

Možnosti zvyšovania prevádzkovej spoľahlivosti robotizovaných systémov

Elena Pivarčiová¹, Pavol Božek², Vladimír Popelka³

Technická univerzita vo Zvolene¹

Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky, Katedra riadenia strojov a automatizačnej techniky
Masarykova 24
960 53 Zvolen, Slovenská republika

Slovenská technická univerzita²

Materiálovotechnologická fakulta, Ústav aplikovanej informatiky, automatizácie a mechatroniky,
Hajdóczyho 1
917 24 Trnava, Slovenská republika

Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre³

Fakulta ekonomiky a manažmentu, Katedra informatiky

Tr. A. Hlinku 2

949 76 Nitra, Slovenská republika

e-mail^{1,2,3}: elena.pivarciova@tuzvo.sk, pavol.bozek@stuba.sk, vladimir.popelka@uniag.sk

Abstrakt

Príspevok opisuje nové možnosti využitia inerciálneho navigačného systému vo výrobnjej technike. Zaoberá sa novými princípmi kontroly prevádzkovej spoľahlivosti robotov a robotizovaných výrobných systémov na báze inerciálnych navigačných systémov.

KLúčové slová: inerciálny navigačný systém, robot, prevádzka

JEL klasifikácia: Z00

1. Úvod

Inerciálna navigácia je sebestačná navigačná technika, pri ktorej sa na meranie využívajú akcelerometre a gyroskopy. Pomocou nich je možné sledovať polohu a orientáciu objektu vzhľadom na známy východiskový bod. Základným prvkom každého inerciálneho navigačného systému (INS) je inerciálna meracia jednotka IMU (Inertial Measurement Unit), ktorá zvyčajne obsahuje tri gyroskopy na meranie uhlovej rýchlosti a tri akcelerometre na meranie lineárneho zrýchlenia. Spracovaním signálov z týchto zariadení je možné sledovať pozíciu a orientáciu.

Inerciálna navigácia je známa svojim využitím hlavne v leteckom priemysle, v navigácii taktických a strategických rakiet, kozmických lodí, ponoriek a lodí. Vďaka rozvoju MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) technológií sa v súčasnosti vyrábajú malé, ľahké a cenovo dostupné inerciálne navigačné systémy, ktoré môžu nájsť uplatnenie aj v iných oblastiach.

Neustály ekonomický tlak na minimalizáciu nákladov a zefektívňovanie technologických procesov vyžaduje inovácie a vylepšenia. Nové metódy si vyžadujú podrobnú analýzu problematiky a hľadanie nových riešení. Medzi javy, ktorým je potrebné v praxi venovať pozornosť, patria aj aplikácie inerciálnych navigačných systémov vo výrobnjej technike, ktoré je možné využiť pre kontrolu stability strojov, sledovanie priebehu vibrácií pri strojárskych technológiách, kontrolu prevádzkovej spoľahlivosti robotov a robotizovaných výrobných systémov, predchádzanie kolíznym stavom výrobného systému a pod.

Pomocou navigačného počítača a údajov zo senzorov je nepretržite určovaná poloha, orientácia, smer a rýchlosť pohybu bez externých zdrojov informácií o pohybe. Aktuálna

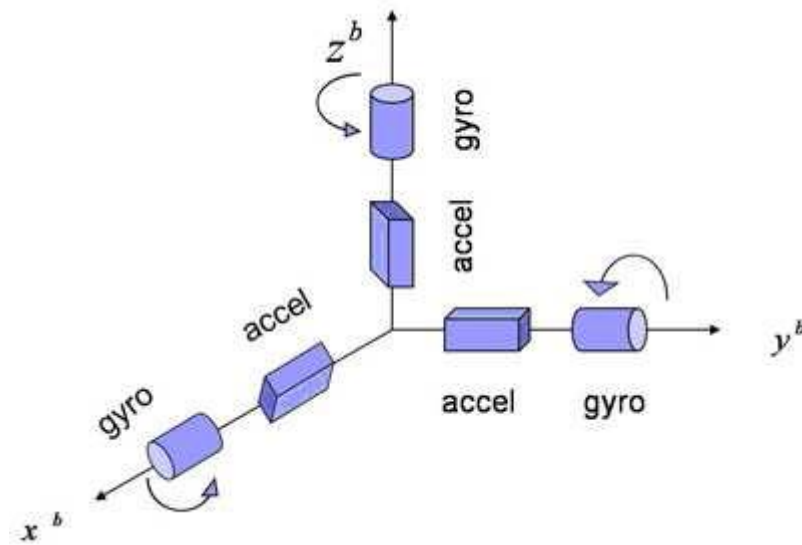
poloha objektu je vyhodnocovaná na základe znalosti počiatkovej polohy a následného kontinuálneho merania zrýchlenia a smeru pohybu v referenčnej sústave. Princíp inerciálnej navigácie je založený na Newtonových zákonoch, ktorými je vyjadrená zmena pohybu pri pôsobení vonkajších síl a zrýchlenie, ktoré je smerovo a veľkosťou proporcionálne pôsobiacej vonkajšej sile.

Prednosti systémov riadenia s IMS

Pri súčasných priestorových nárokoch a efektívnom využití priestoru je robot často nútený pracovať v stiesnených podmienkach. Pohyb nástroja alebo manipulácia s dielmi si vyžaduje veľkú presnosť. Z toho plynú veľké nároky na správnu kalibráciu robotického zariadenia.

Využitím IMS v oblasti kalibrácie sa kalibrácia podstatne zjednoduší. Prínos v oblasti kontroly a merania, ako je napríklad zabránenie náhodným kolíziám robotov, bude významný.

Obr. 1. Základný princíp meracej jednotky INS



Podstatou je systém autonómnej kontroly trajektórie robota s cieľom zamedziť kolíznym stavom. V novej koncepcii sa o kontrolu aktuálnej polohy stará autonómna sústava akcelerometrov a gyroskopov v troch osiach. Progresívnym, doposiaľ nepoužívaným autonómnym spôsobom kontroly polohy robota je použitie INS v systéme riadenia trajektórie robota. Ak by sa poloha robota pravidelne nekalibrovala, odchýlka by neustále rástla a vznikli by veľké rozdiely medzi reálnou polohou robota a naprogramovanou polohou, čo je v praxi neprijateľné.

Autonómnosť navigácie, t.j. nezávislosť na vonkajších zdrojoch navigačnej informácie sa stala dôvodom pre zavádzanie INS. Na rozdiel od všetkých ostatných navigačných systémov je inerciálna navigácia úplne sebestačná a nezávislá na okolitom prostredí, t.j. systém je odolný voči vonkajším vplyvom ako sú magnetické poruchy, elektronické rušenie a skreslenie signálu.

Ak vložíme INS ako nezávislú kontrolu do systému riadenia robota, naprogramovaná poloha bude neustále porovnávaná s jeho reálnou polohou v pracovnom priestore. Poloha robota bude kontinuálne kontrolovaná a kalibrovaná prostredníctvom navigačného počítača. Odchýlka tak nenarastie, čím nevzniknú rozdiely medzi reálnou a naprogramovanou polohou robota.

2. Dáta a metodológia

Metodológia vychádza z 1. a 2. Newtonovho zákona, ktoré vyjadrujú zmenu pohybu a zrýchlenia a pri pôsobení vektorov vonkajších síl F na hmotu m (1. Nz). Súčasne je zrýchlenie smerovo a veľkosťou proporcionálne pôsobiacemu vektoru vonkajšej sily (2. Nz):

$$\mathbf{F} = m \cdot \mathbf{a} \quad 2-1$$

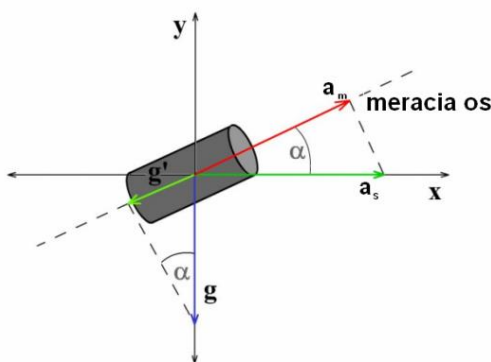
potom je možné integráciou v čase získať okamžitú rýchlosť a určiť dráhu:

$$\mathbf{v}(t) = \mathbf{v}_0 + \int_0^t \mathbf{a}(t) dt \quad 2-2$$

$$\mathbf{s}(t) = \mathbf{s}_0 + \int_0^t \mathbf{v}(t) dt \quad 2-3$$

Pretože je zrýchlenie vektorom, je potrebné snímať zrýchlenie v troch navzájom kolmých osiach, čím sa umožní určenie polohy v XYZ kartézskom súradnom systéme. Pri pohybe pôsobí na objekt aj gravitačné zrýchlenie, treba ho preto z merania eliminovať.

Obr. 1 Vplyv gravitačného zrýchlenia na meranie



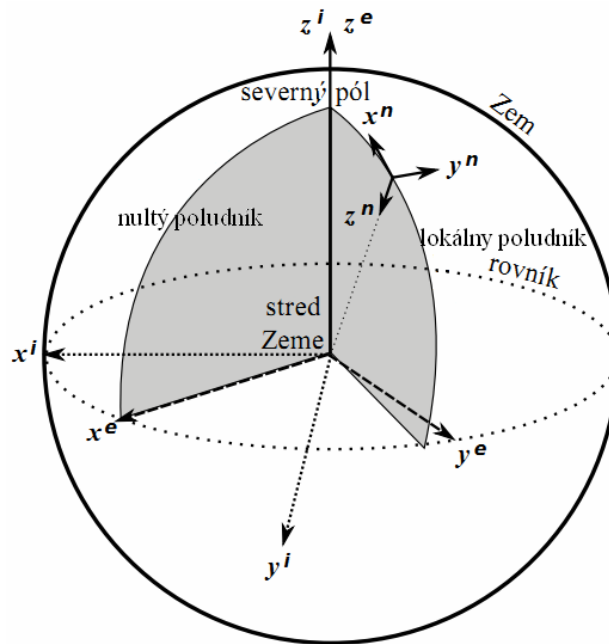
Ak navigačná os (meracia os akcelerometra obr. 2) nie je stotožnená s horizontálnou osou ($\alpha \neq 0$) potom platí:

$$a_m = a_s \cdot \cos \alpha \quad 2-4$$

$$g' = g \cdot \sin \alpha \cong g \cdot \alpha \quad \text{pre } \alpha \rightarrow 0, \text{ kde } g \text{ je gravitačné zrýchlenie} \quad 2-5$$

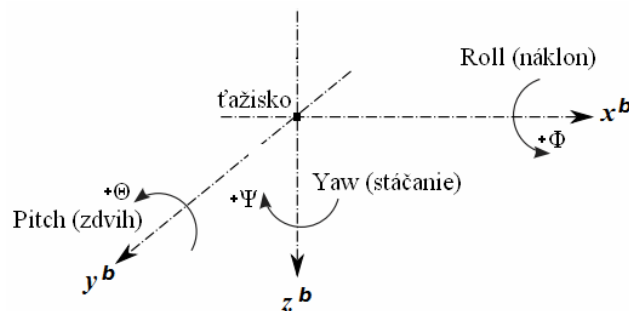
Vzťah (8-5) zároveň určuje chybu jednotlivého merania, ktorá sa bez kompenzácie kumuluje aplikovaním vzťahov (8-2) a (8-3). Preto je potrebné meranie aktuálneho uhla α gyroskopickým snímačom. Požiadavku eliminácie gravitačného zrýchlenia je možné riešiť buď stabilizovanou základňou, alebo použitím gyroskopov tzv. bezkardanovými inerciálnymi navigačnými systémami.

Obr. 2 Súradnicové sústavy: inerciálna (i), zemská (e) a navigačná (n)



Okrem súradnicových sústav zobrazených na obrázku 3 má aj vlastné pohybujúce sa teleso (body) svoj súradnicový systém (x^b, y^b, z^b), ktorého uhlová orientácia sa meria gyroskopmi a príslušné zrýchlenia akcelerometrami. Pri inerciálnej navigácii je preto potrebné realizovať prepočty medzi súradnicovými systémami. Použiteľných je niekoľko matematických metód, napr.: matice smerových kosínusov, pomocou Eulerových uhlov alebo pomocou quaternionov.

Pri orientácii telesa je vhodné dodržiavanie zaužívaných navigačných orientácií, ktoré sú zobrazené na Obr. 3.



Obr. 3 Súradnicový systém telesa

Potom je možné vyjadriť všeobecnú rotáciu R_n^b parciálne pomocou troch rotácií R_x, R_y, R_z okolo osí x^b, y^b, z^b , čo predstavuje použitie metódy Eulerových uhlov:

$R_n^b = R_x R_y R_z$

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad R_z = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2-6

$$R_n^b = R_x R_y R_z$$

Rovnice (8-6) predstavujú prepočet z navigačného súradného systému (n) do súradného systému telesa (b). Prepočet zo súradného systému telesa do navigačného systému sa realizuje podľa vzťahu (8-7).

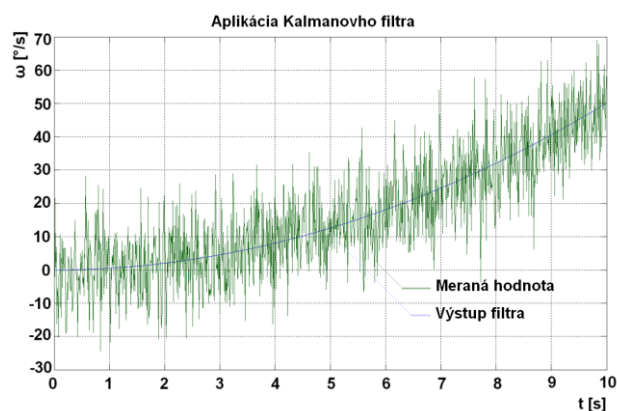
$$R_b^n = R_n^b = R_z^T R_y^T R_x^T$$

2-7

Okrem základných chýb vyplývajúcich z meracích metód je v procese navigácie potrebné eliminovať aj chyby vyplývajúce z meracích akcelerometrov a gyroskopov ako sú najmä skreslenie (bias), zmena rozsahu a šum. Tieto chyby sú rôzne v závislosti na kvalite (cene) senzorov.

Šum meracích senzorov je vážnou chybou, ktorú treba v procese navigácie eliminovať. Z teoretických a praktických prác týkajúcich sa navigácie možno prevziať aplikáciu Kalmanovho filtra na obr. 5 na odstránenie tohto nedostatku pred spracovaním.

Obr. 4 Filtrácia signálu Kalmanovým filtrom



Jadrom inerciálneho navigačného systému je navigačný počítač, ktorý spracováva namerané hodnoty z meracej jednotky, predspracováva ich, transformuje do referenčnej sústavy a vykonáva elimináciu gravitačného a Coriolisovho zrýchlenia. Zároveň vypočítava

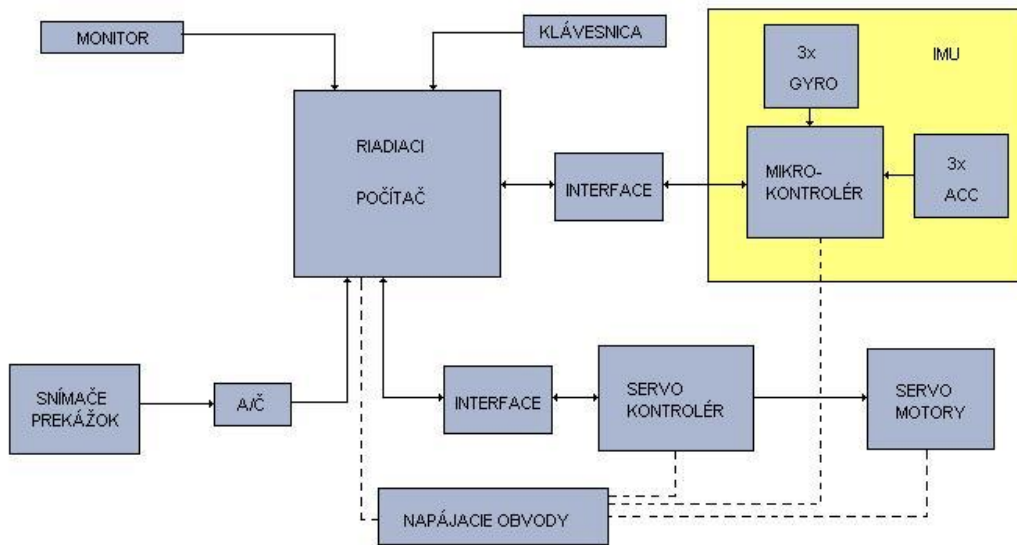
(rovnice (8-2) a (8-3)) na základe počiatočných parametrov (poloha, rýchlosť) polohu navigovaného objektu. Príspevok k navigácii od Coriolisovho zrýchlenia, ako dôsledku rotácie Zeme, sa prejavuje až pri dlhodobej navigácii. Aj keď sa javí proces inerciálnej navigácie principiálne jednoduchý, zahŕňa v sebe riešenie troch diferenciálnych rovníc.

V súčasnej dobe sa vyrábajú inerciálne senzory, ktoré v sebe zahŕňajú 3 gyroskopy a 3 akcelerometre so zabezpečenou presnosťou polohy vzájomného uloženia.

3. Výsledky a diskusia

Ďalšie uplatnenie je možné očakávať v pôvodnom návrhu algoritmu kombinovanej navigácie. Algoritmus musí zohľadňovať použitý procesorový systém a jeho optimalizáciu v prepojení s robotom. Zohľadňuje aj bezpečnosť a ekonomiku prevádzky robota. Na obr. 6 je znázornená koncepčná bloková schéma zapojenia INS v riadení technologického robota všeobecne.

Obr. 6 Koncepčná bloková schéma robota s integrovaným inerciálnym systémom

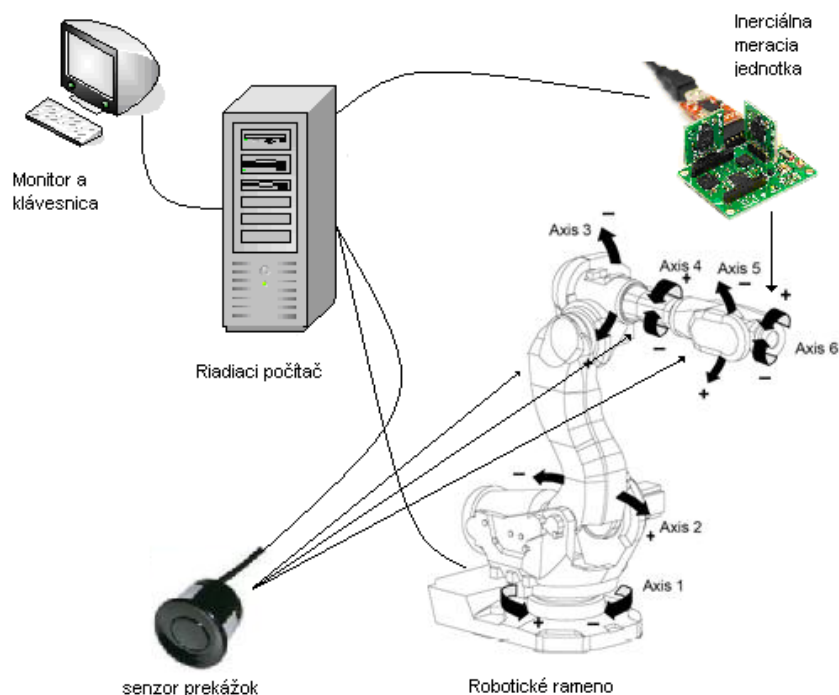


Mikrokontrolér spracováva analógový signál zo senzorov cez ADC porty a konvertuje ich na digitálny signál. Takto spracované údaje na požiadavku *riadiaceho počítača* ďalej posiela cez rozhranie (*interface*) na vstupný/výstupný port. Riadiaci počítač, ako primárna jednotka zapojenia, vyhodnocuje získané údaje o polohe ramena. Robot môže pracovať v manuálnom režime, kedy riadiaci počítač spracováva a vykonáva príkazy obsluhy robota. Manuálne riadenie je možné prostredníctvom klávesnice zadávaním jednotlivých príkazov. V tomto režime sa tiež spracávajú údaje z *IMU*, ktoré sú ukladané do bázy dát na to určenej. Z tejto databázy je potom neskôr možné údaje ďalej spracovávať a porovnávať so živými dátami z *IMU* čo slúži na automatické navádzanie robota.

Na základe spracovaných údajov v automatickom režime, alebo údajov z klávesnice, riadiaci počítač vysiela signály pre servomotory. Signály prijíma servokontrolér cez rozhranie (*interface*), ktorý dáta spracuje a uvedie do pohybu jednotlivé servomotory podľa požiadaviek.

Ďalšou dôležitou súčasťou schémy sú snímače prekážok. Zvlášť dôležité je ich systematické rozmiestenie po ramene robota, aby bolo možné detekovať každú hroziacu kolíziu s cudzím predmetom. Tieto senzory neustále vysielať signál (zvuk, svetlo, atď). Ak sa signál odrazí naspäť do senzora, znamená to, že v okolí robota sa nachádza prekážka. Riadiaci počítač neustále spracováva údaje zo senzorov cez číslicovo analógový prevodník. Ak zistí prekážku, presmeruje robota tak, aby ju obišiel. Sensory snímajú prekážku na 5 cm, čo je postačujúce na včasné upozornenie kolíznej situácie.

Obr. 7 Ilustračná schéma robotického ramena s inerciálnou meracou jednotkou



Z ilustračnej schémy na obr. 7 je zrejmé, že inerciálne snímače budú umiestnené až na poslednej pohybu schopnej súčiastke ramena robota. Je to z toho dôvodu, aby bolo možné dostatočne dobre zosnímať všetky jeho pohyby.

V dnešnej dobe sa v podstate na navigáciu používajú dva systémy INS a GPS, ktoré sa z časového hľadiska vzájomne dopĺňajú. INS poskytuje v krátkom čase vysokú presnosť navigačných údajov, ktoré sa však v dôsledku chyby integrácie v čase postupne znehodnocujú. GPS naopak má krátkodobo nižšiu presnosť, ktorá sa však časom nemení. INS v reálnom čase poskytuje informácie o polohe, rýchlosti a uhle natočenia aj v prípadoch, keď nie je signál GPS dostupný, čo sú časté situácie v prípadoch aplikácií v lesníctve.

Analýza a opis inerciálneho navigačného systému

Inerciálny navigačný systém sa skladá z meracej jednotky obsahujúcej gyroskopy rotujúce okolo troch osí X, Y, Z, ďalej tri akcelerometre pôsobiace v týchto osiach X, Y, Z (Obr. 1) a z navigačného počítača, ktorý vyhodnocuje dáta z meracích zariadení.

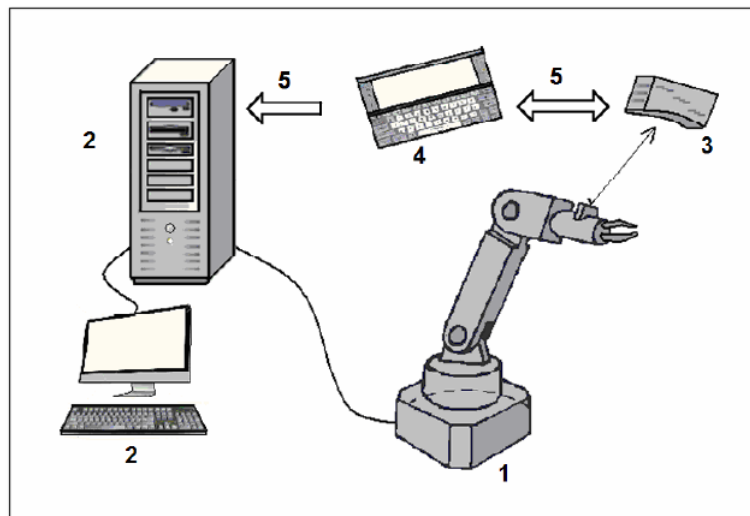
Na obr. 8 je znázornený robot 1, riadený centrálnym počítačom 2. Na vopred definovanom mieste robota 1 je umiestnený autonómny systém INS 3, prepojený s navigačným počítačom 4, ktorý je prepojený sériovým periférnym rozhraním SPI 5 s centrálnym počítačom 2. Takto je možné kontinuálne kontrolovať trajektóriu ale aj polohu sledovaného bodu v pracovnom priestore robota 1.

Ak je definovaná počiatočná poloha robota 1, je definovaná aj počiatočná poloha INS 3 upevneného na robote 1. Pohyb a aktuálna poloha robota 1 riadeného centrálnym počítačom 2 v pracovnom priestore je neustále kontrolovaná a porovnávaná s údajmi autonómneho systému INS 3 o polohe pomocou navigačného počítača 4 cez sériové periférne rozhranie 5.

Navigačný počítač 4 validuje okamžitú polohu robota 1 a prostredníctvom sériového periférneho rozhrania SPI 5 komunikuje s centrálnym počítačom 2 a tak upresňuje reálnu

polohu robota 1. Takýmto spôsobom je poloha robota kontinuálne vyhodnocovaná a upresňovaná autonómny INS. Hovoríme o termíne Reverzná validácia.

Obr. 8. Realizácia systému autonómnej kontroly trajektórie robota



1 – robot, 2 – centrálny počítač, 3 – inerciálny navigačný systém, 4 – navigačný počítač,
5 – sériové rozhranie

Aplikovaním autonómneho systému INS do systému riadenia robota 1 nie sú potrebné snímače polohy. Robot 1 zaznamenáva po opakovanom pohybe odchýlky polohy v porovnaní s naprogramovanou polohou, ktoré s prevádzkovým časom exponenciálne narastajú. Preto aby sa zminimalizovali odchýlky v meraní, je potrebné neustále vykonávať kalibráciu polohy robota systémom autonómnej kontroly trajektórie robota. A tak implementáciou autonómneho systému INS do systému riadenia robota 1 kalibrácia nie je nutná, pretože autonómny systém INS neustále komunikuje s navigačným počítačom 4 cez sériové periférne rozhranie SPI 5. Centrálny počítač 2 vyhodnocuje údaje z navigačného počítača 4 a porovnáva ich s údajmi riadiaceho programu. Vyhodnotením rozdielov v údajoch, znižuje odchýlku na minimum okamžite, v reálnom čase.

4. Záver

Pre priemyselné roboty je orientácia, resp. presné určenie polohy programovaného bodu v priestore nevyhnutnou podmienkou pre možnosť ich pohybu bez kolízie či havárie nielen robotického zariadenia, ale aj prebiehajúceho procesu. V súčasnosti hlavnou orientáciou pre zvýšenie spoľahlivej prevádzky robotizovaných pracovísk vo výrobnéj technike je možnosť integrovať inerciálne navigačné systémy do procesu riadenia a kontroly prevádzky robotických, ale aj ostatných periférnych prostriedkov výrobných systémov.

Novou, doposiaľ neskúmanou metódou kontroly trajektórie robotov, ale aj iných prostriedkov a komponentov vo výrobnéj technike je použitie inerciálnych navigačných systémov na báze hybridných MEMS snímačov, ktoré sa objavili relatívne nedávno. Výskum INS prebieha vo viacerých priemyselných odvetviach súvisiacich s letectvom, raketami, loďami, ale nikto doposiaľ nevyvíjal výskum takýchto systémov implementovaných do oblasti riadenia a kontroly polohy priemyselných robotov v reálnom čase.

Systém autonómnej kontroly trajektórie robota je možné použiť na určenie presnej polohy robota v jeho pracovnom priestore.

Pod'akovanie

Tento príspevok bol podporovaný a vypracovaný v rámci prebiehajúceho projektu VEGA MŠ SR No. 1/0367/15 s názvom: Výskum a vývoj nového systému autonómnej kontroly trajektórie robota a KEGA MŠ SR No. 006STU-4/2015 Vysokoškolská učebnica „Prostriedky automatizovanej výroby“ interaktívnou multimedialnou formou pre STU Bratislava a TU Košice.

Literatúra

- [1] Bishop, H. R. (2006). *The Mechatronics Handbook*, CRC Press.
- [2] Božek, P., & Pivarčiová, E. (2013). Flexible manufacturing system with automatic control of product quality. *Strojiarstvo*, vol. 55, no. 3, 211–221
- [3] Frankovský, P., Hroncová D., Delyová I., & Virgala I. (2013). Modeling of Dynamic Systems Simulation Environment MATLABSimulink – SimMechanics. *American Journal of Mechanical Engineering*, vol. 1, no. 7, 282–288.
- [4] Goga, V., & Božek, P. (2013). Application of INS to mechatronic systems control and regulation using virtual dynamic models. *International Conference on Process Control*, Štrbské Pleso, High Tatras, Slovakia, 85–189.
- [5] Molnár, V., & Fedorko G., & Michalik P. (2011). Computer integrated system for static tests of pipe conveyer belts. *4th Balkan Mining Congress*, Slovenia, Ljubljana, Velenje Coal Mine, 657–661.
- [6] Nikitin, Z. (2007). Diagnostic models of mechatronic modules and analysis techniques. *Proceedings of 2-d International Conference Advances in Mechatronics*. Brno, Czech Republic, 6 p.
- [7] Weber, W. (2009). *Industrieroboter*, HANSER.
- [8] Žalman, M. (2003). *Akčné členy*. Edičné stredisko, STU Bratislava 2003.