

POSSIBILITIES OF IMPROVEMENT ACCURACY OF THE ATTITUDE SENSOR FOR WALKING ROBOT

P. Houška¹, T. Marada², V. Ondroušek³, V. Singule⁴

Summary: *Measuring of the robot platform attitude with respect to the direction of gravity acceleration – attitude in abbreviation is very important issue in control of walking robots and other devices that can work in irregular terrain. One possible way of attitude sensor is described in contribution. Focus is on identification of stochastic properties parts of attitude sensor. Results are used for sensor and filters tuning.*

1. Úvod

Pro řízení stability kráčivého robotu při pohybu je důležité znát okamžitý náklon základny robotu. Pro snímání náklonu kráčivého robotu byl vytvořen snímač náklonu tvořený akcelerometry a gyroskopy. Příspěvek se zabývá nastavením částí snímače a identifikováním vlastností použitých snímačů, za účelem získání reálných dat pro analýzu a následné zvýšení přesnosti snímače na takovou úroveň, aby byl plně použitelný pro řízení stability robotu.

2. Snímač náklonu

Pro snímání náklonu bylo zvoleno použití MEMS gyroskopů, ale takto získaná hodnota je zatížena driftem gyroskopu. To znamená, že gyroskop je použitelný pouze pro krátkodobá měření. Proto musí být snímací soustava doplněna snímači, které umožní kompenzovat drift. K tomuto účelu byly vybrány MEMS akcelerometry, které ale měří mimo působení gravitačního zrychlení i zrychlení, způsobená pohybem snímače. Pro řešení problému je tudíž nutná fúze dat z obou typů snímačů, která provede kompenzaci chyb snímačů.

Fúze dat z obou typů snímačů lze provést s použitím komplementárního filtru, který byl popsán v [1]. Základní myšlenka spočívá v zavedení dvou filtrů, které odstraňují nevýhody obou snímačů, tj. drift a citlivost na pohyb. První filtr tvoří dolní propust druhého řádu (DP2Ř), který je aplikován na výstupní signál z inklinometru. Inklinometr pak poskytuje informaci o náklonu pouze při nízkých frekvencích (pomalé změny v náklonu). Druhý filtr tvoří horní propust druhého řádu (HP2Ř), a je aplikován na výstupní signál z gyroskopu.

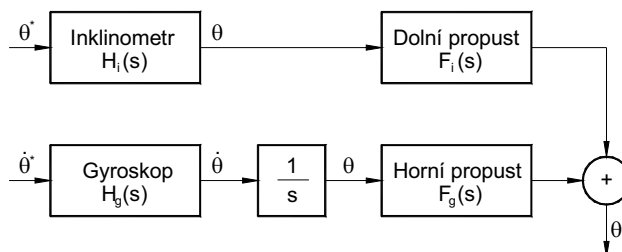
¹ Ing. Pavel Houška, Ph.D., Ústav automatizace a informatiky, FSI VUT v Brně, ČR, e-mail: houska.p@fme.vutbr.cz

² Ing. Tomáš Marada, Ph.D., Ústav automatizace a informatiky, FSI VUT v Brně, Technická 2, 61669 Brno, ČR, e-mail: marada@fme.vutbr.cz

³ Ing. Vít Ondroušek, Ústav automatizace a informatiky, FSI VUT v Brně, Technická 2, 61669 Brno, ČR, e-mail: yondro00@stud.fme.vutbr.cz

⁴ Doc. Ing. Vladislav Singule, CSc., Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky, FSI VUT Brno, Technická 2, 616 69 Brno, ČR, e-mail: singule@fme.vutbr.cz

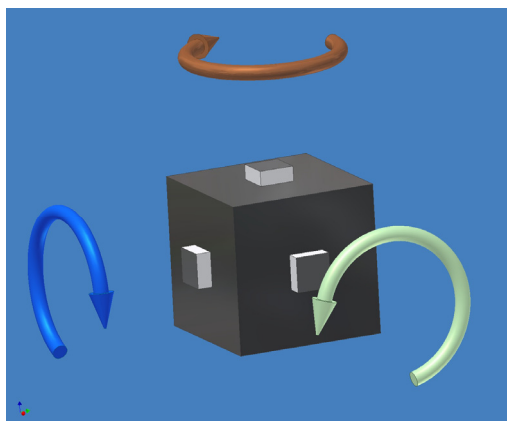
Gyroskop tak poskytuje informaci o náklonu pouze při vysokých frekvencích (velké změny v náklonu). Sečtou-li se informace z obou snímačů je výsledkem skutečný náklon. Tato metoda je zobrazena na obr. 1.



Obr. 1 Schéma vyhodnocení náklonu pomocí komplementárního filtru

3. Snímač náklonu

Hlavní část snímače náklonu představují dvě trojice MEMS gyroskopů ADXRS150 a dvojice MEMS akcelerometrů ADXL202. Gyroskopy jsou rozmístněny na krychlovém tělese snímače. Rozmístnění jedné trojice je uvedeno na obr. 2 se zobrazenými smysly měřených natočení. Druhá trojice je umístněna a upevněna na zbývajících stěnách krychle tak, že smysly 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 [1].



Obr. 2 Rozmístnění gyroskopických snímačů ADXRS150

K měření a vyhodnocování informací z každé trojice snímačů je použit mikrořadič C8051F006 firmy Silicon Laboratories [6]. Mikrořadič je pro tuto úlohu vybaven 12-bitovým devíti-kanálovým multiplexovaným AD převodníkem a interním snímačem teploty. Primární úlohou mikrořadiče je měření napětí na výstupech *RATEOUT* a *TEMP* gyroskopu [4]. Pro kalibraci gyroskopů jsou dále ovládány vstupy *ST1* a *ST2* a pro kompenzaci měřených veličin je využívána i informace o teplotě okolí procesoru. Výstupem mikrořadiče jsou úhly a rychlosti natočení v jednotlivých osách.

Výsledné zpracování měřených dat všech snímačů zajišťuje v současnosti mikrořadič první trojice gyroskopů. Pro vzájemnou komunikaci mezi jednotlivými mikrořadiči je použita sběrnice SMBus (rozšířená I2C) [6], kterou jsou všechny mikrořadiče, 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 mikrořadiče.

The schematic diagram illustrates the internal components and connections of the ADXL202/ADXL210. The circuit is powered by a +3.0V TO +5.25V supply connected to pin 13 (VDD) and a common ground (COM, pin 4). The X-axis sensor section includes an X SENSOR, an OSCILLATOR, and a DEMOD block. The Y-axis sensor section includes a Y SENSOR, an OSCILLATOR, and a DEMOD block. Both demodulators output signals to the ADXL202/ADXL210 chip via 32kΩ resistors (R_FILT). The chip also contains a DUTY CYCLE MODULATOR (DCM). The chip has pins for X OUT (pin 10), Y OUT (pin 9), and SELF TEST (pin 3). External components include capacitors Cx (pin 12), Cy (pin 11), and a resistor RSET (pin 5). The circuit is also connected to a +3.0V TO +5.25V supply and a common ground (COM, pin 4).

A diagram showing a rectangular pulse on a horizontal axis. A vertical line marks the start of the pulse. The width of the pulse is labeled T_1 . The period of the pulse, from the start line to the end of the pulse, is labeled T_2 .

MEMS akcelerometr ADXL202 [5] je dvouosý absolutní akcelerometr, s rozsahem $\pm 2g$, napájecím napětím $5V$ a maximálním proudem $1mA$. Blokové schéma vnitřního uspořádání akcelerometru je uvedeno na obr. 3.

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. 4. Výstupní zrychlení odpovídá poměru časových intervalů a hodnotě gravitačního zrychlení $a = T_1 \frac{2}{T_2} g C_a$, kde g je gravitační zrychlení (pro vyhodnocování náklonu lze vynechat) a C_a

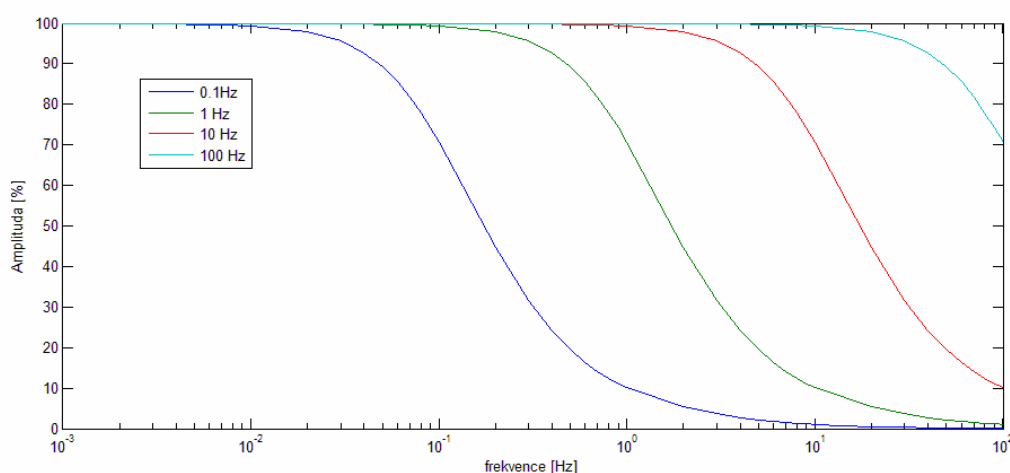
je konstanta akcelerometru. Délka intervalu T_2 je nastavitelná rezistorem R_{SET} , šířka pásma pro jednotlivé osy se nastavuje kondenzátory X_{FILT} a Y_{FILT} . Dosažitelný měřicí interval je T_2 v rozsahu $0,5 - 10\text{ ms}$ a šířka pásma je nastavitelná v rozsahu $1 - 5\,000\text{ Hz}$ maximálně.

5. Identifikace vlastností snímačů

V předchozích pracích [2, 3] jsme se zabývali použitelností snímače pro měření náklonu. Tyto práce potvrdili vhodnost snímače a zavedli požadavek identifikace dlouhodobé přesnosti a spolehlivosti akcelerometru a identifikace „okamžité“ přesnosti použitých gyroskopů. Výsledky identifikace jsou určeny jak pro „doladění“ hardware snímače, tak pro naladění filtrů. Dále z [2] vyplynula vhodnost nahrazení součtového členu výsledného náklonu za Kalmánův filtr, který je schopen stochasticky ohodnotit aktuální data z jednotlivých snímačů.

Vlastnosti akcelerometrů

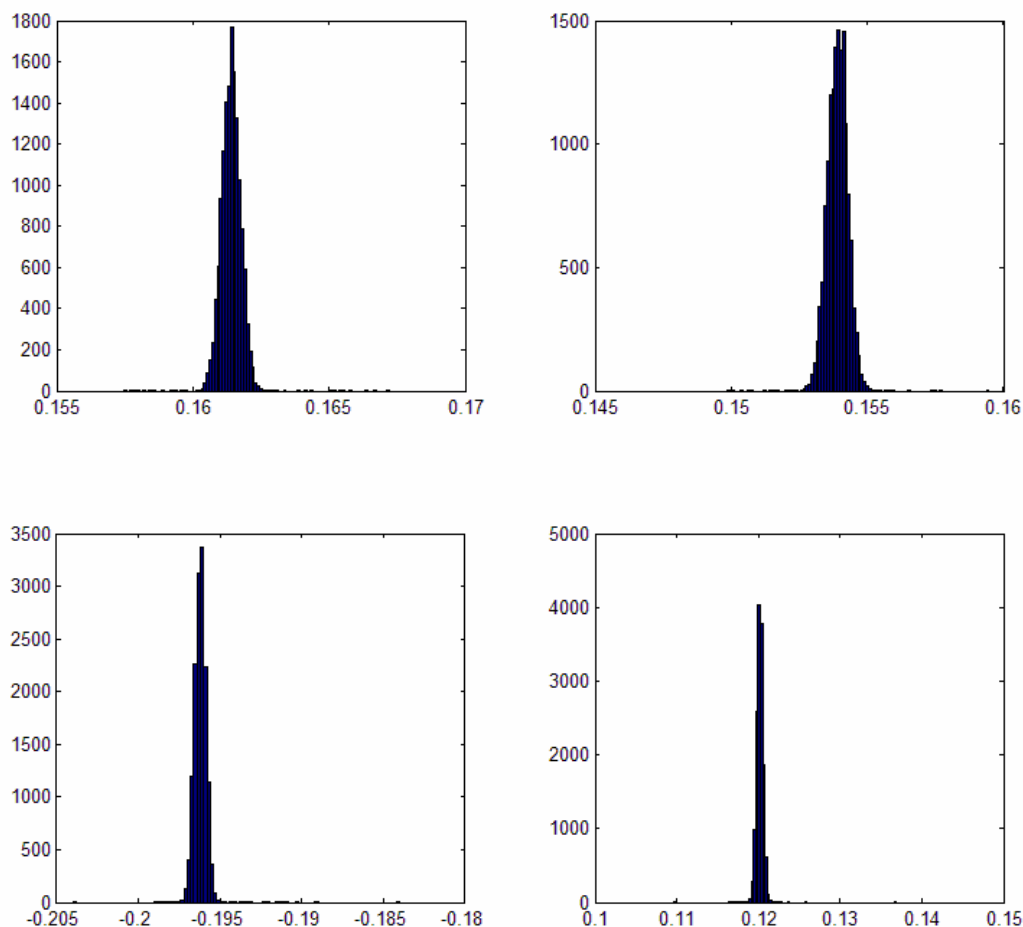
Prvním krokem, vycházejícím z předchozích prací byla volba vhodné šířky pásma a měřicího intervalu T_2 . Pro volbu těchto parametrů byl použit model snímače v Simulinku, poskytovaný výrobcem snímače. Z modelu by pro tento účel odstraněn zdroj aditivního šumu, který působil komplikace při numerické identifikaci modelu. S upraveným modelem byly provedeny simulace s různými nastaveními šířky pásma snímače (obr. 5). Při těchto simulacích byla ověřena strmost filtru snímače, nalezena vhodná šířka pásma, při splnění podmínky, že amplituda snímače neklesne pod 50% při frekvenci 1 Hz. Výsledkem těchto simulací je pak volba filtračních kondenzátorů.



Obr. 5. Amplitudová charakteristika akcelerometru ADXL 202

Dlouhodobá chyba měření akcelerometru

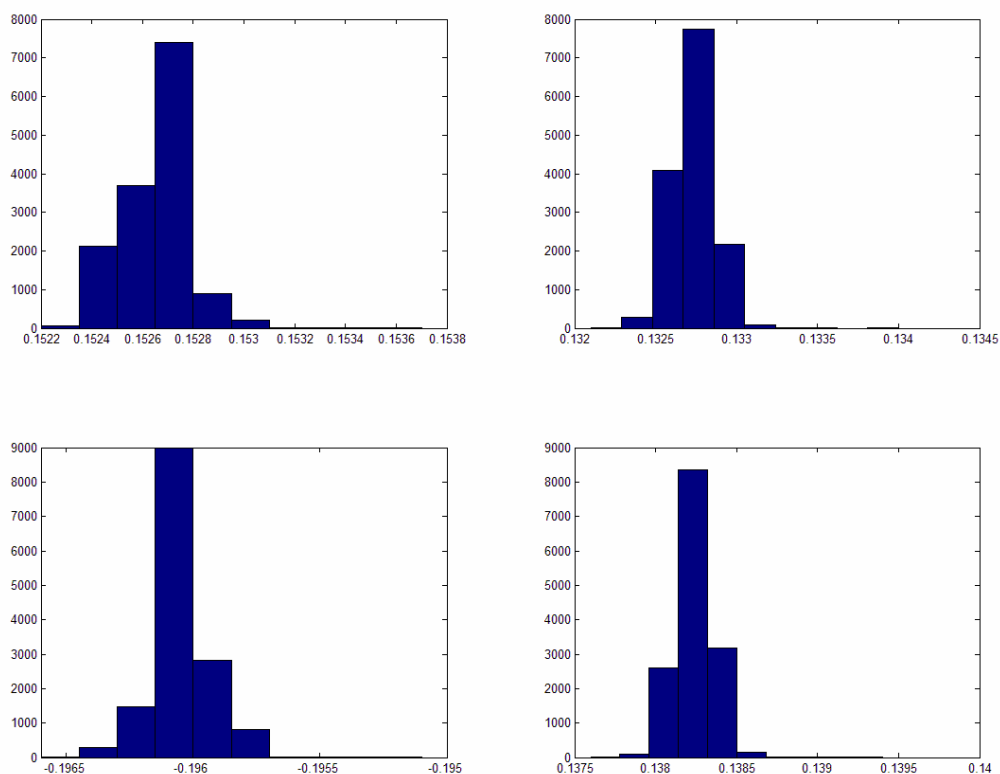
Na fyzikálním modelu snímače bylo provedeno nové nastavení šířky pásma dle výsledků předchozích simulací. Dále byla upravena perioda T_2 výstupního signálu snímače na čas odpovídající $\sim 1.1ms$. Tato perioda umožní, při použité konfiguraci hardware, se dostat na vzorkovací frekvenci $f_{vz} = 100Hz$ pro každý kanál, při rozlišovací schopnosti ± 10000 dílků (tj. rozlišovací schopnost $\sim 1 \cdot 10^{-4}$). Zvýšení vzorkovací frekvence i rozlišení zajišťuje dostatek dat pro digitální filtraci signálu.



Obr. 6. Histogram naměřených dat, natočení snímače $\sim 45^\circ$ ve všech osách, doba měření 1h, vzorkovací frekvence 4Hz.

S takto upraveným snímačem bylo provedeno několik měření při různém natočení snímače v jednotlivých osách, trvajících od 1h do 8h. Naměřená data byla přenášena do počítače, s frekvencí 4Hz na kanál. Pro tyto experimenty byla vyřazena digitální filtrace, aby nedocházelo k odstranění informace potřebné pro statistickou analýzu. Na obr. 6 jsou zobrazeny histogramy „nejhoršího“ měření. S pomocí Matlabu byl nalezen maximální rozptyl hodnot $\sigma^2 = 4.5 \cdot 10^{-4}$, porovnáním hustot pravděpodobnosti pomocí nástroje dfittool, byla ověřena vhodnost použití normálního rozdělení pro další analýzy. Tato data jsou použita jako vstupní pro zpřesněnou filtraci.

V dalších experimentech byl snímač doplněn o digitální filtr prvního řádu typu dolní propust, s horní frekvencí 6Hz. Tato frekvence byla zvolena s ohledem na výpočetní náročnost na 8-bitovém mikrořadiči. Jeho příznivý vliv je vidět jak na histogramech, tak na snížení maximální hodnoty rozptylu na $\sigma^2 = 1.3 \cdot 10^{-4}$. Další snižování frekvence filtru má pouze minimální vliv.



Obr. 7 Histogram naměřených dat filtrovaných filtrem typu dolní propust a horní frekvencí 6Hz, natočení snímače $\sim 45^\circ$ ve všech osách, doba měření 1h, vzorkovací frekvence 4Hz.

Z naměřených dat jednoznačně vyplývá, že pomocí vhodné filtrace založené na znalosti statistických vlastností měřených dat lze zajistit dlouhodobou přesnost snímače. Další komplikací je nutnost zavedení kalibrace rozsahu snímače, protože hodnota gravitačního zrychlení je 0.25 ± 0.02 . Pro účely kalibrace a další ověření přesnosti snímače náklonu je navržen přípravek, který zajistí kalibraci s přesností 0.5° . Přípravek je ve fázi výroby.

Okamžitá chyba gyroskopů

Pro identifikaci vlastností gyroskopů je nutný přípravek popsáný v předchozím odstavci, tudíž tato identifikace proběhne bezprostředně po jeho dokončení.

6. Závěr

Článek se zabývá identifikací vlastností akcelerometrické části snímače náklonu a ověřením vlastností filtrů nastavených podle výsledků identifikace, za účelem zvýšení přesnosti snímače náklonu. Během identifikačních experimentů se ukázalo, že přesnost akcelerometrické části snímače lze výrazně zlepšit použitím vhodných filtrů typu dolní propust. Do budoucna se připravuje výše uváděné nahrazení součtového členu signálů

z jednotlivých částí snímače, digitálním filtrem Kalmánovského typu. A dále provádění dalších experimentů za účelem ověření přesnosti celého 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 použití pro kráčivé roboty, dále 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.

7. Poděkování

Práce byla provedena za podpory projektu MSM 0021630518 „Simulační modelování mechatronických soustav“.

8. Literatura

- [1] Theory of Operation of Angular Rate Sensors; Crossbow; www.crossbow.com
- [2] Houška, P.: Distribuovaný systém řízení kráčivého robotu; Disertační práce; ÚMT FSI VUT v Brně; 2004
- [3] Kopinec, M., Houška, P.: SUGGESTION AND OPTIMALIZATION OF TILT SENSOR USE COMPLEMENTARY FILTERS; Engeneering Mechanics; Svratka, ČR; 2004
- [4] ADXRS150 –Single Chip Yaw Rate Gyro with Signal Conditioning, data sheet, Analog Devices, Inc., 2003
- [5] ADXL202/ADXL210 –Low Cost Dual Axis iMEMS Accelerometers with Digital Output, data sheet, Analog Devices, Inc., 1999
- [6] 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