

CONTROL OF DYNAMIC STABILITY OF MOVING THE FOUR- LEGGED WALKING ROBOT

P. Houška¹, V. Singule², T. Březina³, Z. Ehrenberger⁴

Position of gravity centre of walking robot body is changed depending on individual legs position, velocity, acceleration and configuration of terrain during movement. Dependencies of position, velocity and acceleration legs may be determined from the kinematic and dynamic models of robot. Influence of terrain must be compensated through sensor system. Design of robot sensor system for determination of its slope is presented in this contribution.

Úvod

U kolových robotů poloha těžiště díky jejich konstrukci a způsobu pohybu nemění a nemusí být proto řešen problém identifikace polohy těžiště robotu během pohybu. Náklon kolových robotů není u většiny řešen, protože konstrukce robotu neumožňuje tuto úlohu řešit jiným způsobem, než volbou jiné dráhy. Naopak vysoký počet stupňů volnosti kráčivých robotů značně zvyšuje nároky na řízení pohybu robotu a identifikaci polohy jeho těžiště.

Při pohybu kráčivého robotu se mění poloha jeho těžiště v závislosti na polohách jednotlivých noh. Poloha těžiště kráčivého robotu a její průmět do tzv. „roviny došlapu“ má rozhodující vliv na stabilitu robotu. Na úspěšnosti řešení stability robotu při pohybu závisí jeho maximální rychlost, svahová dostupnost a vlastní spolehlivost robotu.

Tento příspěvek se zabývá vymezením termínu stabilita robotu, volbu vhodné soustavy snímačů, způsobu zpracování získávaných dat a možností jejich využití při řízení pohybu čtyřnohého kráčivého robotu Kráčmera I.

¹ Ing. Pavel Houška, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, FSI VUT v Brně, ČR, e-mail: houska@umt.fme.vutbr.cz

² Doc. Ing. Vladislav Singule, CSc., Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky, FSI VUT Brno, Technická 2, 616 69 Brno, ČR, e-mail: singule@uvssr.fme.vutbr.cz

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

⁴ Prof. Ing. Zdeněk Ehrenberger, DrSc., Centrum pro mechatroniku, IT AV ČR, Technická 2, 61669 Brno, e-mail: ehrenberger@uvssr.fme.vutbr.cz

Stabilita robotu

Statická stabilita čtyřnohého robotu

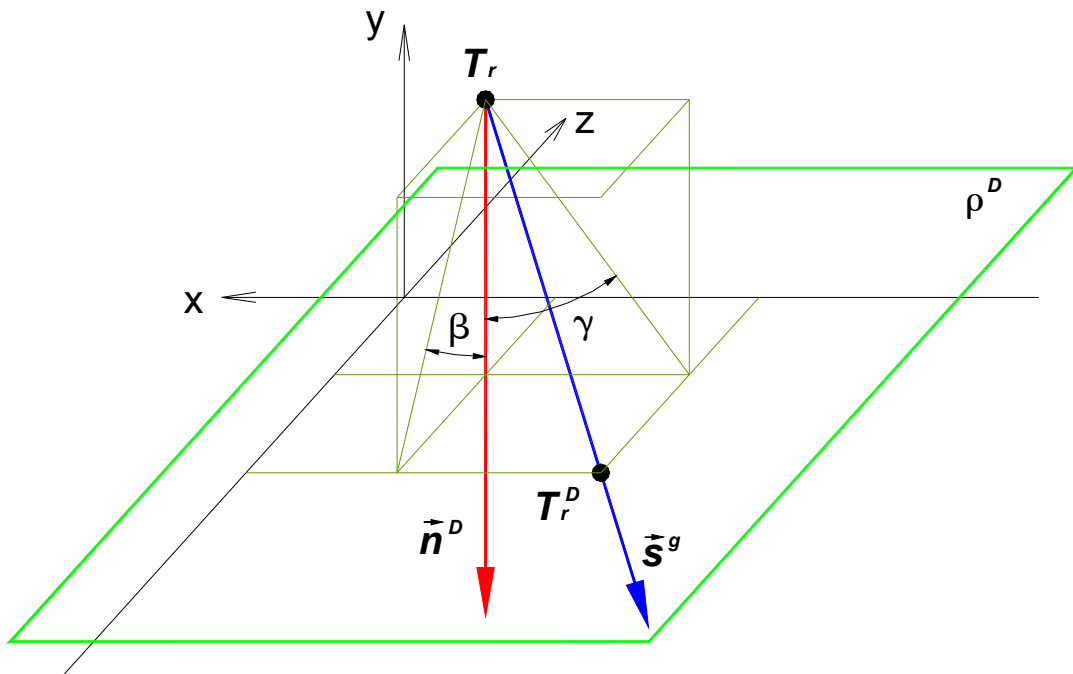
Uvažujeme těžiště celého robotu $\mathbf{T}_r = [x_{tr} \ y_{tr} \ z_{tr}]^T$ a ρ^D je „rovina došlapu“, kterou tvoří nohy robotu, dotýkající se terénu (obr. 1). Nohy dotýkající se terénu vymezují v rovině ρ^D mnohoúhelník $M_{1,2,i}$, kde i je počet nohou dotýkajících se terénu. Přímka s^g je rovnoběžka se směrem gravitačního zrychlení. Bod $\mathbf{T}_r^D = [x_{tr}^D \ y_{tr}^D \ z_{tr}^D]^T$ je průmět těžiště robotu \mathbf{T}_r do roviny $M_{1,2,i}$, který se získá spuštěním přímky s^g z těžiště robotu \mathbf{T}_r . Jsou-li dynamické účinky působící na robot zanedbatelné, potom robot zaujímá polohu staticky stabilní, jestliže platí

$$\mathbf{T}_r^D \in M_{1,2,i}, \quad (1)$$

přičemž musí být splněna podmínka mnohoúhelníku $i \geq 3$.

Z rovnice (1) vyplývá podmínka statické stability robotu, tedy v kontaktu s terénem musí být v každém okamžiku alespoň tři nohy.

Zavede-li se přímka n^D , která je normálou roviny došlapu procházející bodem \mathbf{T}_r^D , může být definován úhel náklonu robotu od směru gravitačního zrychlení jako $\varphi_{nakl} = [0 \ \beta \ \gamma]^T$, viz. obr. 1. Úhel φ_{nakl} bude dále zjednodušeně označován jako úhel náklonu.



Obr. 1. Průmět těžiště do roviny došlapu

Dynamická stabilita robotu

Řešení dynamické stability robotu je nutné v případech, kdy se musí kromě působení gravitační síly F_g na těžiště robotu \mathbf{T}_r uvažovat také dynamické účinky setrvačných sil F^d_j , které působí na jednotlivé pohybující se části robotu. Celkovou sílu působící na robot lze symbolicky vyjádřit jako

$$F_{cel} = F_g + \sum F^d_j. \quad (2)$$

Zjednodušeně lze celý problém vyjádřit jako posunutí těžiště robotu vlivem dynamických účinků. Dynamická stabilita robotu závisí převážně na zrychlení pohybů jednotlivých pohybujících se částí robotu a typu chůze.

Požadavky na stabilitu robotu

Jak vyplývá z předchozích odstavců, na stabilitu robotu má vliv především poloha průmětu těžiště \mathbf{T}_r^D a velikost dynamických sil působících na robot.

Pro zajištění statické stability je nutno znát relativní polohu těžiště robotu \mathbf{T}_r^D , kterou lze určit jednoduchým geometrickým výpočtem z polohy těžiště \mathbf{T}_r a úhlu náklonu φ_{nakl} , tedy

$$\mathbf{T}_r^D = f(\mathbf{T}_r, \varphi_{nakl}). \quad (3)$$

Poloha těžiště celého robotu \mathbf{T}_r (v globálním souřadném systému robotu) je závislá na aktuálních polohách noh a jejich geometrii. Pouze v případě pohybu robotu po vodorovném regulárním terénu, kdy je $\varphi_{nakl} = [0 \ 0 \ 0]^T$ a tudíž $\mathbf{T}_r = \mathbf{T}_r^D$, není nutné měřit úhel náklonu.

V případě řešení dynamické stability vyjadřuje úhel náklonu pouze směr působení gravitační síly F_g a síly F^d_j je nutno určovat z velikosti zrychlení působícího na těžiště robotu a znalosti dynamických charakteristik robotu.

V případě vybavení robotu manipulačními mechanismy nebo jinými nastavbami je samozřejmě nutno tyto zahrnout do výpočtu stability celého robotu.

Soustava snímačů pro stabilizaci chůze

Volba snímače náklonu

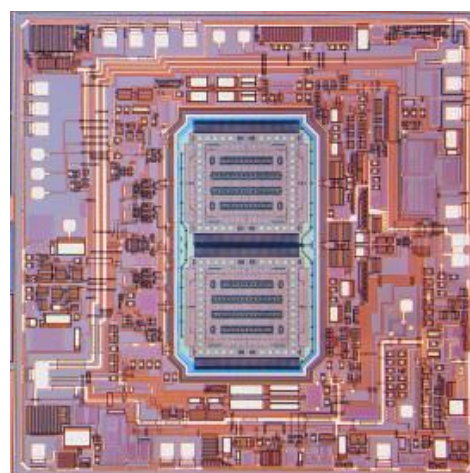
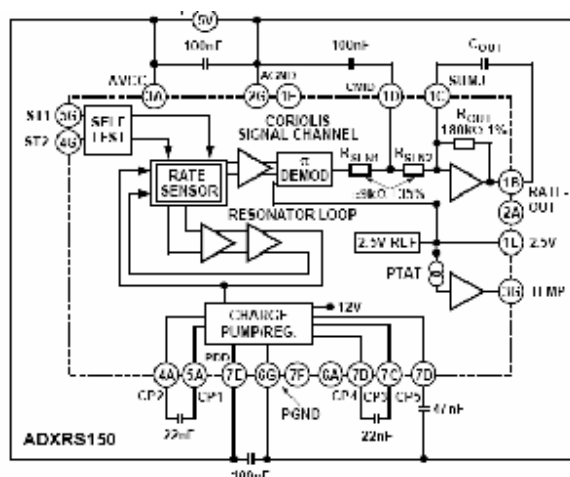
Pro měření úhlu náklonu φ_{nakl} se standardně používají různé typy gyroskopů. Pro tuto úlohu jsou velmi zajímavou variantou MEMS (Microelectromechanical systems) gyroskopy. Tyto gyroskopy vznikly na základě požadavků automobilového a spotřebního průmyslu. Pevně jsou používány v brzdových a tlumících soustavách automobilů a ve stabilizátorech obrazů videokamer. V současnosti je jich na trhu již několik typů od různých výrobců za různou cenu. Pro aplikaci na kráčivý robot se jeví nejvhodnějším z hlediska dostupnosti typ ADXRS150 firmy Analog Device Inc.

Snímač ADXRS150 (obr. 2) [1] představuje jednoosý gyroskop s rozsahem $\pm 150 /s$, citlivostí $12,5mV / /s$ a rozměrech $7 \times 7 \times 3$ mm. Napájecí napájení je $5V$, maximální proud je $8mA$.

Mezi nesporné výhody tohoto gyroskopu patří malé rozměry, nízká energetická náročnost a nízká cena (kolem \$30). Dalšími výhodami jsou tyto: nemá žádné pohyblivé části, které by byly uloženy v ložiskách (nevzniká tření), vysoká spolehlivost a dlouhá životnost.

Nejmenší cenově dostupné vlákno-optické gyroskopy [2] používané v robotice mají rozměry přibližně $100 \times 100 \times 50$ mm a jejich cena se pohybuje kolem \$1000, a to při podobné citlivosti, kterou dosahuje ADXRS150.

Blokové schéma vnitřního uspořádání snímače je na obr. 2, fotografie vnitřní struktury je na obr. 3.



Obr. 2 Blokové schéma vnitřního uspořádání gyroskopu ADXRS150

Obr. 3 Vnitřní struktura gyroskopu ADXRS150

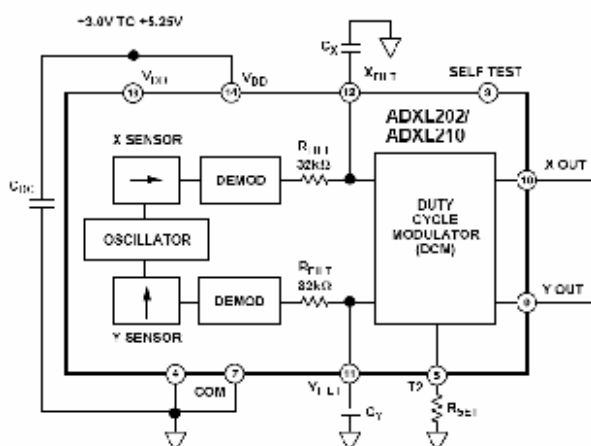
Snímač měří úhlovou rychlost natočení kolem osy kolmé k jeho připojovací ploše. Výstupem snímače je napětí na výstupu $RATEOUT$. Rozsah výstupu je $0 - 5V$, nulové úhlové rychlosti odpovídá napětí $2,5V$. Citlivost a šířka pásma snímače je nastavitelná připojením paralelního rezistoru k rezistoru R_{OUT} nebo připojením kondenzátoru C_{OUT} vhodné kapacity v rozsahu přibližně od $\pm 30 /s$ do $\pm 600 /s$ při šířce pásma přibližně od $2Hz$ do $400Hz$ maximálně. Pro kompenzaci vlivu teploty lze využít napětí na výstupu $TEMP$, které se mění v závislosti na vnitřní teplotě snímače o $8.4mV / ^\circ K$. Dále je gyroskop vybaven testovacími vstupy $ST1$ a $ST2$ které slouží ke kalibraci snímače.

Volba snímače zrychlení

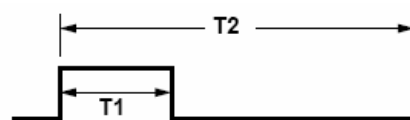
Pro určování dynamické stability robotu je nutné měřit zrychlení těla robotu. Pro měření zrychlení lze použít velké množství typů akcelerometrů. Z pohledu velikosti, hmotnosti a hlavně možnosti získávat měřená data v digitální podobě se jeví jako nejvýhodnější použití MEMS akcelerometrů.

MEMS akcelerometry jsou nabízeny několika výrobci, např.: Analog Device, Inc., Motorola, STMicroelectronics a dalšími. Snímače citovaných výrobců [3, 4, 5] pracují na principu kapacitního snímání polohy kmitajícího elementu a jsou navzájem podobné měřicími rozsahy i rozměry.

Z důvodu lepší dostupnosti produktů firmy Analog Device, Inc. v ČR, byl zvolen snímač ADXL202 této firmy. ADXL202 [3] je dvouosý absolutní akcelerometr, s rozsahem $\pm 2g$, napájecím napětím $5V$ a maximálním proudem $1mA$. Blokové schéma vnitřního uspořádání akcelerometru je uvedeno na obr. 4.



Obr. 4 Blokové schéma vnitřního uspořádání akcelerometru ADXL202



Obr. 5 Tvar výstupního signálu akcelerometry

Akcelerometr měří zrychlení v osách x a y , rovnoběžných s jeho připojovací plochou. Zrychlení lze měřit digitálně na výstupech X_{OUT} a Y_{OUT} nebo analogově na výstupech X_{FILT} a Y_{FILT} .

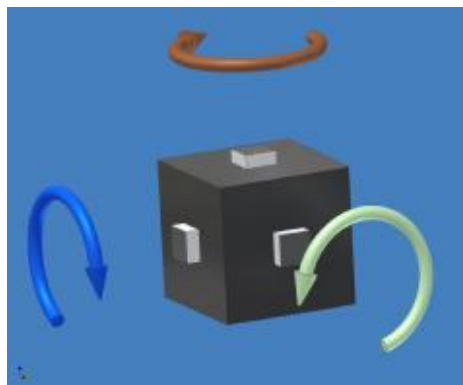
Při využití digitálních výstupů má výstupní signál tvar, odpovídající obr. 5, výstupní zrychlení odpovídá poměru časových intervalů $a = \left(\frac{T_1}{T_2} - 0,5 \right) \frac{1}{12,5}$ [%]. Délka intervalu T_2 je nastavitelná rezistorem R_{SET} , šířka pásma pro jednotlivé osy se nastavuje kondenzátory X_{FILT} a Y_{FILT} . Dosažitelný měřicí interval je T_2 v rozsahu $0,5 - 10 ms$ a šířka pásma je nastavitelná v rozsahu $1 - 5000 Hz$ maximálně.

Při využití analogových výstupů odpovídá nulové zrychlení polovině rozsahu napětí napájecího. Nevýhodou tohoto řešení je nutnost zmenšit šířku pásma a používat řádově vyšší odpory rezistoru R_{SET} , které také snižují použitelnou šířku pásma (snížení může být více než o jeden řád). Z těchto důvodů je vhodnější používat digitální výstupy.

Návrh snímače stabilizace chůze

Hlavní část snímače stabilizace chůze představuje dvě trojice gyroskopů ADXRS150. Gyroskopy jsou rozmístěny na krychlovém tělese snímače. Rozmístění jedné trojice je uvedeno na obr. 6 se zobrazenými směry měřených natočení. Druhá trojice je umístěna a upevněna na zbývajících stěnách krychle tak, že směry měření jsou vždy opačné. Tato trojice je použita z důvodu kompenzace posunu nulového bodu snímače v čase („driftu“), kompenzace vlivu teploty a případných vnějších rušivých signálů. Přestože MEMS snímače mají drift výrazně potlačen (vlastní struktura je tvořena dvěma snímači), je přesto doporučováno pro delší měření (v řádu desítek minut) bez možnosti kalibrace provádět jeho kompenzaci dalšími způsoby[6].

K měření a vyhodnocování informací z každé trojice snímačů je použit procesor MCU C8051F006 firmy Silicon Laboratories (dříve Cygnal) [7]. MCU je pro tuto úlohu vybaven 12 bitovým devíti-kanálovým multiplexovaným AD převodníkem a interním snímačem teploty. Primární úlohou MCU je měření napětí na výstupech *RATEOUT* a *TEMP*. Pro kalibraci gyroskopů jsou dále jsou ovládány vstupy *ST1* a *ST2* a pro kompenzaci měřených veličin je využívána i informace o teplotě okolí procesoru. Výstupem MCU jsou úhly a rychlosti natočení v jednotlivých osách.



Obr. 6 Rozmístění gyroskopických snímačů ADXRS150

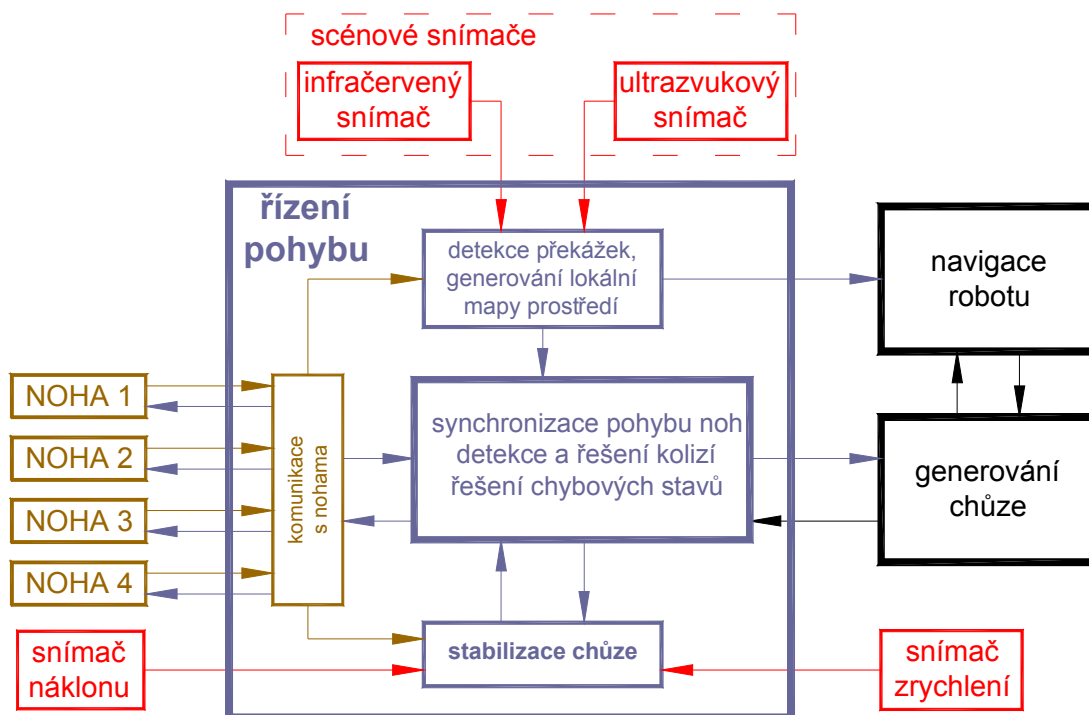
Dále snímač bude obsahovat tři dvojice akcelerometrů ADXL202, z nichž každá bude umístěna co nejblíže k jednotlivým nohám robotu (s výjimkou jedné). Odečet měřených hodnot a jejich zpracování zajišťuje u každé dvojice akcelerometrů jeden jednoduchý MCU C8051F300 firmy Silicon Laboratories [8]. Pro tuto úlohu jsou důležité zdroje externího přerušení použité pro měření intervalů T_1 a T_2 a dále je potřeba pro přesné měření zajistit přesnou časovou základnu pro MCU (oscilátor).

Výsledné zpracování měřených dat všech snímačů zajišťuje MCU první trojice gyroskopů. Pro vzájemnou komunikaci mezi jednotlivými MCU je použita sběrnice SMBus (rozšířená I2C) [9], kterou jsou všechny MCU použité v rámci snímače hardwarově vybaveny. Výslednými daty jsou vektory úhlové rychlosti, úhlu natočení, rychlost translace a zrychlení translace plošiny robotu. Tato data získává řídicí systém robotu přes sběrnici UART, která je součástí hardware MCU.

Začlenění snímače do řídicího systému robotu

Řídicí systém robotu zabezpečuje výměnu dat mezi jednotlivými moduly robotu, dále provádí nejzákladnější vyhodnocování stavů robotu a řeší chybové stavy robotu na nejnižší úrovni. Zjednodušené schéma je uvedeno na obr. 6.1.

Řídicí systém používá informace získané ze snímače stabilizace chůze ke kontrole náklonu těla robotu. V případě rychlé změny náklonu nebo v případě přiblížení náklonu k nepřijatelné hodnotě systém generuje operace, jejich úkolem je stabilizace náklonu (upravuje polohy jednotlivých noh, případně robot zastaví a odesílá na modul generování chůze žádost na přehodnocení vzniklé situace. Informace ze snímače stabilizace chůze dále slouží pro výpočet aktuální polohy těžiště robotu a vyhodnocení dynamických účinků na robot. Všechny informace jsou dále využívány modulem generování chůze.



Obr. 6.1 Zjednodušené schéma řídicího systému kráčivého robotu

Závěr

V příspěvku je popsána koncepce snímače stabilizace chůze pro kráčivý robot „Kráčmera I“.

Vlastní realizace snímače, která nyní probíhá, je rozdělena na čtyři etapy:

1. realizace a zprovoznění gyroskopické části (nejdůležitější část snímače);
2. realizace a zprovoznění akcelerometrů;
3. ověření přesnosti snímačů, přesnosti a použitelnosti korekčních algoritmů;
4. na základě bodu 3. rozhodnutí o vhodnosti použití jednotlivých snímačů.

Současný stav realizace se nachází v bodě 2 a průběžně probíhá příprava algoritmů pro začlenění snímače do řídicího systému robotu. Velký důraz je kladen na jednoduchost a spolehlivost snímače.

Výhodou popisovaného řešení je nízká cena, malé rozměry a nízká energetická náročnost. Mezi další výhody tohoto snímače patří možnost jeho použití pro odhad skutečné polohy a natočení robotu vůči referenčnímu bodu. Pro tento typ snímače je zvažováno další použití (v jednodušším provedení pouze se dvěma měřenými osami zrychlení a jednou natočení) pro kolový autonomní lokomoční robot OMR III, u kterého se tímto snímačem z velké části vyřeší i problém kolize robotu s malými překážkami, které nemůžou být překonány a ostatní kolizní a scénové snímače je nejsou schopné detekovat.

Mezi nevýhody patří potřeba inicializace snímače v definované poloze vůči směru působení gravitační síly. Jako možnost řešení tohoto problému se jeví vhodné natočení snímaných os jednotlivých akcelerometrů vůči sobě a využití faktu, že tyto snímače měří absolutní hodnotu zrychlení vůči zemi. Vhodnost tohoto řešení bude potvrzena až po provedení dostatečného množství experimentů.

Poděkování

Práce byla provedena za podpory projektu MSM 262100024 „Výzkum a vývoj mechatronických soustav“.

Literatura

- [1] Houška, P.: Distribuovaný systém řízení kráčivého robotu; Pojednání ke státní doktorské zkoušce; ÚMT FSI VUT v Brně; 2003;
- [2] Houška, P., Ehrenberger, Z., Březina, T., Singule, V.: The Use of LegLanding Information for Walking Robot Control; Engineering Mechanics; Svratka, ČR; 2003; 118-119 + CDROM
- [3] ADXRS150 –Single Chip Yaw Rate Gyro with Signal Conditioning, data sheet, Analog Devices, Inc., 2003
- [4] Bennett, S., Emge, S.,R., Dyott, R.,B.: Fiber Optic Gyros for Robotics, KVH Industries, Inc.,1999
- [5] ADXL202/ADXL210 –Low Cost Dual Axis iMEMS Accelerometers with Digital Output, data sheet, Analog Devices, Inc., 1999
- [6] MMA1260D - Low G Micromachined Accelerometer, data sheet, Motorola, 2003
- [7] LIS2L02AS - INERTIAL SENSOR 2Axis - 2g/6g LINEAR ACCELEROMETER, PRODUCT PREVIEW, STMicroelectronics, 2002
- [8] Theory of Operation of Angular Rate Sensors; Crossbow; www.crossbow.com
- [9] C8051F000/1/2/5/6/7, C8051F010/1/2/5/6/7 Mixed-Signal 32KB ISP FLASH MCU Family; revision 1.7; Silicon Laboratories; 2003; www.silabs.com
- [10] C8051F300/1/2/3/4/5 Mixed-Signal ISP FLASH MCU Family; revision 2.3; Silicon Laboratories; 2003; www.silabs.com