

# Pomiar wartości kąta przechyłu z wykorzystaniem akcelerometru i żyroskopu

Mateusz Nowik

W artykule przedstawiona została metoda pomiaru kąta pochylenia robota balansującego bazująca na filtracji sygnałów z akcelerometru i żyroskopu. Dla określenia dokładności pomiaru przeprowadzono symulację działania algorytmu w programie Matlab. Następnie zbudowany został prosty robot balansujący, wykorzystujący zaproponowaną metodę do uzyskania stabilizacji w pionie.

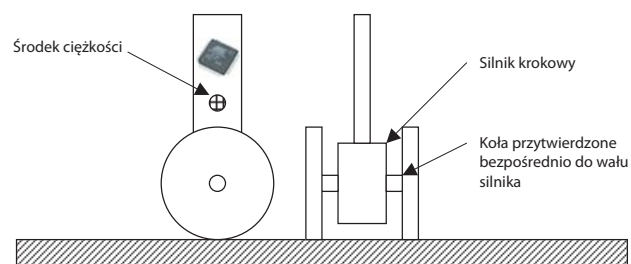
Pomiar kąta pochylenia robota balansującego jest jednym z zagadnień pomiarowych ściśle związanych z jego sterowaniem. Często stosuje się układy obliczające wartość kąta poprzez badanie odległości od podłoża przed lub za osią robota za pomocą czujnika laserowego lub ultradźwiękowego [1]. W takich przypadkach duży wpływ na jakość pomiaru ma rodzaj, kolor i faktura podłoża. Trudności określenia kąta pojawiają się również w momencie, gdy robot znajduje się na pochyłej powierzchni.

Trudniejszą w implementacji, lecz bardziej efektywną metodą, wykazującą odporność na wymienione czynniki jest estymacja kąta odchylenia od pionu bazująca na sygnałach pochodzących z akcelerometru i żyroskopu. Jest ona stosowana m.in. w zaawansowanych technicznie transporterach, jak Segway [2]. Aktualnie spora część robotów balansujących lub kroczących posiada jeden, dwa lub więcej czujników przyspieszenia liniowego (akcelerometrów) i/lub prędkości kątowej (żyroskopów mikromechanicznych). Pozwalają one na pośredni pomiar kąta obrotu wokół wybranych osi obiektu. Do obróbki sygnałów pochodzących z czujników powszechnie stosowany jest filtr Kalmana [3, 4] – narzędzie matematyczne o bardzo dużych możliwościach, wymagające jednak złożonych operacji obliczeniowych.

W artykule przedstawiono alternatywną metodę. Polega ona na stosowaniu w torze przetwarzania odpowiednio dobranych filtrów tłumiących wybrane składowe sygnałów pochodzących z czujników. Zaproponowany algorytm jest łatwy w implementacji i nie wymaga dużej mocy obliczeniowej procesora do przetwarzania danych. Aby potwierdzić skuteczność opracowanej metody, użyto jej do estymacji kąta pochylenia jednoosiowego robota balansującego.

## Obiekt pomiarowy – robot balansujący

Model eksperymentalny robota składa się z belki o przekroju prostokątnym, na końcu której zamocowany jest silnik krokowy (rys. 1). Mikrokontroler, czujniki oraz obwody sterujące prądami w cewkach silnika zostały przytwierdzone w centralnej części belki.



Rys. 1. Model robota balansującego służący do testowania algorytmu (widok z boku i z przodu)

Środek ciężkości znajdujący się nad punktem podparcia sprawia, że robot bez odpowiedniego sterowania traci równowagę i przewraca się. Utrzymanie konstrukcji w pionie wymaga ciągłego pomiaru pochylenia i dokonywania korekty położenia podwozia, aby środek ciężkości znajdował się nad osią wału silnika. Pod względem zachowania oraz budowy robot przypomina odwrócone wahadło – typowy przykład obiektu niestabilnego. Sygnał sterujący prędkością silnika pochodzi z regulatora PID, na którego wejście podawana jest estymowana wartość kąta pochylenia.

## Charakterystyka czujników

Idea algorytmu zrodziła się pod wpływem obserwacji własności akcelerometrów i żyroskopów. Badając wartości przyspieszeń mierzone przez akcelerometr wzdłuż osi X i Y wywołane działaniem pola grawitacyjnego można wnioskować o kącie pochylenia wokół osi Z (prostopadłej do X, Y i zarazem do wektora przyspieszenia ziemskiego). W przypadku kalibracji statycznej (przykład w pracy [5]), otrzymana wartość jest bardzo

mgr inż. Mateusz Nowik – Katedra Metrologii,  
Akademia Górniczo-Hutnicza  
Kraków

dokładna ale tylko przy założeniu, że jedyną siłą działającą na układ jest grawitacja. W przypadku obiektów poruszających się ruchem niejednostajnym, takie założenie jest błędne. Należy zauważyć, że średni kąt wskazywany przez akcelerometr będzie poprawny. Można zauważyć pewną analogię do wahadła zamocowanego na poruszającym się obiekcie. Pomimo ciągłych wychyleń ze stanu równowagi powodowanych przez zmianę przyspieszenia obiektu i siły bezwładności samego wahadła, przy odpowiednio długim czasie uśredniania wskazywanego przez nie kierunku, można z zadowalającą dokładnością określić orientację wektora przyspieszenia ziemskiego [6].

Żyroskop mikromechaniczny (np. model LIS300AL firmy STMicroelectronics, zastosowany w opisywanym projekcie) jest urządzeniem mierzącym prędkość kątową. Na drodze całkowania możliwe jest otrzymanie wartości kąta obrotu wokół aktywnej osi czujnika. Błędy zera żyroskopu powodują tzw. dryft polegający na systematycznym wzroście wartości kąta, nawet gdy obiekt z czujnikiem znajdują się w spoczynku. Ta cecha nie pozwala na stosowanie żyroskopu mikromechanicznego do pomiaru wartości statycznych kąta, natomiast ma znikomy wpływ podczas obserwacji szybkich zmian. Dodatkowo czujnik ten jest praktycznie zupełnie nieczuły na przyspieszenia liniowe, jakim jest poddany.

## Zasada działania algorytmu

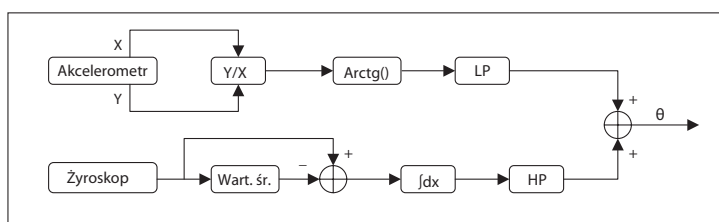
W algorytmie wykorzystywane są filtry cyfrowe górno- i dolnoprzepustowe mające za zadanie wydobycie informacji z sygnałów oraz stłumienie zakłóceń charakterystycznych dla każdego z czujników, zgodnie z wcześniej omówionymi obserwacjami. Na rys. 2 przedstawiono schemat blokowy algorytmu.

Na podstawie wyników pomiaru przyspieszeń wzdłuż osi X i Y akcelerometru wyliczany jest kąt zgodnie z zależnością:

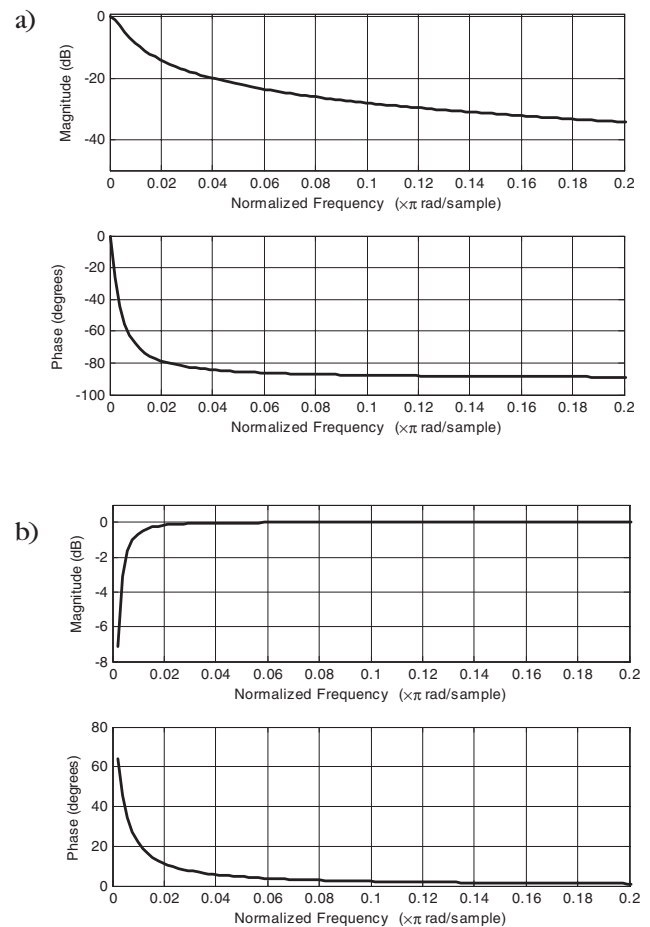
$$\alpha = \arctg\left(\frac{a_Y}{a_X}\right) \quad (1)$$

gdzie:  $\alpha$  – odchylenie od pionu,  $a_Y$  – przyspieszenie wzdłuż osi Ay,  $a_X$  – przyspieszenie wzdłuż osi Ax

Sygnal o wartości kąta pochylenia jest następnie podawany na wejście filtra dolnoprzepustowego o częstotliwości granicznej  $f_{gr}$  równej 0,15 Hz. Zadaniem filtra jest tłumienie wysokoczęstotliwościowej części widma obejmującej szumy czujnika oraz drgania i wahania robota.



Rys. 2. Schemat algorytmu estymacji kąta pochylenia na podstawie sygnałów z akcelerometru i żyroskopu



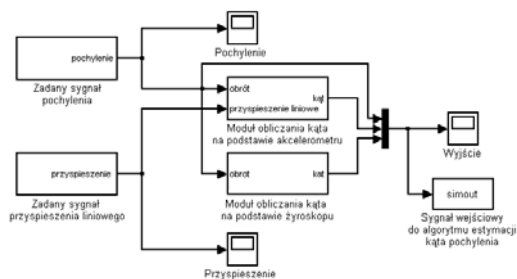
Rys. 3. Charakterystyka amplitudowa i fazowa filtrów: a) dolnoprzepustowego, b) górnoprzepustowego dla częstotliwości znormalizowanej względem częstotliwości próbkowania  $f_{pr} = 100$  Hz

Sygnal z żyroskopu w pierwszej fazie jest pozbawiany wartości średniej, następnie poddawany całkowaniu. Na wyjściu integratora znajduje się filtr górnoprzepustowy o częstotliwości granicznej równej – podobnie jak w przypadku filtra w torze przetwarzania sygnału z akcelerometru –  $f_{gr}$ . Filtry (Butterwortha I rzędu) zostały zaprojektowane dla częstotliwości próbkowania równej 100 Hz (rys. 3).

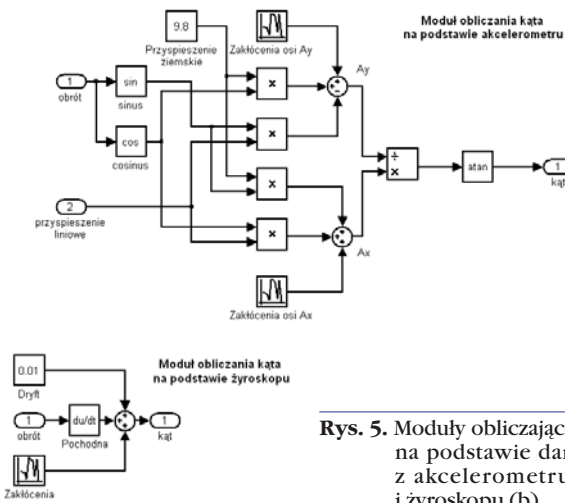
## Symulacja numeryczna

Symulacja działania algorytmu została wykonana z użyciem programu Matlab Simulink. Zamodelowano czujniki pomiarowe oraz cały tor przetwarzania sygnałów (rys. 4, rys. 5). Otrzymane przebiegi są następnie przeliczane zgodnie z zaproponowanym algorytmem i ostatecznie porównywane z wartością zadaną pochylenia.

W symulacjach założono, że sygnały wyjściowe z czujników nie są obciążone błędem dynamicznym, a jedynie addytywnym szumem o rozkładzie normalnym. Zamodelowany akcelerometr jest czuły na przyspieszenie ziemskie oraz na wstrząsy działające na obiekt. Rozkład poszczególnych przyspieszeń na odpowiednie osie został przedsta-



Rys. 4. Symulacja zaimplementowana w programie Matlab Simulink



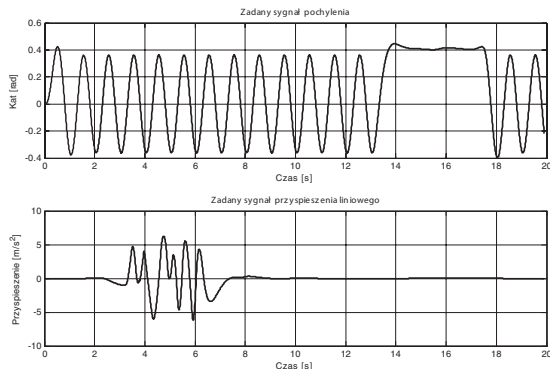
Rys. 5. Moduły obliczające kąt na podstawie danych z akcelerometru (a) i żyroskopu (b)

wiony w pracy [5]. Na jego podstawie obliczany jest kąt pochylenia. W przedstawionej implementacji na wyjściu żyroskopu pojawia się sygnał proporcjonalny do prędkości obrotowej obiektu i nie jest w żaden sposób zakłócany przez przyspieszenia liniowe. Czujnik ma natomiast stały dryft o wartości 0,01 rad/s.

Przyjęto arbitralnie przebiegi wymuszeń (pochylenia oraz przyspieszenia liniowego) uznanych za krytyczne (rys. 6). Są to:

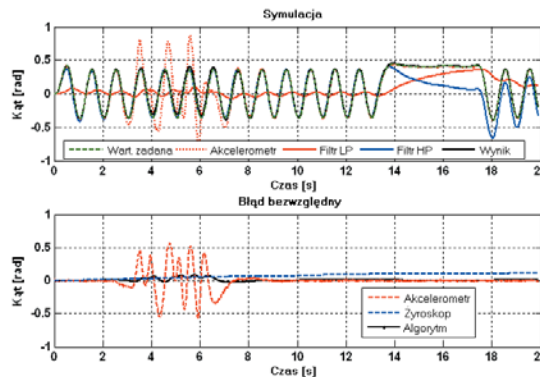
- wartość stała kąta pochylenia (ze względu na dryft żyroskopu)
- szybka zmiana kąta pochylenia (ze względu na charakter robota, którego sterowanie wymaga szybkiej reakcji na zmianę kąta odchylenia od pionu)
- wpływ wstrząsów (ze względu na zakłócenie pracy akcelerometru).

Wynikiem symulacji są przebiegi sygnałów zmierzonych przez czujniki oraz dane końcowe będące esty-



Rys. 6. Zadane sygnały wejściowe

matą kąta odchylenia od pionu (rys. 7). Dzięki znajomości wartości zadanej kąta możliwe jest określenie niepewności otrzymanych wyników. Różnica wartości obliczonej i zadanej została przedstawiona dla trzech przypadków: gdy jest stosowany albo tylko akcelerometr, albo żyroskop, albo algorytm bazujący na sygnałach z obu czujników (rys. 7).

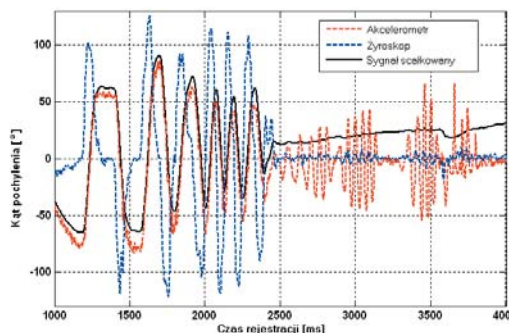


Rys. 7. Sygnały otrzymane w wyniku symulacji

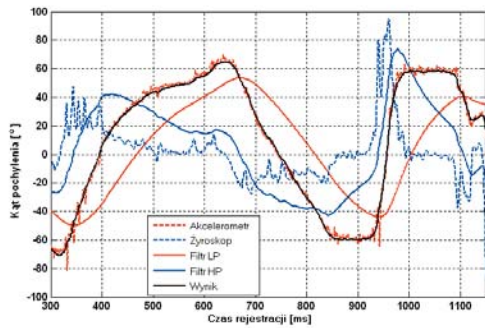
Występowanie wstrząsów o wartości przyspieszeń do kilku m/s<sup>2</sup> spowodowało błąd obliczania kąta na podstawie danych pochodzących z akcelerometru o wartości dochodzącej do ok. 0,5 rad. Sygnał wyjściowy z żyroskopu ma tendencję do narastania w czasie. Dzięki zastosowaniu przedstawionego zestawu filtrów, zwiększono odporność na wstrząsy (wartość błędu zniwelowano do ok. 0,08 rad) oraz wyeliminowano dryft.

## Pomiary na obiekcie rzeczywistym

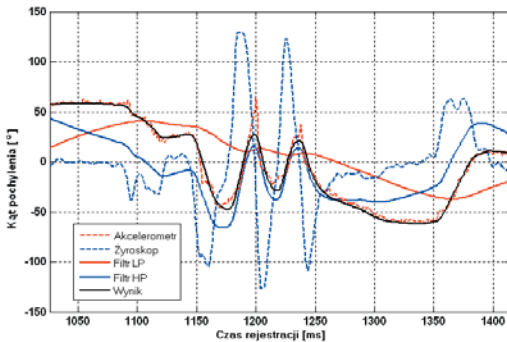
Algorytm zasymulowany w środowisku Matlab został zaimplementowany w programie przeznaczonym dla mikrokontrolera ARM 7TDMI (AT91SAM7S256). Korzystając ze sprzętowego interfejsu szeregowego UART, dane zostały przesłane do komputera PC. Obiekt, na którym zamontowano czujniki, wykonywał ruchy obrotowe wokół osi żyroskopu, poddano go również działaniu przyspieszeń liniowych. Na rys. 8 przedstawione zostały przebiegi wartości kąta na podstawie danych z akcelerometru oraz z żyroskopu, po wykonaniu całkowania. Fragment przedstawiony na wykresie obejmuje rejestrację wolnych zmian pochylenia (czas 1-2 s), szybkich zmian pochylenia (czas 2-2,5 s) oraz potrząśnięcia obiektem (czas 2,5-4 s).



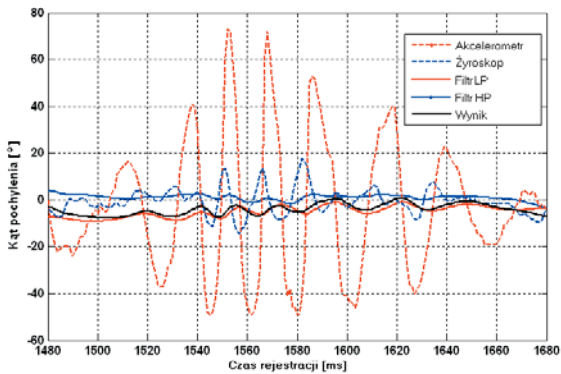
Rys. 8. Wartość kąta pochylenia w czasie wyliczana osobno za pomocą akcelerometru i żyroskopu



Rys. 9. Powolne zmiany pochylenia



Rys. 10. Szybkie zmiany pochylenia

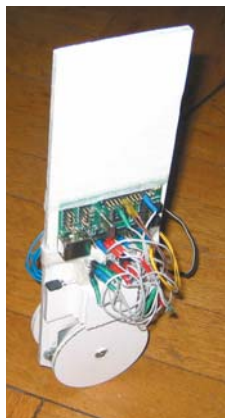


Rys. 11. Oddziaływanie na obiekt przyspieszenia liniowego przy stałym pochyleniu

Na kolejnych wykresach zaznaczono również estymowaną przez algorytm wartość kąta. Skupiono się na przypadkach wymuszeń uznanych wcześniej za krytyczne:

- powolnej zmianie kąta
- szybkiej zmianie kąta
- wpływie przyspieszenia liniowego zakłócającego pomiar.

Wyniki filtracji zostały przedstawione na (rys. 9, 10 i 11). Na każdym z nich zaznaczono kąt wyliczony ze wzoru (1) („Akcelometr”), sygnał pochodzący bezpośrednio z żyroskopu („Żyroskop”), wartość na wyjściu filtra dolnoprzepustowego („Filtr\_LP”), wartość na wyjściu filtra górnoprzepustowego („Filtr\_HP”), wartość kąta wyliczoną przez kompletny algorytm („Wynik”).



Rys. 12. Robot balansujący wykorzystujący zaproponowany algorytm pomiaru kąta pochylenia

Po zaimplementowaniu regulatora PID i jego dostrojeniu [7] uzyskano stabilizację robota w pozycji pionowej (rys. 1). Dodatkowym utrudnieniem dla układu badającego pochylenie jest fakt zastosowania jako napędu silnika krokowego. Przy małej prędkości poruszania się robota, skokowe przełączanie cewek wprowadza cały układ w drgania. Filtr dolnoprzepustowy ogranicza jednak ich wpływ i umożliwia poprawny pomiar kąta.

## Wnioski

W każdym z rozpatrywanych w symulacji przypadków zastosowanie przedstawionego algorytmu spowodowało zmniejszenie niedokładności pomiaru kąta pochylenia obiektu. Filtry IIR niskiego rzędu wprowadzają znikome opóźnienie propagacji sygnału, co pozwala na stosowanie ich w aplikacjach, w których sterowanie jest krytyczne czasowo – takich jak roboty balansujące lub inne urządzenia mające utrzymywać równowagę. Przyczyniają się one również (wraz z operacją całkowania) do znacznego tłumienia szumów własnych czujników. Dzięki małej liczbie współczynników filtrów (dla filtra Butterwortha I rzędu ich liczba wynosi 3) filtracji mogą dokonywać procesory typu AVR lub ARM, niemające wyspecjalizowanych instrukcji DSP (np. MAC – multiply – accumulate). Kompletny algorytm zapisany w pamięci mikrokontrolera AT91SAM7S25 zajmuje niecałe 2 KB (operacje na zmiennych typu „double”, kompilator YAGARTO - GCC 4.3.2, opcja optymalizacji – o0<sup>1)</sup>.

Zaproponowany układ dwóch czujników sprzężonych prezentowanym algorytmem obliczeniowym posiada jako całość dobrą dynamikę (charakterystyczną dla żyroskopu) oraz nie wykazuje dryftu w stanie statycznym. Robot balansujący wykorzystujący przedstawioną w artykule metodę pomiaru jest w stanie utrzymywać równowagę i powracać do stanu stabilnego po wystąpieniu zakłócenia.

## Bibliografia

1. NASA Telerobotics Program Home Page <http://ranier.hq.nasa.gov/>.
2. Segway Personal Transporter <http://www.segway.com>.
3. Zieliński T. P.: Od teorii do cyfrowego przetwarzania sygnałów. Wydział EAIiE AGH, Kraków 2002.
4. Kędziński J.: Filtr Kalmana – zastosowania w prostych układach sensorycznych. Artykuł koła naukowego KoNaR Politechnika Wroclawska.
5. Nowik M.: Zastosowanie czujników przyspieszeń do pomiarów parametrów ruchu pojazdu. Praca magisterska pod kierunkiem dr. hab. inż. A. Bienia. Wydział EAIiE AGH, Kraków 2008.
6. Blackwell Trevor website <http://www.tlb.org/>.
7. Sawicki J., Piątek K.: Wstęp do teorii sterowania cyfrowego. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2004. ■

<sup>1)</sup> Opcja optymalizacji „o0” dla kompilatora oznacza „nie optymalizować” (przyp. red.)