

doi:10.15199/48.2015.06.35

Zastosowanie tanich czujników inercyjnych w układzie regulacji kąta pochylenia pojazdu balansującego

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań związanych z możliwością wykorzystania niskokosztowych sensorów inercyjnych w układzie stabilizacji pozycji pionowej oraz zadanego kierunku jazdy robota balansującego. Testowany układ sterowania zbudowano w oparciu o płytke uruchomieniową mikrokontrolera serii STM32F3 z rdzeniem Cortex-M4 wyposażoną w trójosiowy akcelerometr, magnetometr i żyroskop. Do określenia dokładności estymacji kąta nachylenia, przeprowadzono testy porównawcze na stanowisku z enkoderm impulsowym.

Abstract. The paper presents results of research related to the potential use of low-cost sensors, inertial stabilization system vertical position and specified direction balancing robot. Tested control system was built based on the start up board microcontroller series STM32F3 Cortex-M4 equipped with a triaxial accelerometer, magnetometer and gyroscope. To determine the accuracy of the estimation of the angle of inclination, comparative tests were carried out on a bench with a pulse encoder. (**Low-cost inertial sensors in the system stabilization of balancing robot**).

Słowa kluczowe: odwrócone wahadło, sensory MEMS, fuzja danych, sterowanie.

Keywords: inverted pendulum, MEMS, sensor fusion, control hardware.

Wstęp

Od ponad 15 lat wielu producentów elementów elektronicznych rozwija technologię miniaturowych urządzeń elektromechanicznych, czyli MEMS. Wraz z jej szybkim rozwojem, pojawiły się też nowe możliwości ich wykorzystania. W ofercie producentów znajduje się wiele rodzajów czujników, z których najważniejsze to akcelerometry, żyroskopy, czujniki ciśnienia. Zastosowanie tego typu elementów jest bardzo szerokie od telefonów komórkowych, kontrolerów gier, przez nawigację GPS, układy samochodowe po sprzęt medyczny czy przemysłowy.

Obecnie cena wspomnianych sensorów wykorzystywanych w sprzęcie powszechnego użytku jest relatywnie niska i zazwyczaj nie przekracza kilku dolarów. Należy jednak zwrócić uwagę, że sensory MEMS przeznaczone do profesjonalnych aplikacji są oferowane w cenach ponad stukrotnie wyższych. Przykładem mogą tu być dość popularne w publikacjach naukowych [1,2,3,4] elementy kompletnej jednostki inercyjnej (inertial measurement unit - IMU) rodziny ADIS16xxx firmy Analog Devices, które w swej strukturze zawiera trójosiowy akcelerometr, magnetometr i żyroskop, oraz czujnik ciśnienia. Ponadto w układach tych zaimplementowano rozszerzony filtr Kalmana (EFK) na potrzeby fuzji danych pomiarowych z akcelerometru, magnetometru i żyroskopu.

W przypadku tanich sensorów MEMS produkowanych masowo do sprzętu powszechnego użytku, jak telefony komórkowe czy kontrolery gier, można spodziewać się gorszych parametrów metrologicznych, które mogą ograniczać możliwości ich wykorzystania. W literaturze dotyczącej zagadnienia stabilizacji pojazdów balansujących rzadko można znaleźć rozwiązania wykorzystujące najtańsze czujniki inercyjne [5]. Zazwyczaj projekty takie realizowane były w ramach prac dyplomowych. Z ich opisów często wynika, że ich twórcy mieli pewne problemy z zapewnieniem stabilności konstruowanych pojazdów. Stabilność projektowanych pojazdów balansujących zależy od wielu czynników, między innymi także od nastaw regulatora PID czy dynamiki układu napędowego. W związku z powyższym przeprowadzono badania związane z możliwością wykorzystania tanich sensorów inercyjnych MEMS w układzie stabilizacji pozycji pionowej oraz kierunku ruchu prostego modelu pojazdu balansującego.

Płytki uruchomieniowa

Do przeprowadzenia testów wspomnianych sensorów wytypowano gotową płytkę uruchomieniową 32-bitowego

mikrokontrolera STM32F303CTV6 z rdzeniem ARM Cortex-4M o nazwie handlowej STM32F3DISCOVERY firmy STMicroelectronics. Na płytce oprócz mikrokontrolera znajdują się dwa układy przetworników MEMS. Pierwszy z nich L3GD20 jest trójosiowym żyroskopem z cyfrowym wyjściem sygnału realizowanym za pomocą szeregowego interfejsu SPI bądź I2C. Drugi układ LSM303DLH zawiera w obudowie trójosiowy akcelerometr oraz trójosiowy magnetometr. Cyfrowe wyjście sygnału zrealizowano za pomocą interfejsu szeregowego I2C. Producent informuje, że przetwornik akcelerometru został wstępnie skalibrowany na etapie produkcji. W przypadku magnetometru, kalibrację choćby zgrubną należy wykonać samodzielnie gdyż z przeprowadzonych doświadczeń wynika, że osie XYZ przetwornika w znacznym stopniu nie są do siebie prostopadłe. Producent w specyfikacjach technicznych elementów podaje typowe parametry, ale ich nie gwarantuje.

Fuzja danych

W przypadku układu sterowania stabilizacji pionowej pojazdu balansującego, wymagany jest pomiar wartości chwilowej kąta pochylenia pojazdu w czasie rzeczywistym. Jeśli pojazd ma zachowywać się stabilnie, wymagana jest niepewność pomiaru kąta pochylenia pojazdu mniejsza niż 1 stopień kątowy.

Mierzone wartości przyspieszeń liniowych otrzymane z akcelerometru obarczone są dodatkowymi błędami o charakterze przypadkowym: szum przetworników i toru pomiarowego oraz niepożądane drgania napędu pojazdu. Zastosowanie filtracji dolnoprzepustowej szczególnie filtrami wyższego rzędu, powoduje opóźnienie sygnału i wystąpienie błędu dynamicznego pomiaru kąta pochylenia.

Żyroskop umożliwia pomiar prędkości kątowej względem wybranej osi, jednak jest on obciążony błędem zera (bias) oraz błędami przypadkowymi. W celu wyznaczenia kąta pochylenia można scałkować prędkość kątową po czasie. Proces ten praktycznie wyeliminuje szum, ale błąd zera spowoduje narastający w czasie błąd kąta pochylenia (dryft). Aby wyeliminować błąd zera należałoby sygnał prędkości kątowej poddać filtracji górnoprzepustowej.

W opisywanym przypadku, do estymacji kąta pochylenia pojazdu wykorzystuje się w praktyce ideę fuzji sensorycznej, w której w jednym algorytmie integruje się dane pomiarowe z różnych czujników [6,7,8,9,10]. Jednym ze sposobów korygowania wyznaczonej wielkości kąta

pochylenia jest wykorzystanie filtrów komplementarnych. Częściej jednak w praktyce fuzja danych realizowana jest z wykorzystaniem filtra Kalmana, pozwalającego na estymowanie wielkości niemierzalnych na podstawie dostępnych sygnałów oraz modelu procesu [8,9].

W przeprowadzonych badaniach sprawdzono zarówno przydatność prostego filtra komplementarnego jak i filtra Kalmana.

Filtr komplementarny

W eksperymencie fuzji danych do wyznaczenia kąta pochylenia, jako najprostsze narzędzie, wykorzystano dyskretny filtr komplementarny pierwszego rzędu opisany następującym wyrażeniem:

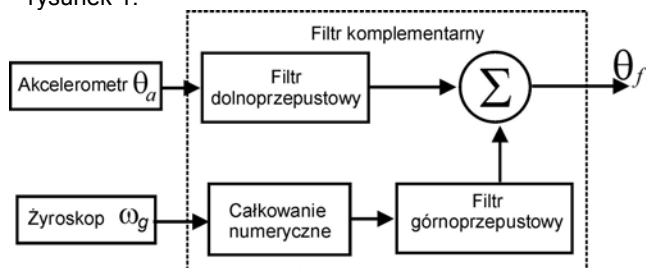
$$(1) \quad \theta_f[k] = a(\theta_f[k-1] + \omega_g[k] \cdot \Delta t) + (1-a)(\theta_a[k])$$

przy czym stała czasowa filtra:

$$(2) \quad \tau = \frac{a}{1-a} \Delta t$$

gdzie: θ_f - pochylenie kątowe na wyjściu filtra, θ_a - pochylenie kątowe akcelerometru, ω_g - prędkość kątowa żyroskopu, a - współczynnik filtra, Δt - okres próbkowania, k - wybrana chwila czasu.

Działanie filtra komplementarnego opisanego wyrażeniem (1) można przedstawić schematem blokowym – rysunek 1.



Rys.1. Schemat działania filtra komplementarnego

Filtr Kalmana

Filtr Kalmana jest typem filtracji optymalnej rekursywnej. Optymalność filtra jest uzyskiwana poprzez uwzględnienie wszystkich dostępnych pomiarów danej wielkości fizycznej niezależnie od ich dokładności. Wynikiem filtracji jest estymacja stanu mierzonego układu. W celu wyznaczenia estymaty poszukiwanej wartości należy opisać proces jak i system pomiarowy odpowiednimi równaniami:

$$(3) \quad \mathbf{x}_k = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}_{k-1} + \mathbf{w}_{k-1}$$

$$(4) \quad \mathbf{z}_k = \mathbf{H} \cdot \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k$$

gdzie: \mathbf{A} - macierz stanu, \mathbf{B} - macierz wymuszenia stanu, \mathbf{w}_{k-1} - szum procesu, \mathbf{H} - macierz wiążąca pomiar ze stanem, \mathbf{v}_k - zakłócenia pomiaru.

Proces obliczeń filtra Kalmana jest procesem ciągłym i polega na cyklicznym obliczeniu estymaty wektora stanu oraz jego kowariancji i składa się dwóch etapów (faz): predykcji i korekcji.

Faza predykcji:

Prognozowanie wartości stanu a priori:

$$(5) \quad \hat{\mathbf{x}}_k^- = \mathbf{A} \cdot \hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}_{k-1}$$

gdzie: $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}$ - wektor stanu w poprzednim kroku, \mathbf{u}_{k-1} - wektor wymuszenia, \mathbf{A} - macierz sterowania, \mathbf{B} - macierz wymuszenia.

Prognozowanie wartości a priori macierzy kowariancji błędów filtracji:

$$(6) \quad \mathbf{P}_k^- = \mathbf{A} \cdot \mathbf{P}_{k-1} \cdot \mathbf{A}^T + \mathbf{Q}$$

gdzie: \mathbf{P}_{k-1} - macierz kowariancji błędów filtracji w poprzednim kroku, \mathbf{Q} - macierz wariancji procesu.

Faza korekcji:

Wyznaczenie wzmocnienia Kalmana:

$$(7) \quad \mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \cdot \mathbf{H}^T \cdot (\mathbf{H} \cdot \mathbf{P}_k^- \cdot \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}$$

gdzie: \mathbf{R} - macierz wariancji pomiaru.

Korekcja wektora stanu z uwzględnieniem wektora pomiaru:

$$(8) \quad \hat{\mathbf{x}} = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k \cdot (\mathbf{z}_k - \mathbf{H} \cdot \hat{\mathbf{x}}_k^-)$$

Korekcja macierzy kowariancji błędów filtracji:

$$(9) \quad \mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \cdot \mathbf{H}) \mathbf{P}_k^-$$

gdzie: \mathbf{I} - macierz jednostkowa.

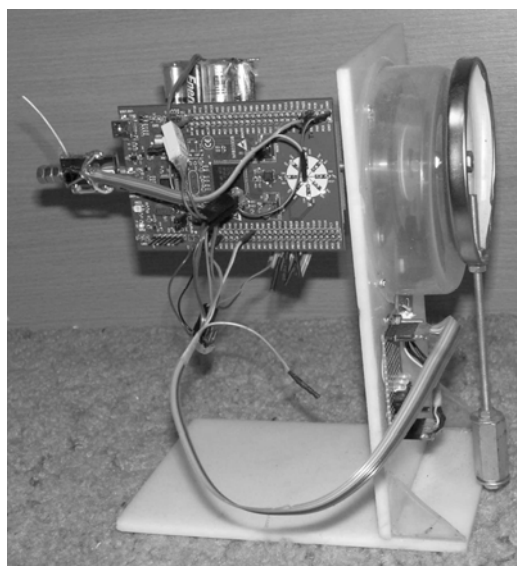
Dla omawianego przypadku estymacji kąta pochylenia pojazdu balansującego, zdefiniowano równanie systemu o następującej postaci:

$$(10) \quad \theta_k = \theta_{k-1} + (\omega_{k-1} - g_{bias}) \cdot \Delta t$$

gdzie: θ - pochylenie kątowe, g_{bias} - dryf żyroskopu ω - prędkość kątowa stanowiąca sterowanie u w wyrażeniu (3).

Stanowisko do weryfikacji estymacji kąta pochylenia

W prezentacjach realizowanych projektów pojazdów balansujących zazwyczaj zestawiane są wyniki z pomiarów przebiegów czasowych wyznaczonego kąta pochylenia otrzymanych z akcelerometru, scałkowana wartość prędkości kątowej żyroskopu oraz wartość estymowana kąta oparta na fuzji danych. Niestety żaden z tych przebiegów nie prezentuje rzeczywistej wielkości kąta pochylenia. Wstępny dobór parametrów filtra jedynie na podstawie oszacowania odchylenia standardowego obserwowanych zakłóceń lub obserwacji „wygładzenia” przebiegu kąta estymowanego może być niewystarczający. Niewłaściwy dobór parametrów filtra może prowadzić do znaczącego opóźnienia sygnału kąta estymowanego tak, że „strojenie” regulatora PID nie zapewni stabilności układu regulacji. Dlatego w pracy zaproponowano proste stanowisko do eksperymentalnej weryfikacji estymowanego kąta pochylenia. Rozwiązanie to pozwala zaobserwować efektywność procesu pomiaru i fuzji danych.



Rys.2. Widok stanowiska do eksperymentalnej weryfikacji estymowanego kąta pochylenia

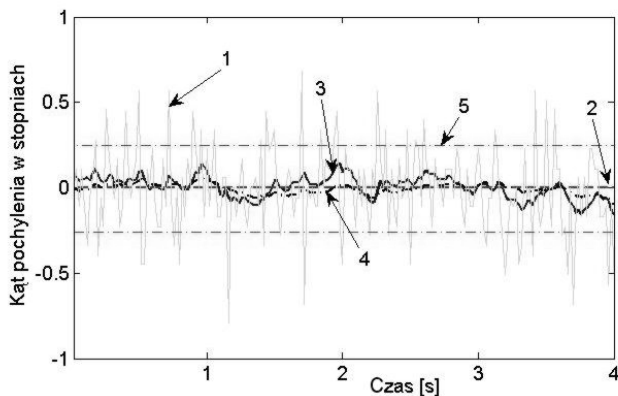
Na rysunku 2 przedstawiono widok stanowiska do eksperymentalnej weryfikacji estymowanego kąta

pochylenia płytki uruchomieniowej. Stanowisko tworzy pionowa płyta przymocowana sztywno do podstawy. W płycie pionowej osadzono piastę z umieszczonym prętem tworzącym oś obrotu. Na osi osadzono tarczę optycznego enkodera obrotowo-impulsowego, jakie można znaleźć w popularnych drukarkach atramentowych. Czujniki optyczne enkodera umieszczono na płycie pionowej. Rozdzielczość wykorzystanego enkodera wynosi 7200 imp/obr, czyli 0,05 stopnia kąтового (deg). Przyjęto, że niepewność pomiaru jest nie większa niż rozdzielczość. Na końcu osi za enkoderem zamontowano koło z dodatkowym obciążeniem na ramieniu zapewniającym stabilną pozycję „0”. Dłuższa część osi przeznaczona jest na przymocowanie testowanej płytki uruchomieniowej.

Płytką uruchomieniową mikrokontrolera może zarówno być zasilana z „zewnątrz” za pośrednictwem miękkich przewodów lub z baterii przymocowanej do płytki. Komunikacja z komputerem nadrzędnym może odbywać poprzez kabel interfejsu RS232 i konwerter USB, lub można wykorzystać połączenie bezprzewodowe poprzez moduł Bluetooth BTM222.

Wyniki weryfikacji estymacji kąta pochylenia

W eksperymencie wstępnie dokonano pomiarów kąta pochylenia dla płytki uruchomieniowej pozostającej w stanie spoczynku w pozycji „0”. Na rysunku 3 przedstawiono przebiegi czasowe kąta pochylenia wyznaczone odpowiednio: na podstawie sygnału z akcelerometru - 1, wartości rzeczywistej wyznaczonej z enkodera - 2, wartości estymowanej filtrem komplementarnym - 3, wartości estymowanej filtrem Kalmana - 4 oraz zaznaczono wyznaczoną wartość odchylenia standardowego dla otrzymanego sygnału z akcelerometru - 5. Ze względu na występujący bias żyroskopu $g_{bias} \approx 0,7 \text{ deg/s}$, nie zaprezentowano na wykresie przebiegu całkowanego sygnału z żyroskopu.

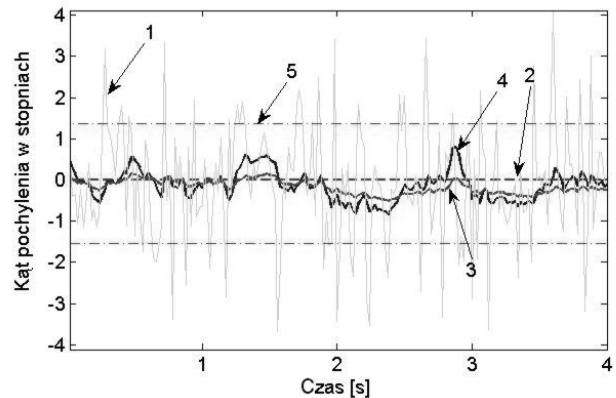


Rys.3. Przebiegi czasowe kąta pochylenia – badania statyczne

Aby zbadać wpływ zakłóceń generowanych przez napęd pojazdu na wyniki wskazań czujników, na płycie uruchomieniowej przymocowano miniaturowy serwonapęd modelarski wymuszając jego pracę w trybie nawrotnym. Dokonano rejestracji wspomnianych wcześniej wyznaczonych przebiegów kąta pochylenia. Na rysunku 4 przedstawiono przebiegi czasowe kąta pochylenia wyznaczone odpowiednio: na podstawie sygnału z akcelerometru - 1, wartości rzeczywistej wyznaczonej z enkodera - 2, wartości estymowanej filtrem komplementarnym - 3, wartości estymowanej filtrem Kalmana - 4 oraz zaznaczono wyznaczoną wartość odchylenia standardowego dla otrzymanego sygnału z akcelerometru - 5.

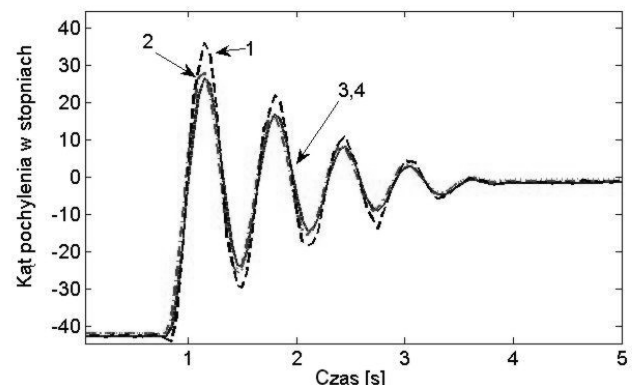
Na podstawie oszacowanych wielkości odchylenia standardowego oraz zaobserwowanego widma

amplitudowego z sygnału akcelerometru dokonano wstępnego dostrojenia filtrów komplementarnego i Kalmana.



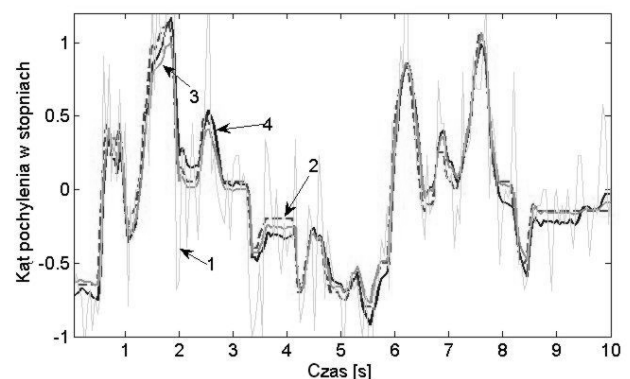
Rys.4. Przebiegi czasowe kąta pochylenia – badania statyczne z dodatkowym zakłóceniem

Następnie zbadano wyniki estymacji kąta pochylenia dla przypadku pochylenia płytki uruchomieniowej. Przy czym obciążenie przymocowane do osi obrotu wykonywało naturalne ruchy wahadłowe. Dokonano rejestracji wspomnianych wcześniej wyznaczonych przebiegów kąta pochylenia – rysunek 5.



Rys.5. Przebiegi czasowe kąta pochylenia – badania dynamiczne, ruch wahadłowy

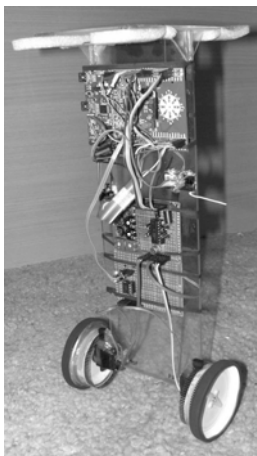
W dalszej kolejności zbadano wyniki estymacji kąta pochylenia dla przypadku pochylenia płytki uruchomieniowej. Przy czym obciążenie przymocowane do osi obrotu wykonywało ograniczone ruchy wahadłowe – efekt „szarpania”. Dokonano rejestracji wspomnianych wcześniej wyznaczonych przebiegów kąta pochylenia – rysunek 6.



Rys.6. Przebiegi czasowe kąta pochylenia – badania dynamiczne, „szarpanie”

Prototyp pojazdu balansującego

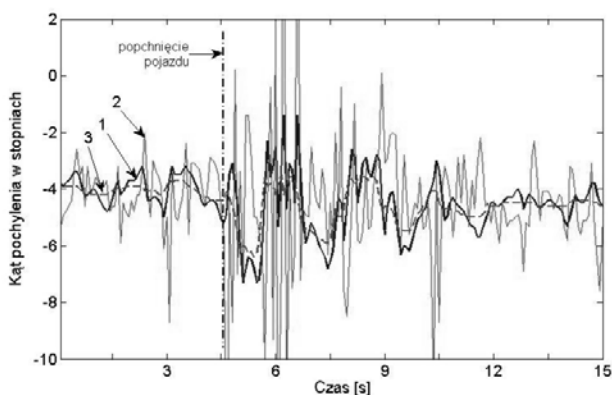
W celu przeprowadzenia eksperymentu potwierdzającego przydatność tanich sensorów inercyjnych w pojazdach balansujących, zbudowano prosty prototyp dwukołowego pojazdu przedstawiony na rysunku 7.



Rys. 7. Prototyp pojazdu balansującego

W prototypie pojazdu umieszczono następujące elementy i podzespoły: akumulatory NiCd 4x1,2 V, płytkę uruchomieniową mikrokontrolera, odbiornik IR umożliwiający sterowanie pilotem, moduł radiowy Bluetooth BTM-222, płytkę dwóch mostków H do silników napędu prądu stałego, płytkę potencjometrów montażowych ułatwiających dobór nastaw, płytkę układu kondycjonowania sygnałów z enkoderów impulsowych zamontowanych na kołach pojazdu. Do napędu kół wykorzystano zmodyfikowane miniaturowe serwomechanizmy modelarskie.

Mikrokontroler pojazdu oprogramowano z użyciem języka C. Częstotliwość wykonywania pętli głównej programu wynosi 100 Hz. W pętli głównej następuje odczyt wielkości mierzonych przez akcelerometr, magnetometr i żyroskop. Następnie odpowiednie wartości sygnałów mierzonych podlegają przetworzeniu w zaimplementowanych algorytmach filtru komplementarnego lub Kalmana. Estymowane wielkości kąta pochylenia pojazdu po odjęciu od wartości zadanej trafiają na wejście dyskretnego regulatora PID. Ponadto zaimplementowano dyskretny regulator PID prędkości zadanej pojazdu, który steruje wartością zadaną kąta pochylenia pojazdu.



Rys. 8. Przebiegi czasowe kąta pochylenia pojazdu

Wyniki eksperymentu

W prezentowanym eksperymencie zbadano stabilność pionową pojazdu dla prędkości zadanej równej zero. Badania przeprowadzono dla przypadków twardego i

równego podłoża oraz miękkiego i nierównego, jakie stanowiła wykładzina dywanowa. Ponadto, w trakcie przeprowadzania testu stabilności, na platformie ładunkowej pojazdu umieszczano niesymetrycznie dodatkowe obciążenie, badano także zachowanie się pojazdu na próby wytrącenia go z równowagi poprzez popchnięcia platformy ładunkowej. Otrzymano zadowalające wyniki badań stabilności pionowej pojazdu dla wszystkich rozpatrywanych przypadków. Dla przykładu, na rysunku 8 zaprezentowano wyznaczone chwilowe przebiegi kąta pochylenia pojazdu: 1 – estymowane z użyciem filtru komplementarnego i filtru Kalmana (obydwa przebiegi praktycznie pokrywają się), 2 - wyznaczony na podstawie danych z akcelerometru, 3 – wartości zadanej kąta dla regulatora pochylenia pojazdu.

Wnioski

Na podstawie otrzymanych wyników weryfikacji estymowanego kąta pochylenia oraz obserwacji stabilności pionowej pojazdu balansującego, można uznać, że testowane tanie przetworniki akcelerometru oraz żyroskopu mogą być aplikowane w układach sterowania stabilizacji pionowej pojazdów bądź robotów balansujących. Małe kąty pochylenia występujące w przypadku przedstawianej aplikacji, powodują, że nie występuje w modelu znacząca nieliniowość, zatem wystarczającym jest wykorzystanie w fuzji danych filtru komplementarnego lub liniowego filtru Kalmana. W dalszych badaniach testowane będą możliwości trakcyjne pojazdu balansującego oraz zostanie podjęta próba wykorzystania metod sztucznej inteligencji [11] w układzie sterowania oraz zastosowane zostaną napędy bezpośrednie z silnikami BLDC (brak motoreduktora).

LITERATURA

- [1] Łabowski M., Kaniewski P., Zastosowanie czujników inercjalnych w nawigacji personalnej, *Elektronika*, 55 (2014) nr.6, 20-23
- [2] Kosiński P., Świątek Brzeziński P., Osypisk R., Integracja czujników inercyjnych z konstrukcją robota humanoidalnego cz.I, *Pomiary Automatyka Kontrola*, 58 (2012), nr.12, 1091-1094
- [3] Barański P., Polańczyk M., Strumiłło P., Algorytm sterowania czterowinikowcem, *Elektronika*, 52 (2011), nr.9, 135-138
- [4] Żak P., Using 9-axis sensor for precise cardiosurgical robot master angular position determination, *Solid State Phenomena*, 199 (2013), 356-361
- [5] Lee H., Jung S., Balancing and navigation control of a mobile inverted pendulum robot, *Mechatronics*, 22 (2012), 95-105.
- [6] Kaniewski P., Struktury, modele i algorytmy w zintegrowanych systemach pozycjonujących i nawigacyjnych, WAT, Warszawa 2010
- [7] Kaniewski P., Konatowski S., Pakiet programowy do badań symulacyjnych zintegrowanych systemów nawigacyjnych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), nr 8, 168-171 .
- [8] Welch G., Bishop G.: An Introduction to the Kalman Filter, Department of Computer Science University of North Carolina, TR 95-041, July 24, 2006
- [9] Maciaszczyk R., Dębski I., Fuzja danych pomiarowych w układach IMU, *Metody Informatyki Stosowanej*, 25 (2010) nr.4, 47-53
- [10] Gajda J., Sroka R., Stencel M., Żegleń T., Data fusion applications in the traffic parameters measurement, *Metrology and Measurement Systems*, 12(2005), n. 3, 249-262
- [11] Chudzik S., The idea of using artificial neural network in measurement system with hot probe for testing parameters of heat-insulating materials, *Measurement* 42 (2009), 764-770

Autor: dr hab. inż. Stanisław Chudzik, Politechnika Częstochowska Instytut Elektroniki i Systemów Sterowania, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: chudzik@el.pcz.czyst.pl.