

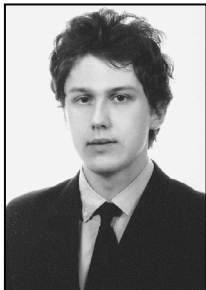
Paweł KOSIŃSKI, Piotr ŚWIĄTEK BRZEZIŃSKI, Rafał OSYPIUK

ZACHODNIOPOMORSKI UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNY W SZCZECINIE, KATEDRA AUTOMATYKI PRZEMYSŁOWEJ I ROBOTYKI
ul. 26 Kwietnia 10, 71-126 Szczecin

Integracja czujników inercyjnych z konstrukcją robota humanoidalnego cz. I

Mgr inż. Paweł KOSIŃSKI

W latach 2005 – 2010 studiował Elektronikę i Telekomunikację na Wydziale Elektrycznym Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Jego zainteresowania naukowe koncentrują się na projektowaniu i sterownikach wbudowanych oraz systemach nawigacji bezwładnościowej. Obecnie jest doktorantem w Katedrze Automatyki Przemysłowej i Robotyki.



e-mail: pkosinski@zut.edu.pl

Mgr inż. Piotr ŚWIĄTEK-BRZEZIŃSKI

W latach 2005 – 2011 studiował Elektronikę i Telekomunikację na Wydziale Elektrycznym, Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Jego głównym obszarem zainteresowań jest projektowanie systemów sterowania z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji. Obecnie jest doktorantem w Katedrze Automatyki Przemysłowej i Robotyki.



e-mail: psb@zut.edu.pl

Streszczenie

W niniejszym artykule przedstawiono założenia projektowe oraz budowę systemu sterowania ruchem dla robota humanoidalnego Futaba RBT-1. Zaprezentowano wykonany sterownik oparty o mikrokontroler z rdzeniem ARM7, wyposażony w interfejs komunikacji do sterowania serwonapędami cyfrowymi, moduły radiowej wymiany danych oraz zestaw czujników inercyjnych. Ponadto zwrócono uwagę na interesującą metodę wyznaczenia wychylenia poruszającego się obiektu względem Ziemi.

Słowa kluczowe: Robot humanoidalny, fuzja sensorów, zmysł równowagi.

Integration of inertial sensors with humanoid robots body. Part I

Abstract

This paper presents a part of the control system of the humanoid robot Futaba RBT-1. The hardware consists of a microprocessor based controller equipped with a communication interface for digital servos in robot legs. The main parts of the controller are: an ARM microcontroller, a wireless communication module TLX2401 and a Bluetooth. There was chosen an advanced sensor ADIS16362 iSensor® which is a complete inertial system that includes a triaxis gyroscope, a triaxis accelerometer and a programmable digital low-pass filter. The robot control system is shown in Fig. 1. In Section 4 the Inertial Navigation System (INS) is described. It uses the data obtained from the accelerometer and gyroscope to calculate the inclination of the robot body in respect to the gravity direction. It is based on "Efficient Orientation Filter" (developed by Dr. Sebastian Madgwick [1]) which despite being computationally efficient gives very good results. Small computational demands allow it to run on a microcontroller with the ARM7 core in real-time which would be difficult with e.g. Extended Kalman Filter. The main control application (described in the second part of this paper) runs on a PC computer. The robot controller radio-communicates with the PC through ISM 2.4GHz radio modules. Furthermore, the controller has a Bluetooth module which enables it to send measurement data for convenient visualisation in the Matlab/Simulink environment.

Keywords: humanoid robot, sensor fusion, sense of balance.

Dr inż. Rafał OSYPIUK

W latach 1994 - 1999 studiował Automatykę i Robotykę na Politechnice Szczecińskiej. W roku 2004 w tej samej dyscyplinie obronił prace doktorską. W ramach odbytych trzech stypendiów DAAD oraz grantu MNiSW "Wsparcia międzynarodowej mobilności naukowców" ściśle współpracuje z Institute for Robotics and Process Control w Braunschweig. Głównym obszarem jego badań są odporne systemy sterowania pozycją oraz siłą dla manipulatorów przemysłowych.

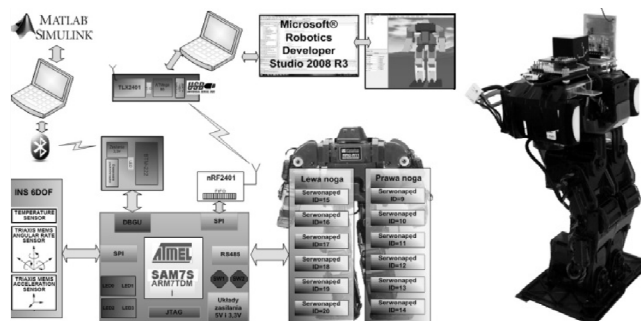


e-mail: rafal.osypiuk@zut.edu.pl

1. Wstęp

Roboty humanoidalne ze względu na swą budowę oraz mobilność, stanowią idealne narzędzie do zastąpienia człowieka w zadaniach, które w swojej realizacji wymagają wielu stopni swobody ruchu. Aby zapewnić wysoką efektywność tych rozwiązań, należy stawić czoła wielu problemom konstrukcyjnym (np. napędy, podatności przegubów, zasilanie itd.), a także algorytmicznych, z których jednym z istotniejszych jest zagadnienie stabilnego przemieszczania i utrzymywania równowagi w niedeterministycznym środowisku. Rozwój techniki komputerowej, oraz rosnąca wydajność obliczeniowa pozwala na tworzenie skomplikowanych modeli kinematycznych wraz z możliwością weryfikacji różnych algorytmów sterowania. Jednak z powodu uproszczeń modelowania, zwłaszcza części dynamicznej (podatność, luz mechaniczny, tarcie itp.), opracowanie i testowanie algorytmów na fizycznym obiekcie odgrywa istotne znaczenie. Potrzeba jednoczesnej symulacji komputerowej oraz testów eksperymentalnych, stała się motywacją do budowy platformy sprzętowo-programowej przeznaczonej do opracowywania algorytmów sterowania robotami humanoidalnymi.

Platforma sprzętowa oparta jest o konstrukcję RBT-1 firmy Futaba [2], która przez autorów została wyposażona w specjalnie zaprojektowany mikroprocesorowy sterownik. Został on ponadto uzupełniony o interfejs do komunikacji z serwonapędami, trójosiowe czujniki przyspieszeń i prędkości kątowych oraz moduły do komunikacji bezprzewodowej. Ogólne działanie systemu oparte jest o aplikację uruchomioną na komputerze PC, która komunikując się z głównym sterownikiem, przesyła komunikaty sterujące na podstawie analizy aktualnych wyników pomiaru. Aplikacja obok pracy w pętli realizuje obliczenia kinematyczne oraz generowanie trajektorii w postaci gładkich funkcji czasu, tworząc ostatecznie w pełni autonomiczny system sterowania. Schemat blokowy platformy sprzętowo – programowej przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat blokowy architektury sterowania oraz system rzeczywisty
Fig. 1. Diagram of the control architecture and the real system

Niniejszy artykuł opisuje projekt sterownika robota, integracji czujników, sposobu wyznaczania aktualnego wychylenia poruszającego się obiektu oraz metody komunikacji z aplikacją sterującą.

2. Platforma mobilna i jej własności

Decydującym kryterium w wyborze robota był rodzaj napędów stosowanych w przegubach kończyn, a w szczególności możliwość odczytu aktualnych parametrów w celu wizualizacji jego stanu oraz wyznaczania wartości zmiennych sterujących. Z tego względu do projektu wybrano robota humanoidalnego RBT1 firmy Futaba, wyposażonego w cyfrowe serwonapędy dedykowane do zastosowań w robotyce. Każda z kończyn dolnych omawianej konstrukcji posiada sześć sterowanych stopni swobody, co w żaden sposób nie ogranicza osiągalności pozycji i orientacji stopy względem tułowia. Każdy z napędów umożliwia ponadto sterowanie poprzez interfejs RS485 half-duplex za pomocą określonego protokołu komunikacji [2]. Topologia magistrali łączącej wszystkie napędy z układem sterowania uprościła sposób połączeń w porównaniu do innych konstrukcji posiadających napędy sterowane sygnałem PWM (Pulse Wide Modulation). Wybrane serwonapędy typu: RS301CR umożliwiły zadawanie pozycji oraz czasu przeznaczonych na jej osiągnięcie, co pozwoliło na generowanie płynnego ruchu. Ponadto pozwoliły one na odczyt takich parametrów jak: pozycja z 12 bitową rozdzielczością, prędkość, obciążenie, temperatura, flagi alarmowe czy rzeczywisty czas realizacji obrotu.

3. Budowa dedykowanego układu sterowania

3.1. Jednostka centralna

Układ sterowania robotem został oparty o mikrokontroler AT91SAM7S z rdzeniem ARM. W wyborze istotnym czynnikiem były peryferia mikrokontrolera, istotne z punktu widzenia aplikacji tj. obsługa kanałów DMA (Direct Memory Access) dla transmisji RS485, zaawansowany kontroler przerwań, wejścia kompatybilne z poziomem napięć TTL (Transistor-Transistor Logic) itp.

Rdzeń ARM7TDMI jest jednym z wielu 32-bitowych rdzeni zaprojektowanych przez firmę ARM o architekturze v4T [3]. Wiele modułów peryferyjnych mikrokontrolera SAM7S zostało zaprojektowanych do przesyłania bloków danych pomiędzy pamięcią SRAM, a modułami peryferyjnymi takimi jak UART, DBGU (Debug Unit) [4], czy SPI. Port DBGU posłużył do wysyłania informacji o statusie wykonywanego programu, do którego został podłączony moduł Bluetooth. Po uruchomieniu programu wysyłane są dane statusowe o inicjacji sterowników układów peryferyjnych i urządzeń podłączonych do mikrokontrolera. Następnie w pętli głównej programu przesyłane są bezustannie wyniki pomiarów z modułu INS z użyciem kanałów DMA.

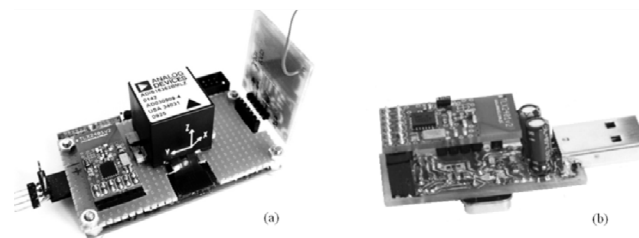
3.2. Wybór czujnika inercyjnego

Jednym z ważnych założeń projektowych była implementacja i weryfikacja praktyczna prostego układu regulacji utrzymywania równowagi robota humanoidalnego posiadającego sprzężenie zwrotne od aktualnych wartości zmiennych przegubowych oraz wychylania. Wymagało to dobrania odpowiedniego zestawu sensorów. Po analizie rynku zdecydowano się na użycie kompletnego systemu czujników inercyjnych ADIS16362 firmy Analog Devices. Zastosowany sensor posiada trójosiowy akcelerometr, trójosiowy żyroskop oraz zintegrowany system wstępnego przetwarzania sygnałów, w skład którego wchodzi: kompensacja wpływu temperatury, linearyzacja charakterystyk czujników oraz eliminacja offsetu [5]. W pracy wykorzystano wbudowane w czujnik filtry cyfrowe FIR do redukcji szumów na wyjściach akcelerometrów, co wyeliminowało konieczność zastosowania filtrów antyaliasingowych w układzie przetwarzania danych z czujnika.

3.3. Komunikacja bezprzewodowa

Autonomiczne sterowanie w czasie rzeczywistym, wymagało zapewnienia szybkiej i stabilnej wymiany danych. Z uwagi na ergonomię testowania algorytmów, postanowiono wykorzystać łączność bezprzewodową w wolnym paśmie ISM (Industry, Science, Medicine – 2.4GHz). Do dwustronnej szybkiej komunikacji wybrano moduły TLX2401 charakteryzujące się przepustowością do 1Mbps, wbudowaną pamięcią FIFO, obsługą do 25 kanałów, zintegrowaną anteną i szeregowym interfejsem SPI. Warto dodać, że moduł samodzielnie generuje i sprawdza CRC (Cyclic Redundancy Check) przesyłanych danych, co zmniejsza ryzyko przekłamań. Kolejną istotną cechą jest tryb ShockBurst [6], którego wykorzystanie przyczyniło się do obniżenia średniego poboru mocy przez moduł oraz zmniejszenie ryzyka kolizji pakietów dzięki przesyłaniu danych z maksymalną prędkością.

Na potrzeby wizualizacji wszystkich danych pomiarowych z napędów oraz czujników, wykorzystano technologię Bluetooth. Jej wybór był podyktowany łatwością integracji, małym zużyciem energii oraz niskim kosztem [7].



Rys. 2. (a) Sterownik z modułami komunikacyjnymi i czujnikiem inercyjnym, (b) Bezprzewodowy moduł komunikacyjny z interfejsem USB
Fig. 2. (a) The controller with communication modules and inertial sensor, (b) Wireless communication module with USB interface

W celu zapewnienia bezprzewodowej komunikacji sterownika robota z aplikacją sterującą, wymagany był odpowiedni interfejs (rys.2). Ponieważ komputer klasy PC nie posiada możliwości bezpośredniego podłączenia transceiver-a TLX2401, zbudowano moduł komunikacyjny z portem USB. Obsługa modułu wymagała zastosowania mikrokontrolera realizującego przetwarzanie danych między magistralą SPI a USB. Wymagania, co do mikrokontrolera nie były krytyczne, przez co zastosowano 8-bitowy układ ATMega88 firmy Atmel.

4. Nawigacja bezwładnościowa i wyznaczenie orientacji

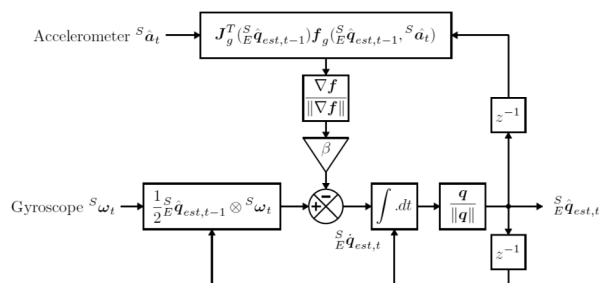
Jedną z najbardziej znanych metod określania orientacji obiektu jest całkowanie pomiarów z żyroskopu, czego wynikiem jest pozycja kątowa. Metoda ta jest skuteczna i prosta w realizacji, jeżeli używane są do tego celu żyroskopy optyczne [8]. Nie można jej jednak zastosować do żyroskopów typu MEMS, ze względu na występowanie dryftu, który objawia się wskazywaniem niezerowej prędkości kątowej w stanie spoczynku. Pomiar odchylenia kątowego za pomocą akcelerometru jest kolejną prostą metodą wyznaczania orientacji obiektu, który nie ma stałego zaczepienia względem ziemi i polega na wykorzystaniu wzorów (1) na kąty Eulera [9]:

$$\begin{aligned} \theta &= \tan^{-1} \left(\frac{X_{accel}}{\sqrt{Y_{accel}^2 + Z_{accel}^2}} \right), \\ \psi &= \tan^{-1} \left(\frac{Y_{accel}}{\sqrt{X_{accel}^2 + Z_{accel}^2}} \right), \\ \phi &= \tan^{-1} \left(\frac{X_{accel}}{\sqrt{Y_{accel}^2 + Z_{accel}^2}} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

Metoda niestety posiada zasadniczą wadę, mianowicie pozwala na pomiar wychylenia obiektów, na które nie działają inne siły oprócz przyspieszenia ziemskiego. Tułów robota jest obiektem, który znajduje się w ciągłym ruchu, co oznacza, że sensor mierzy również dynamiczne przyspieszenia w 3 osiach, co uniemożliwia poprawne wyznaczenie wychylenia. Ponieważ nie istnieje prosta i dokładna metoda wyznaczania wychylenia na podstawie pomiarów przyspieszenia albo prędkości kątowych, w pracy podjęto zadanie budowy systemu nawigacji bezwładnościowej. Problem bezwładnościowej nawigacji obiektu względem określonego punktu istnieje od dawna w wielu dziedzinach techniki takich jak lotnictwo, kosmonautyka, wojsko, robotyka. Obejmuje on m.in. zagadnienie wyznaczenia orientacji obiektu w przestrzeni 3D na podstawie fuzji pomiarów dokonanych wieloosiowym akcelerometrem i żyroskopem.

W systemach INS (Inertial Navigation System) powszechnie wykorzystywany jest filtr Kalmana [10]. Jest to najpopularniejsza z metod estymacji statycznie optymalnej. Ogólna zasada działania polega na matematycznej implementacji estymacji i korekty mierzonego parametru z jednoczesną minimalizacją błędów estymacji. Umożliwia ona wyznaczenie niedostępnych pomiarowo parametrów na podstawie bieżących wartości wielkości pomiarowo dostępnych oraz znajomości modelu matematycznego łączącego ze sobą te grupy pomiarów. Jedną z wad filtru jest konieczność częstego przeliczania pomiarów, a sam algorytm jest stosunkowo złożony. Ze względu na ograniczoną wydajność obliczeniową mikrokontrolera, w projekcie zrealizowano system INS w oparciu o wydajny filtr orientacji opracowany przez Madgwick'a [1].

Zastosowany filtr orientacji (rys. 3) wykorzystuje reprezentację kwaternionową [1], umożliwiającą na podstawie dokonanych pomiarów z żyroskopów i akcelerometrów, w uzyskanym analitycznie i zoptymalizowanym metodą gradientu prostego algorytmie do obliczania kierunku błędów pomiarowych żyroskopów, jako pochodną kwaternionu. Błąd pomiaru z żyroskopów jest niwelowany poprzez estymowany błąd wyliczony na podstawie pomiarów z akcelerometrów [1].



Rys. 3. Schemat blokowy kompletnego filtra orientacji
Fig. 3. Block diagram of the complete orientation filter

Estymowany kwaternion orientacji sensora pozwala na obliczenie kątów Eulera ψ , θ , ϕ według następujących wzorów:

$$\psi = \text{Atan2}(2(q_2q_3 - q_1q_4), 2q_1^2 - 1 + 2q_2^2) \quad (2)$$

$$\theta = -\sin^{-1}(2(q_2q_4 - q_1q_3)) \quad (3)$$

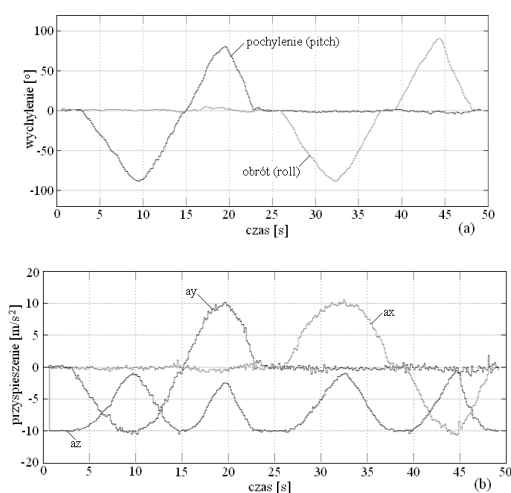
$$\phi = \text{Atan2}(2(q_3q_4 - q_1q_2), 2q_1^2 - 1 + 2q_4^2) \quad (4)$$

Pasma przepustowe filtru zostało ustalone eksperymentalnie na 16Hz. Wydajny filtr do określania orientacji został zaimplementowany w sterowniku zgodnie ze schematem z rys. 3 w języku C. Wartość β użyta w filtrze została dobrana doświadczalnie.

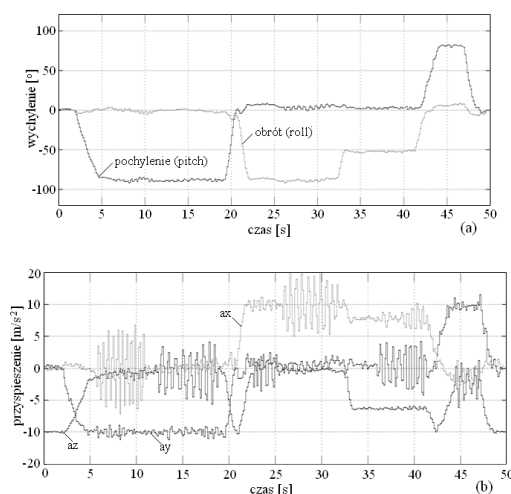
5. Wyniki eksperymentalne

Do wygodnej prezentacji wyników pomiarów systemu nawigacji bezwładnościowej posłużono się środowiskiem symulacyjnym Matlab/Simulink. Jak wyżej wspomniano użyto komunikacji

Bluetooth do przesyłania danych bezprzewodowo ze sterownika robota do komputera PC w celu wizualizacji. Poniższe wyniki pomiarów prezentują działanie i możliwości filtru do określania orientacji. Pomiary przyspieszeń i wychylenia były dokonane jednocześnie podczas ruchu robota. Wartości wychyleń są wyskalowane w stopniach $[\circ]$, natomiast wartości przyspieszeń w m/s^2 . Na rys. 4 (a) zaprezentowano uzyskane wartości wychylenia podczas wolnego pochylania robota w dwóch płaszczyznach: przód-tył (pitch), prawy-lewy bok (roll) oraz towarzyszące mu przyspieszenia rys. 4 (b).



Rys. 4. (a) Pomiar wychylenia. (b) Pomiar przyspieszeń
Fig. 4. (a) Measurement of tilt. (b) Measurement of acceleration



Rys. 5. (a) Pomiar wychylenia. (b) Pomiar przyspieszeń
Fig. 5. (a) Measurement of tilt. (b) Measurement of acceleration

Na rys. 5 (a) przedstawiono pomiar wychylenia podczas dynamicznego poruszania robotem w trzech osiach oraz odpowiadające mu przyspieszenia rys. 5 (b). Można zauważyć, iż dzięki zastosowanej metodzie duże zmiany przyspieszeń nie wpływają na wynik pomiaru wychylenia. Stwierdzono również, że zaprojektowany system nawigacji bezwładnościowej generuje poprawne wyniki w stanie spoczynku tj. przy braku jakiegokolwiek ruchu. Za stabilność odpowiada sam filtr oraz wewnętrzna kalibracja użytego sensora.

6. Wnioski

W artykule przedstawiono konstrukcję dedykowanego sterownika opartego o mikrokontroler z rdzeniem ARM7 do rozwiązania problemu balansowania dla robota humanoidalnego RBT-1 firmy Futaba. W konstrukcji zintegrowano system nawigacji bezwładnościowej.

ściowej zbudowany w oparciu o zaawansowany układ pomiarowy ADIS16362 firmy Analog Devices. Implementacja efektywnego filtra orientacji, pozwoliła na wyliczenie wychylenia robota w dwóch płaszczyznach w czasie rzeczywistym. Fuzja pomiarów pozwoliła skutecznie niwelować dryft żyroskopów oraz wpływ dynamicznych przyspieszeń na wynik pomiaru. Zaimplementowany protokół komunikacyjny umożliwił bezprzewodowe sterowanie robotem ze sprzężeniem zwrotnym od aktualnej pozycji oraz podgląd stanu robota w środowisku symulacyjnym Matlab/Simulink. Sterownik jest dedykowany głównie dla celów dydaktycznych i ma stanowić platformę testową dla prostych algorytmów utrzymywania równowagi robotów kroczących. Przedstawione w artykule zagadnienia stanowią elementy pracy dyplomowej [11]. Uzupełnieniem prezentowanych treści jest część II niniejszego artykułu.

7. Literatura

- [1] Madgwick S.O.H.: An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays. [online]. Available: http://www.xio.co.uk/res/doc/an_efficient_orientation_filter_for_inertial_and_inertialmagnetic_sensor_arrays.pdf
- [2] http://www.robotshop.com/PDF/RBT-1_Operation_Manual.pdf, instrukcja obsługi robota Futaba RBT-1, 2007.
- [3] http://www.atmel.com/Images/DDI0029G_7TDMI_R3_trm.pdf, ARM®. ARM7TDMI (rev 3) Technical Reference Manual, 2001.
- [4] Augustyn J.: Projektowanie systemów wbudowanych na przykładzie rodziny SAM7S z rdzeniem ARM7TDMI, Wydawnictwo IGSMiE PAN, 2007.
- [5] http://www.analog.com/static/importedfiles/data_sheets/ADIS16362.pdf, ADIS16362, Six Degrees of Freedom Inertial Sensor, 2009.
- [6] <http://www.kontest.ru/datasheet/nvlsi/nrf2401ag.pdf>, nRF2401AG, Single chip 2.4 GHz Transceiver, 2004.
- [7] http://www.mydarc.de/dl3hrt/AS519-dateien/btm222_datasheet.pdf, BTM222, Class1 BC04-ext Module, 2005.
- [8] Baerveld A.-J., Klang R.: A Low-cost and Low-weight Attitude Estimation System for an Autonomous Helicopter, Intelligent Engineering Systems, 1997. INES '97. Proceedings, pp. 391 – 395, 1997.
- [9] Christopher J. Fisher. Using an Accelerometer for Inclination Sensing, Analog Devices, Technical Note, 2010.
- [10] Welch G., Bishop G.: An Introduction to the Kalman Filter, Department of Computer Science University of North Carolina, TR 95-041, July 24, 2006.
- [11] Kosinski P., Świątek Brzeziński P.: Integracja zaawansowanych sensorów z konstrukcją robota humanoidalnego. Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, praca dyplomowa, 2011.

otrzymano / received: 23.03.2012

przyjęto do druku / accepted: 01.11.2012

artykuł recenzowany / revised paper

INFORMACJE

Regionalne Seminary / Szkolenia dla Służb Utrzymania Ruchu

www.energoelektronika.pl
WORTAL BRANŻOWY

2013

21.02.2013 - Kraków

28.03.2013 - Stalowa Wola

18.04.2013 - Wałbrzych

23.05.2013 - Rzeszów

20.06.2013 - Trójmiasto

10.10.2013 - Bydgoszcz

04.12.2013 - Warszawa



Jeżeli jesteś zainteresowany uczestnictwem w Seminarium, zaprezentowaniem produktu lub nowego rozwiązania napisz do nas: marketing@energoelektronika.pl
Energoelektronika.pl tel. (+48) 22 70 35 291

Ilość miejsc ograniczona

Partnerzy:

