ně nebezpečná nebo nedostupná. V současnosti nejvíce rozvinutou kategorií lokomočních robotů jsou kolové roboty. Tato kategorie mobilních robotů se ale vyznačuje závažnými omezení pro pohyb v neregulárním terénu. Příkladem problematického terénu může být schodiště. Pohyb kolového robotu po schodech je velmi obtížný (robot musí mít několikanásobně větší průměr kola než je výška schodů), ne-li nemožný. Částečného 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, umožňovaná vysokým počtem stupňů volnosti pohybového mechanismu. Přes tyto podstatné výhody, mají kráčivé roboty i 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. Dalším problémem, 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.

¹ Pavel Houška, Ing., VUT v Brně, FSI ÚMT, Technická 2, 61669 Brno, ČR,
e-mail: houska@umt.fme.vutbr.cz

² Zdeněk Ehrenberger, Prof., Ing., DrSc., Centrum pro mechatroniku, IT AV ČR, Technická 2, 61669 Brno,
e-mail: ehrenberger@uvssr.fme.vutbr.cz

³ Tomáš Březina, RNDr., Ing., CSc., VUT v Brně, FSI ÚAI, Technická 2, 61669 Brno, ČR
e-mail: brezina@uai.fme.vutbr.cz

⁴ Vladislav Singule, Doc., Ing., CSc., ÚVSSaR FSI VUT Brno, Technická 2, 616 69 Brno, ČR
e-mail: singule@zam.fme.vutbr.cz

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. 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.

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

Nohu tvoří její vlastní mechanická konstrukce, tři pohonné jednotky, antikolizní senzorická soustava a hlavní řídicí jednotka nohy, tvořená řídicím mikrokontrolérem. Pro mikrokontrolér bude dále používána mezinárodní zkratka MCU (microcontroller unit). Mechanická konstrukce nohy je podrobně popsána v [1]. Fotografie nohy upevněné ke zkušebnímu přípravku je na obr. 1.



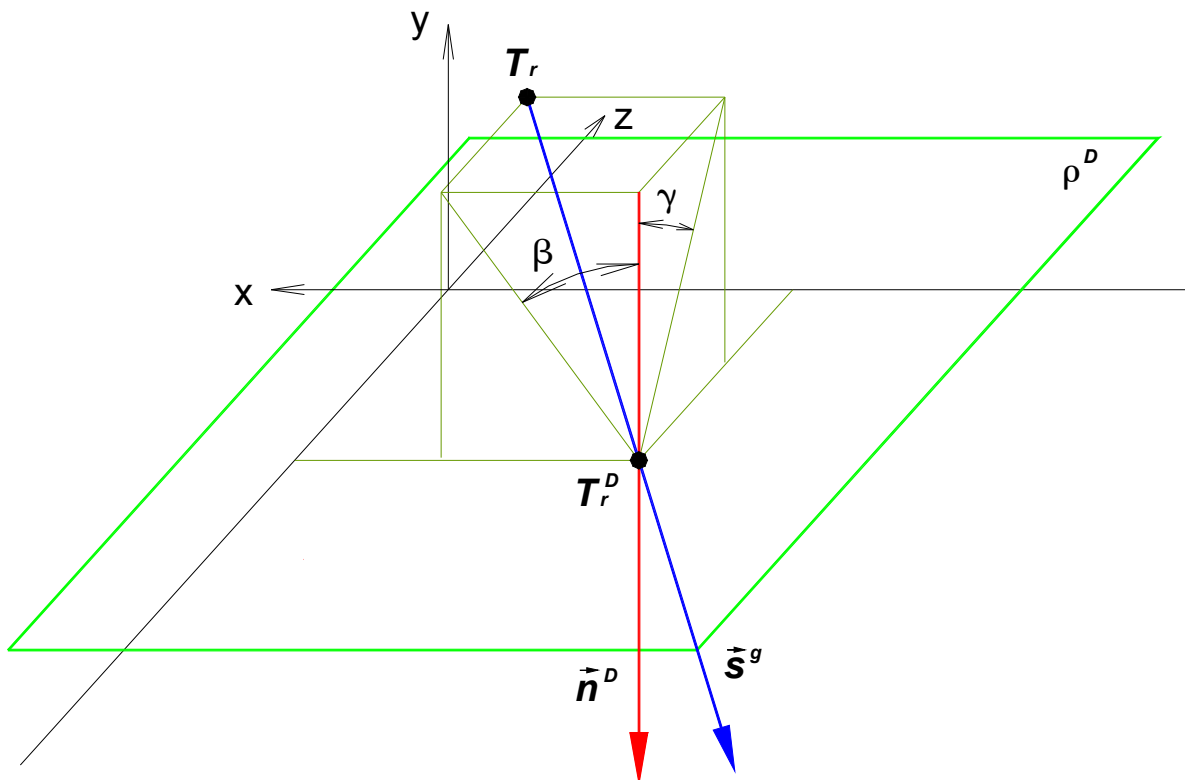
Obr. 1.: Fotografie nohy upevněné ke zkušebnímu přípravku.

2 Senzorická soustava robotu

2.1 Požadavky na senzorickou soustavu robotu nižších úrovní řízení

2.1.1 Stabilita robotu

Pro stabilitu robotu je nejdůležitější znalost relativní polohy těžiště celého robotu $T_r = [x_{tr} \ y_{tr} \ z_{tr}]^T$ (dále jen těžiště robotu), viz. obr. 2. Koncové body noh robotu, dotýkající se terénu, tvoří „rovinu došlapu“. V případě čtyřnohého robotu jsou možné pouze dva stabilní případy – dotek čtyř nebo tří noh. V obou případech tyto body vytyčují vrcholy čtyř/trojúhelníku, uvnitř kterého musí ležet průmět průsečíku rovnoběžky s gravitačním zrychlením, procházející těžištěm robotu $T_r^D = [x_{tr}^D \ y_{tr}^D \ z_{tr}^D]^T$, aby byla zajištěna statická stabilita robotu. Rovnoběžku s gravitačním zrychlením označíme \vec{s}^g , normálu roviny došlapu označíme \vec{n}^D a úhel odklonu $\varphi_{odkl} = [0 \ \beta \ \gamma]^T$.



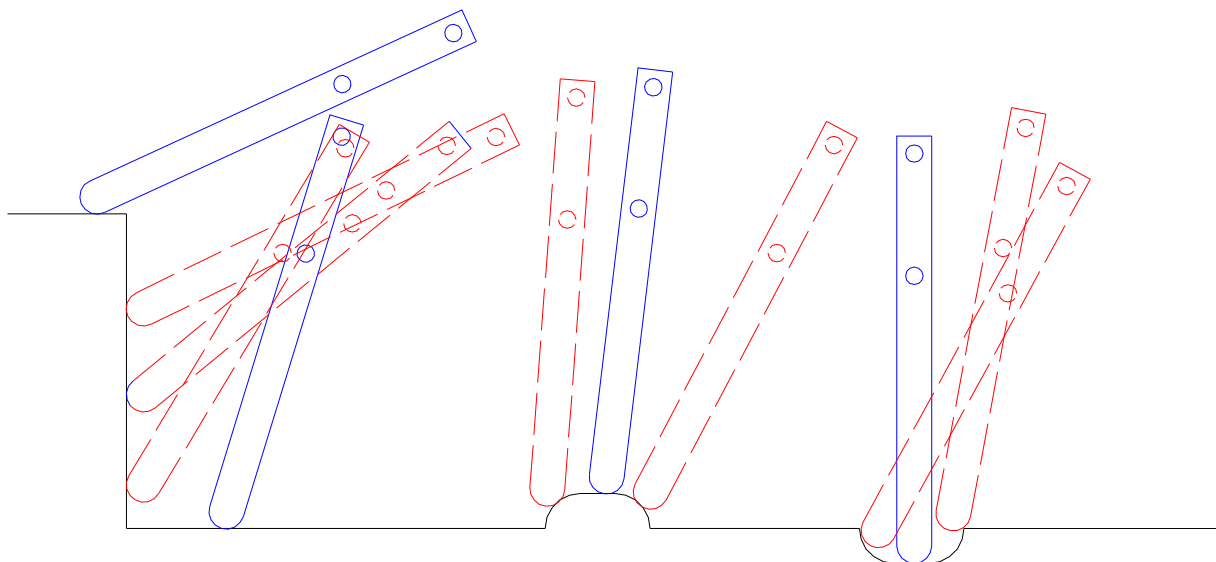
Obr. 2.: Průmět těžiště do roviny došlapu

V případě pohybu po vodorovném regulárním terénu, kdy je $\beta = 0$, $\gamma = 0$ a tudíž je $T_r = T_r^D$, lze relativní polohu těžiště robotu T_r^D určit jednoduchým geometrickým výpočtem s využitím znalostí relativních poloh noh vůči základně robotu a jejich geometrie. Při pohybu v neregulárním terénu, kde se úhly β nebo γ mění, je nutno tyto úhly měřit.

2.1.2 Stav konce nohy

Jako další bezprostředně nutná informace je tzv. „došlap konce nohy“, nebo-li informace o kontaktu nohy s terénem. V případě pohybu po vodorovném regulárním terénu je dostačující

informace o tom, že k došlapu došlo, ale pro neregulární terén je tato informace nedostačující – viz. obr. 3. Na obrázku jsou zakresleny plnou čarou stabilní polohy nohy a čárkovaně nestabilní polohy nohy při došlapu.



Obr. 3.: došlap nohy v neregulárním terénu

Příčiny nestabilních poloh jsou hlavně tyto:

- došlap na hranu terénní nerovnosti – labilní poloha,
- opření nohy o terénní nerovnost či překážku,
- došlap na terén s nedostatečnou soudržností (písek, bláto, štěrk, oranice..).

Aby řízení pohybu robotu a řízení jednotlivých noh robotu mohlo vyhodnocovat nastalou situaci a předcházet tak možným nestabilním stavům robotu, potřebuje kromě informace o tom, že k došlapu došlo, také velikost a směr síly došlapu (vektor síly došlapu) \vec{F}_D . Řízení pak musí obsahovat strategii zpracování vektoru síly a musí být schopno na základě získaných informací měnit polohu koncového bodu nohy při došlapu.

2.1.3 Informace o překážce

Další důležitá informace, kterou musí mít robot k dispozici, je detekce překážek. Kvalita informace o překážce musí být taková, aby robot byl schopen rozhodnout o překonání nebo obejití překážky. Rozhodující parametry pro snímání překážek jsou jejich velikost, vizuální a tvarová odlišnost překážky od terénu.

2.2 Volba snímačů

Pro měření úhlů odklonu $\varphi_{odkl} = [0 \quad \beta \quad \gamma]^T$ se standardně používají různé typy gyroskopů, pro projekt probíhá návrh snímače.

Snímáním velkých překážek (pro náš případ překážek větších než $\sim 100mm$) je záležitostí převážně scénových snímačů, které jsou umístěny na úrovni navigační soustavy robotu. Zpracování informací o takovýchto překážkách je záležitostí navigačního systému, který je zhodnotí a rozhodne o jejich obejití nebo překročení (dovolí-li to jejich velikost). Problém

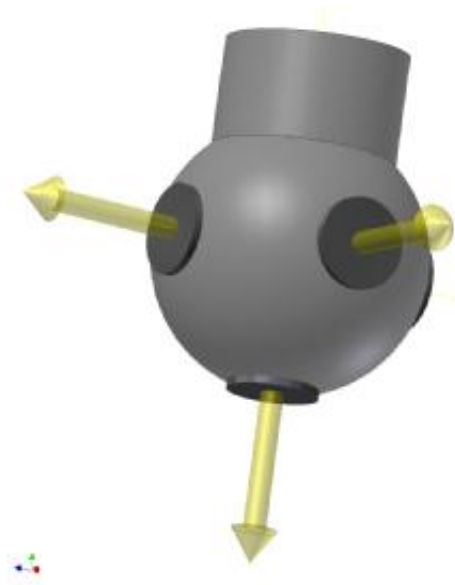
nastává se snímáním překážek, jež jsou pro svoji velikost, barvu nebo tvar „přehlédnuty“ scénovými snímači.

Malé přehlédnuté překážky lze detekovat použitím upravených scénových snímačů (kamery, ultrazvuk, laser). Takto lze ale detekovat pouze překážky které jsou viditelné pro použitý snímač, ale stále zůstávají nedetekovány překážky typu písek, bláto, oranice, u kterých lze stabilní došlap vyhodnotit pouze z velikosti síly, kterou působí noha na terén. Žádný ze scénových snímačů nedokáže určit, zda-li zvolená oblast v sypaném terénu unese potřebnou zátěž nebo ne.

Podobný problém se snímáním malých oblastí se řeší u koncových efektorů robotů při uchopování předmětů [3, 4]. Tyto úlohy řeší problém jak a jakou silou uchopit uchopovaný předmět. Několikaleté výzkumy v této oblasti jednoznačně ukazují nevhodnost použití scénových senzorů pro získání informací použitelných pro vhodné uchopení předmětu. Místo nich byly vyvinuty taktilní snímače na maticovém [3,4,5] nebo membránovém [6] principu. Základním stavebním prvkem těchto taktilních snímačů je elektricky vodivá pryž, která v závislosti na stlačení mění svůj elektrický odpor nebo elektrickou kapacitu. Základní parametry těchto snímačů jsou nelinearita a vlastní šum >1% měřicího rozsahu, rychlost měření je závislá na rychlosti použitého A/D převodníku. Jako nevýhoda se jeví možnost poškození snímače při velkém zatížení měřicím proudem. Poškození se nechá zabránit konstrukcí snímače tak, aby nemohlo dojít k úplnému stlačení vodivé pryže.

Na základě výše uvedených poznatků byla zvolena koncepce taktilního snímače došlapu. Vhodným použitím taktilního snímače došlapu lze kromě rozhodnutí o došlapu snížit velikost výchylek úhlů odklonu φ_{odkl} .

2.3 Taktilní snímač došlapu



Obr. 4.: Hlavice snímače došlapu

Prototyp snímače tvoří 5 kotoučů odporové pryže (snímacích ploch), umístěných v elektricky nevodivé hlavici - obr. 4. Tato hlavička je pak umístěna v elektricky nevodivém obale, který se dotýká pouze snímacích ploch (obal pro přehlednost není na obrázku zobrazen). Obal hlavičky přenáší zatížení od terénu přes snímací plochy na nohu robotu.

Kuželové šipky v obr. 4. naznačují směr jednotlivých os a ve válcové části hlavičky je umístěn závit pro připojení ke konci nohy.

Měření odporu jednotlivých pryžových kotoučů je prováděno 12-bitovými převodníky MCU ADuC814.

MCU ADuC814 [2] obsahuje 6-kanálový multiplexovaný A/D převodník, který je schopný provést až 247000 převodů za sekundu. Změřené

údaje ze snímacích ploch se nejdříve statisticky předzpracují kvůli eliminaci nepřesnosti měření a šumu. Předzpracovaná data se poté přepočítají tak, aby výsledkem výpočtu byl vektor působící síly při došlapu \vec{F}_D . Naměřený vektor síly je předán řízení polohy nohy, který vyhodnotí stav došlapu.

Nejednodušší rozlišení stavu došlapu je: noha je zdvižena (velikost síly je ~ 0 N); noha je v kontaktu s terénem (velikost síly je v rozmezí $0 < \text{velikost síly} < \text{minimální velikost síly došlapu}$); noha pevně stojí na podložce (velikost síly $\geq \text{velikost minimální síly došlapu}$). Minimální velikost síly došlapu odpovídá velikost síly, kterou způsobuje 1/4 hmotnosti robotu. Velikost minimální síly došlapu je značně závislá na zvoleném stylu a řízení chůze. Při statickém způsobu řízení chůze může minimální síla představovat až 1/3 hmotnosti robotu.

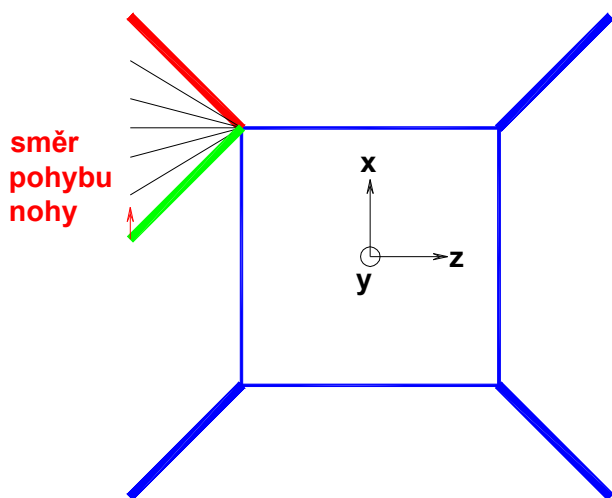
Jako materiál snímacích ploch byla vybrán materiál CS57-7RSC firmy Yokohama Rubber [7]. Tento materiál má hyperbolicky klesající charakteristiku síla-odpor a nízkou hysterezi. Velmi nepříjemnou vlastností tohoto materiálu je časová závislost charakteristiky síla-odpor, kdy odpor materiálu s časem klesá. Pokles odporu v čase lze vyjádřit jako funkci síly a času $R = f(F, t)$. Pro přepočítání je potřeba nalézt inverzní funkci pro výpočet zatěžovací síly. $F = f^{-1}(R, t)$. Proto budou provedena experimentální měření vzorků při různých rychlostech zatěžování materiálu za účelem identifikace obou funkcí. Dalším cílem experimentu bude ověření velikosti hystereze a teplotní závislosti. Časová funkční závislost a hystereze komplikují kalibraci celého snímače.

Žádná z uvedených prací [3,4,5,6], neřeší problém teplotní závislosti použitého materiálu a problém změny parametrů materiálu v závislosti na jeho stáří a používání. V uvedených pracích je řešen pouze problém hystereze materiálu.

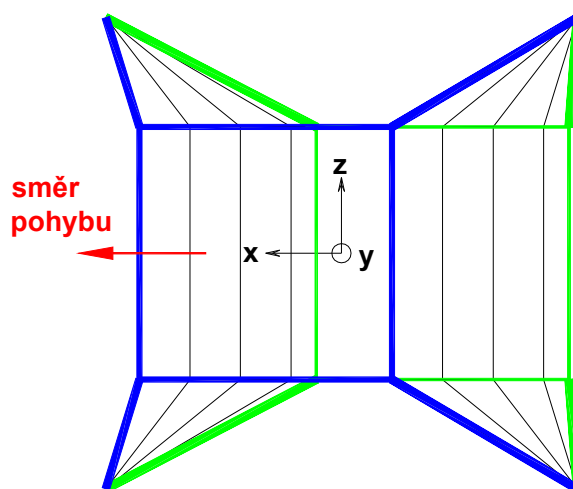
3 Hlavní řídicí jednotka nohy

3.1 Pohyb robotu a souřadné systémy

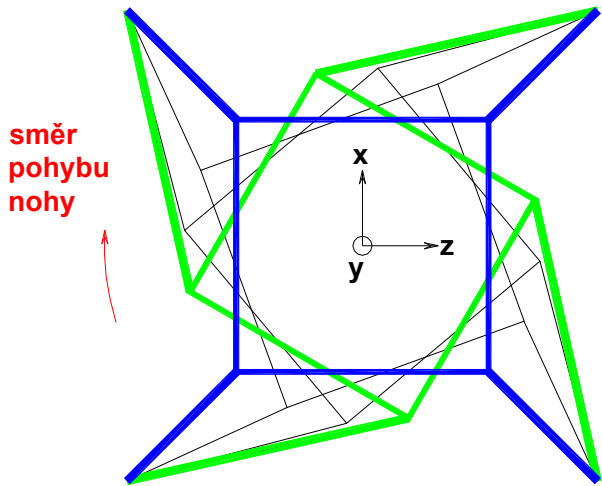
Před vlastním popisem řízení nohy robotu je potřeba vymezit požadavky na pohyb robotu. Možné pohyby robotu jsou odvozeny ze tří základních variant pohybu. První varianta (obr. 5) předpokládá pohyb jedné nohy nad terénem. Noha se pohybuje nad terénem po optimální dráze do cílového bodu. Po celou dobu pohybu se koncový bod nesmí dotýkat terénu. Druhá varianta (obr. 6) představuje pohyb základny robotu (těla), s tím že koncové body noh setrvávají na stejném místě a dotýkají se terénu. Třetí varianta (obr. 7) představuje stav, kdy podobně jako u druhé varianty koncové body noh stojí na místě a tělo robotu se otáčí kolem středu základny. Další možné pohyby jsou kombinace těchto tří základních pohybů nebo mají podobnou podstatu z pohledu řízení. Druhá a třetí varianta jsou z pohledu řízení identické.



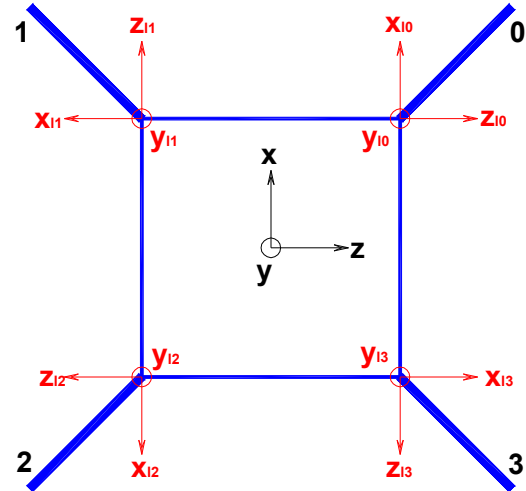
Obr. 5.: První varianta pohybu robotu



Obr. 6.: Druhá varianta pohybu robotu



Obr. 7.: Třetí varianta pohybu robotu



Obr. 8.: Souřadné soustavy robotu

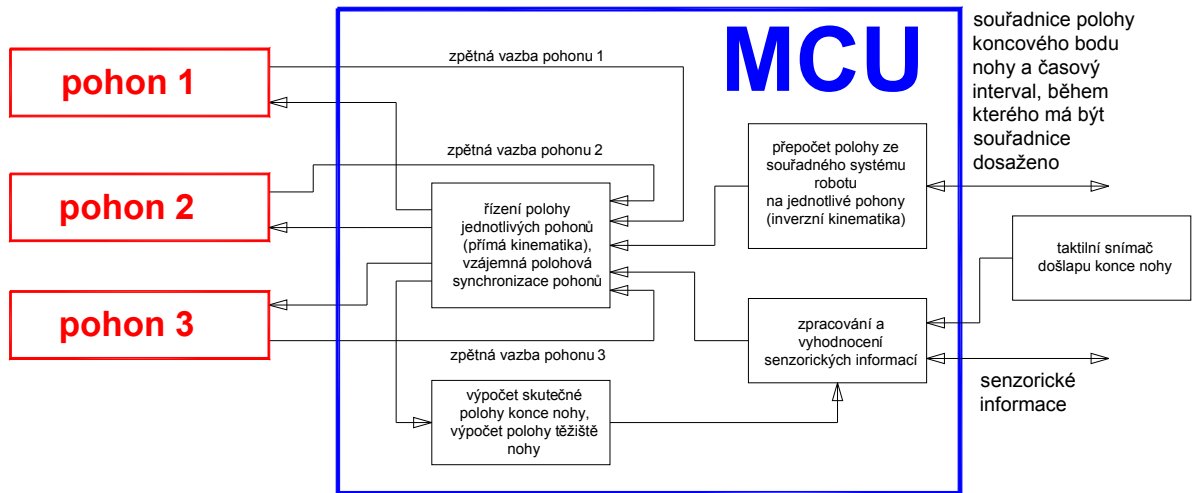
Nižší řídicí úroveň robotu pracuje se třemi typy souřadných systémů. Je to hlavní kartézský souřadný systém robotu $[x, y, z]^T$ (obr. 8), dále je pro každou nohu definován lokální kartézský souřadný systém nohy $[x_{1a}, y_{1a}, z_{1a}]^T$, jehož počátek je umístěn do osy otáčení nohy, $a \in (0, 1, 2, 3)$. Dále si každá noha generuje vlastní souřadný systém řízených os. Tento souřadný systém záleží na vlastním uspořádání nohy, dále bude označován jako $[x_s, y_s, z_s]^T$.

3.2 Řízení nohy

Řízení nohy je hierarchicky rozloženo podle obr. 9. Nejvyšší úroveň hierarchie představuje 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 nohy robotu $[x_{1a}, y_{1a}, z_{1a}]^T$. Souřadnice lokálního systému nohy jsou přepočítány do každé samostatné řízené osy $[x_s, y_s, z_s]^T$ 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 neúspěšnému požadavku. Další parametr, který jednotka dostává, je stav došlapu konce nohy.

Souřadnice $[x_s, y_s, z_s]^T$ jsou předány jednotce kontroly dosažené polohy a vzájemné synchronizace pohonů. Činnost jednotky se liší podle zvoleného způsobu řízení. Použití polohového řízení je velmi výhodné pro řízení pohybu, které odpovídá první variantě. V tomto případě se noha pohybuje samostatně, bez potřeby synchronizace činnosti s ostatními nohama. Výhoda polohového řízení je v tom, že noha je schopna dosáhnout požadované polohy bez potřeby zatěžovat nadřazenou vrstvu řízení. Rychlostní řízení je výhodnější pro druhou a třetí variantu pohybu. V tomto případě se nohy dotýkají terénu (minimálně tři nohy) a pohybuje se základna robotu vůči koncovým bodům noh. Při pohybu základny robotu je potřeba co nejlépe synchronizovat pohyb všech noh (pohybuje se bod uchycení nohy vůči koncovému bodu). Při nedokonalé synchronizaci může dojít k tzv. „přetahování“ se

jednotlivých noh, které může mít za následek zvýšené namáhání celého robota a zvláště jednotlivých noh a jejich pohonů.



Obr. 9.: Schéma řídicí soustavy nohy

3.2.1 Polohové řízení pohybu (první varianta)

Souřadnice $[x_s, y_s, z_s]^T$ jsou jednotkou rozloženy na jednotlivé stejné časové úseky. Takto získané souřadnice polohy a rychlosti jsou distribuovány jednotlivým pohonům. Pro k -tý

časový krok je matice parametru
$$P_k = \begin{bmatrix} x_k^p & v_{x_k}^p \\ y_k^p & v_{y_k}^p \\ z_k^p & v_{z_k}^p \end{bmatrix}.$$

Jednotka z polohové vazby vyhodnocuje plnění zadaných požadavků. Může dojít k těmto nejzávažnějším chybám:

1. některému z pohonů byly uloženy požadavky, které nemůže splnit; jednotka musí přepočítat znovu všechny matice parametrů P_k a pokusit znovu dosáhnout požadované polohy,
2. na některém pohonu se vyskytla porucha nebo byl přetížen; musí být znovu přepočítána dráha koncového bodu nohy tak, aby bylo možno dosáhnout požadované polohy,
3. taktilní snímač detekoval kontakt s překážkou a/nebo se nepodařilo došlápnout; jednotka se pokusí ze změřeného vektoru síly došlapu \vec{F}_D přepočítat trajektorii a překážce se vyhnout.

Chyby 1. a 2. by se při správně navrženém řízení měly vyskytovat minimálně, četnost výskytu chyby 3 závisí na regulárnosti terénu a na zvolené strategii chůze.

3.2.2 Rychlostní řízení pohybů (druhá a třetí varianta)

Při rychlostním řízení přebírá funkci polohového řízení nadřazená úroveň nohy. Noha pak dostává jako řídicí požadavek vektor rychlosti pohybu bodu uchycení

$\vec{V}_{BU} = [v_x^{BU} \quad v_y^{BU} \quad v_z^{BU}]^T$. Jednotka přepočítá vektor \vec{V}_{BU} na rychlosti jednotlivých pohonů.

Matrice parametrů pak má tvar $P_k = \begin{bmatrix} v_{xk}^p & v_{yk}^p & v_{zk}^p \end{bmatrix}^T$ a je distribuována jednotlivým pohonům. Ze zpětné vazby se vyhodnocuje dosažení parametrů P_k . Při řízení může dojít k chybám 1. a 2. stejně, jako u polohového řízení. Tento způsob umožňuje efektivní synchronizaci pohybu noh navzájem, případné zavedení polohového řízení tyto varianty pohybu by jen komplikovaly synchronizaci. Možné výhody rychlostní řízení jsou negovány přenášením výpočetní zátěže na vyšší úrovně řízení, což je koncepčně nevhodné.

3.2.3 Zpracování senzorické informace a informace o noze

Senzorické a stavové informace o aktuální poloze nohy, rychlosti jejího pohybu a jejího zatížení jsou poskytovány vyšším úrovním řízení. Pro zjednodušení hierarchie řízení je dále vhodné, aby si noha sama kontrolovala zda-li se zadané parametry nacházejí uvnitř jejího pracovního prostoru, počítala polohu těžiště a případně počítala další parametry vycházející z její geometrie. Je-li noha schopna poskytnout nadřazené úrovni všechny tyto informace, můžeme ji považovat za samostatně pracující mechatronickou soustavu. Toto přináší hlavní výhodu v tom, že nadřazené úrovně jsou nezávislé na parametrech nohy.

3.3 Řídicí algoritmy

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 pro řídicí algoritmy bude chování řízení 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.

Vlastní proces řízení je ovlivňován parametry senzorické soustavy. Z hlediska řízení bude velmi zajímavé hlavně ovlivnění řízení informacemi o síle došlapu \vec{F}_D , které bude značně jiné např.: při pohybu po silnici či po louce.

Každý blok řídicí soustavy nohy obsahuje vlastní diagnostiku správné činnosti, ve které se mimo jiné eviduje i statistika o době provozu bloku, chybovosti jeho činnosti a jeho využití. Tyto diagnostické údaje rozhodují o používání a přepracovávání jednotlivých bloků. Informace o chybovosti je základní kritérium pro hodnocení použitých řídicích algoritmů.

4 Závěr

Popisovaná řešení nohy jsou buď ověřována na prototypu popisované nohy, nebo jsou ve stádiu návrhu funkčního prototypu. Zvláštní pozornost byla věnována rozboru potřeby snímání zvolených veličin, které mohou výrazně ovlivnit funkci nohy i robotu. Na základě rozboru jsou stanoveny požadavky na snímače zvolených veličin. Dále byl proveden rozbor využití jednotlivých snímaných veličin na způsob řízení a ovlivnění řízení nepříznivými faktory, které vyplývají z mezních hodnot těchto veličin.

Velmi důležitá veličina pro řízení pohybu nohy je informace o silovém působení konce nohy na terén, neboť použitím vhodného vyhodnocovacího a řídicího algoritmu lze dosáhnout mimo jiné zvýšení stability pohybu robotu jako celku, ale lze i řešit jednoduchým způsobem kolizní situace a vyhýbání se překážkám.

Další práce na vývoji kráčivého robotu povedou k dokončení a optimalizaci navrhovaných řešení a dobudování senzorické soustavy. Po odladění prototypu nohy bude přistoupeno k realizaci celého robotu s využitím získaných zkušeností.

5 Poděkování

Práce byla provedena za podpory projektů MSM 262100024 „Výzkum a vývoj mechatronických soustav“, pilotního projektu ÚT AV ČR č. 52020 „Řízení kráčivého robotu s využitím metod umělé inteligence“, projektu navazujícího „Realizace základních řídicích členů kráčivého robotu“.

6 Použitá literatura

- [1] Houška, P., Březina, T., Singule, V.: Koncepce mechatronické soustavy nohy kráčivého robotu, Inženýrská mechanika 2002, Svratka, 2002
- [2] ADuC814 - MicroConverter®, Small Package 12-Bit ADC with Embedded FLASH MCU, data sheet, Analog Devices, Inc., 2002
- [3] Coelho, J.A.JR.: Multifingered grasping: Grasp reflexes and control context, [dissertation], UMASS, USA 2001
- [4] Nicolson, E. J.: Tactile Sensing and Control of a Planar Manipulator, [dissertation], University of California at Berkeley, 1994
- [5] Mei, T.; Li, J.W.; Ge, Y.; Chen, Y.; Ni, L.; Chan, M. H.: An Integrated MEMS Three-dimensional Tactile Sensor with Large Force Range, Hong Kong 1999.
- [6] Hristuy, D.; Roger, N.F.; Brockett, W.: The performance of a deformable-membrane tactile sensor: basic results on geometrically-defined tasks., Conf. on Robotics and Automation, IEEE Int'l 2000
- [7] Volf, J., Holý, S., Vlček, J.: Using of tactile transducer for pressure-distribution measurement on the sole of the foot, Sensors and Actuators, Elsevier, 1997, pp. 556-561