



Politechnika Wrocławska

Katedra Cybernetyki i Robotyki, Wydział Elektroniki

Seria: SPR nr 3/2014

— Grant S30080 —

**Filtracja komplementarna
w inercyjnych czujnikach orientacji**

Marek Wnuk

Słowa kluczowe:
orientacja,
żyroskop,
akcelerometr,
dalmierz,
mikrokontroler,
filtracja.

Wrocław, 2014-09-25

Spis treści

1	Wprowadzenie	3
2	Przegląd czujników scalonych	3
2.1	Akcelerometry	3
2.2	Żyroskopy	3
2.3	Magnetometry	4
2.4	Czujniki ciśnienia	4
2.5	Moduły IMU	4
3	Filtry używane do pomiaru orientacji	5
3.1	Filtr Kalmana	5
3.2	Filtr Madgwicka	5
3.3	Filtr komplementarny	5
4	Przykłady realizacji czujników orientacji	6
4.1	Przykład 3D - system AHRS	6
4.2	Przykład 2D - samopoziomująca się platforma	8
4.3	Przykład 1D - orientacja myszy w labiryncie	9
5	Czujnik pochylenia platformy dwukołowej względem podłoża	11
5.1	Idea pomiaru	11
5.2	Charakterystyki dalmierzy	11
5.3	Stanowisko badawcze	12
5.4	Uwagi o implementacji w robocie RoBik	14
6	Podsumowanie	14

1 Wprowadzenie

Pomiar orientacji jest konieczny do sterowania robotami mobilnymi. W szczególny sposób dotyczy to obiektów latających, poruszającymi się w przestrzeni trójwymiarowej. W takim przypadku korzysta się z systemu AHRS (ang. *Attitude and Heading Reference System*). Jest on oparty na całkowaniu chwilowych prędkości kątowych zmian orientacji, mierzonych przy pomocy żyroskopów. Jako pomiary bezwzględne orientacji można wykorzystać azymut magnetyczny mierzony magnetometrami oraz kierunek siły grawitacji mierzony akcelerometrami. W tym przypadku mówimy o systemie czujników MARG (ang. *Magnetic, Angular Rate, and Gravity*), a urządzenie, które je zawiera jest zwane IMU (ang. *Inertial Measurement Unit*).

W praktyce robotycznej często mamy do czynienia z ograniczeniem wymiaru przestrzeni do dwóch lub nawet jednego, co prowadzi do uproszczenia zadania pomiaru orientacji. Przykładem problemu dwuwymiarowego jest pomiar pochylenia platformy mobilnej poruszającej się po płaszczyźnie, a jeden stopień swobody pozostaje w przypadku pomiaru pochylenia korpusu robota balansującego.

2 Przegląd czujników scalonych

Czujniki mikroelektromechaniczne (MEMS - ang. *Micro Electro-Mechanical Systems*) są używane głównie do pomiaru prędkości i przyspieszeń. Są one coraz powszechniej dostępne w ofercie wiodących producentów układów scalonych. Dostępne są też czujniki pola magnetycznego (magnetometry) i czujniki ciśnienia (barometry, altimetry).

Powszechnie stosuje się łączenie różnych funkcji w jednym układzie, co pozwala zmniejszyć rozmiary urządzeń oraz pobór energii. Dostępne są różne kombinacje (akcelerometr + żyroskop, akcelerometr + magnetometr, akcelerometr + żyroskop + magnetometr). Współczesne czujniki o wyjściach cyfrowych wyposażone są we wbudowane programowalne filtry antyaliasingowe a często zawierają własną jednostkę obliczeniową, pozwalającą zaimplementować wybrany algorytm obliczania orientacji bezpośrednio w układzie (np. MPU6050 [27])

2.1 Akcelerometry

Pomiar przyspieszenia odbywa się przez pomiar pojemności kondensatora wytworzonego w monolitycznym krzemie. Jego okładki przesuwają się względem siebie przy odkształceniu elementów sprężystych pod wpływem siły działającej na masę. Sygnał wyjściowy akcelerometru może być analogowy lub cyfrowy. Typowe synchroniczne interfejsy cyfrowe to SPI (ang. *Serial Peripheral Interface*) i IIC (ang. *Inter-Integrated Circuit*). Przykładowe akcelerometry to ADXL345 [13], MMA8652FC [25].

2.2 Żyroskopy

Pomiar prędkości obrotowej opiera się na zjawisku siły Coriolisa, wynikającej ze złożenia dwóch ruchów pewnej masy, z których co najmniej jeden jest obrotowy. W akcelerometrach MEMS jednym ze składowych ruchów są drgania elementu struktury czujnika wymuszone dzięki efektowi piezoelektrycznemu. Wartość siły Coriolisa jest mierzona analogicznie jak w akcelerometrze, podobne są też interfejsy obu rodzajów czujników. Przykłady żyroskopów to L3G4200 [20], MAX21000 [24].

2.3 Magnetometry

Do pomiaru kierunku i natężenia pola magnetycznego Ziemi stosuje się czujniki magnetorezystywne, oparte na efekcie Gaussa (Thomsona). Występują one w postaci układów scalonych, najczęściej zapewniających pomiar trzech prostopadłych składowych wektora. Ich interfejsy są analogiczne, jak w czujnikach inercyjnych. Popularne magnetometry to np. HMC5883L [18], MAG3110 [23].

2.4 Czujniki ciśnienia

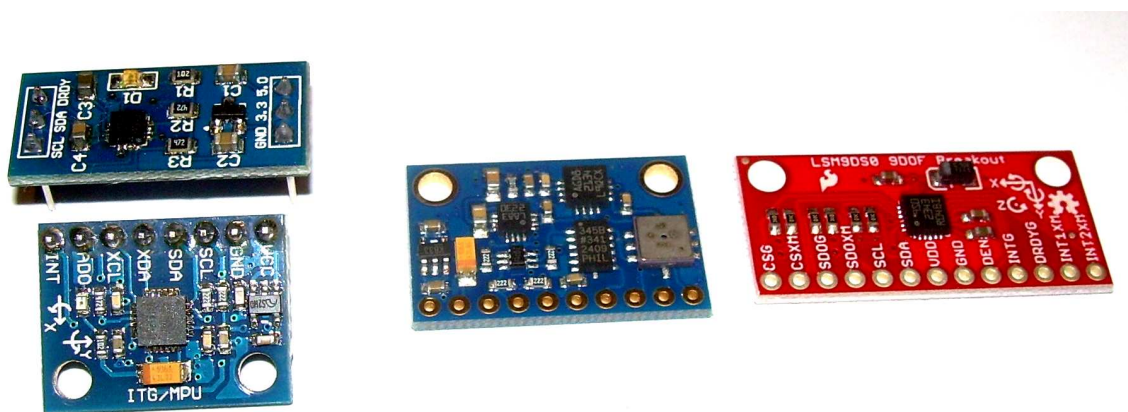
Czujniki bezwzględne ciśnienia korzystają ze zjawiska piezorezystywnego. Po jednej stronie krzemowej membrany jest próżnia, na drugą działa mierzone ciśnienie. Wynik pomiaru jest udostępniany w postaci napięciowej, a coraz częściej dodatkowo filtrowany i przekazywany przez SPI lub IIC. Często spotyka się dodatkowo pomiar temperatury. Przykłady takich czujników to BMP085 [14], MPL3115A2 [26].

2.5 Moduły IMU

IMU (ang. *Inertial Measurement Unit*) zawiera czujniki dostarczające pomiarów wielkości fizycznych określających parametry położenia, prędkości i przyspieszeń, którym podlega wyposażony w nie obiekt. Pozwala to na obliczanie aktualnej orientacji i położenia.

Czujniki te, to zazwyczaj akcelerometry, żyroskopy, magnetometry. Każdy z nich może dać informację trójwymiarową (3D), co razem daje 9 stopni swobody (9 DOF - *Degrees of Freedom*).

Na rys. 1 przedstawiono testowane moduły IMU. Po lewej mamy popularny magnetometr HMC5883L (3DOF) i moduł GY-521 z układem MPU6050 [27] (3DOF akcelerometr i 3DOF żyroskop). W środku znajduje się moduł GY-80 (10DOF) z trójwymiarowymi czujnikami przyspieszenia (ADXL345), prędkości obrotowej (L3G4200), pola magnetycznego (HMC5883L) oraz ciśnienia (BMP085). Po prawej znajduje się moduł z układem z rodziny iNEMO (LSM9DS0) [21], dostarczającym pomiarów przyspieszenia, prędkości obrotowej i pola magnetycznego (9 DOF).



Rysunek 1: Moduły IMU używane w badaniach

Dziesiątym stopniem swobody nazywa się w popularnych zastosowaniach wysokość nad poziomem morza (ang. *Altitude*), mierzoną bezwzględnym czujnikiem ciśnienia atmosferycznego.

3 Filtry używane do pomiaru orientacji

Pomiar orientacji na podstawie odczytu sygnałów z kilku czujników (w pełnym zakresie obejmuje to trzy czujniki 3D - akcelerometr, żyroskop i magnetometr) wymaga dokonywania filtracji zakłóceń o różnym charakterze i fuzji danych. Wśród wielu podejść do tego problemu najczęściej spotyka się filtr Kalmana, filtr komplementarny i filtr Madgwicka.

3.1 Filtr Kalmana

Filtr Kalmana [11] dokonuje iteracyjnej estymacji procesu w układzie ze sprzężeniem zwrotnym. W każdym kroku wykonywane są naprzemiennie dwie operacje: estymacja stanu procesu i sprzężenie zwrotne w postaci pomiarów zaburzonych szumem.

Faza predykcji stanu (aktualizacja czasowa) estymuje kolejny, przewidywany stan i określa estymatę kowariancji błędu, dając estymatę a priori.

Faza korekcji (aktualizacja pomiarowa) wykorzystuje bieżące pomiary by uzyskać poprawioną estymatę a posteriori.

Filtr Kalmana jest od dawna używany przy fuzji danych sensorycznych, zwłaszcza w zastosowaniach do nawigacji powietrznej [3]. Współczesne implementacje są również popularne [6, 16, 1].

3.2 Filtr Madgwicka

W 2010 roku R. Madgwick opublikował raport [7], w którym przedstawił zarówno teorię, jak i elementy implementacji nowego filtra dla IMU i MARG. Jest on oparty na kwaternionowej reprezentacji obrotów. Zawiera on kompensację zniekształceń dla magnetometru i kompensację dryfu żyroskopu. Wykorzystuje analitycznie wyprowadzony i zoptymalizowany algorytm najszybszego spadku w celu wyznaczenia kierunku błędu żyroskopu przez różniczkowanie kwaternionu.

Przedstawione wyniki wskazują na zalety tej metody (mały koszt obliczeniowy, efektywność przy niewielkiej częstotliwości próbkowania, łatwość strojenia algorytmu - 1 lub 2 parametry).

Autor dołączył również swoją implementację filtra Mahony, na którym się w pewnym zakresie wzorował [8]. Oprogramowanie tej implementacji jest dostępne na stronie [29].

3.3 Filtr komplementarny

Idea filtra komplementarnego [3] polega na fuzji danych z dwóch czujników, z których żaden nie jest idealny.

W przypadku jednego z nich mamy do czynienia z szybkozmiennymi zakłóceniami, których odfiltrowanie filtrem dolnoprzepustowym wprowadza do mierzonego sygnału opóźnienie.

Drugi z czujników jest obciążony błędem wolnozmiennym (dryf). Tu rozwiązaniem jest filtracja górnoprzepustowa, która jednak usuwa również użyteczne składowe wolnozmiennie pomiaru (w tym składową stałą).

Kombinacja obu odfiltrowanych pomiarów pozwala zachować dobre wyniki. Składowe wolnozmiennie są odtwarzane z pierwszego, a szybkozmiennie - z drugiego sensora.

W przypadku IMU i estymacji orientacji, pierwszy typ czujników to akcelerometr (podlegający zakłóceniom wynikającym z wibracji i ruchu obiektu) lub magnetometr (zakłócany przez pola magnetyczne napędów itp.). Drugi typ to żyroskop, który na skutek niestabilności zera daje przy całkowaniu prędkości dryf położenia kąтового.

Implementacja filtra komplementarnego [6], używana w opisywanych zastosowaniach, wykorzystuje iteracyjne docalkowywanie sygnału prędkości ω_n do aktualnej estymaty położenia α_{n-1} z zastosowaniem kombinacji wypukłej z parametrem ε z aktualnym pomiarem położenia a_n :

$$\alpha_n = (1 - \varepsilon)(\alpha_{n-1} + \tau_c \omega_n) + \varepsilon a_n, \quad (1)$$

gdzie τ_c odpowiada okresowi próbkowania.

Warto zauważyć, że gdy $\omega_n \rightarrow 0$ (przy bardzo małych prędkościach obrotowych) uzyskujemy:

$$\alpha_n = (1 - \varepsilon)\alpha_{n-1} + \varepsilon a_n, \quad (2)$$

co odpowiada filtracji dolnoprzepustowej pomiaru położenia a_n przez człon inercyjny o stałej czasowej:

$$T = -\frac{\tau_c}{\ln(1 - \varepsilon)}. \quad (3)$$

Wyniki działania tego filtra zostaną pokazane przy okazji prezentacji projektów, które z niego korzystają.

4 Przykłady realizacji czujników orientacji

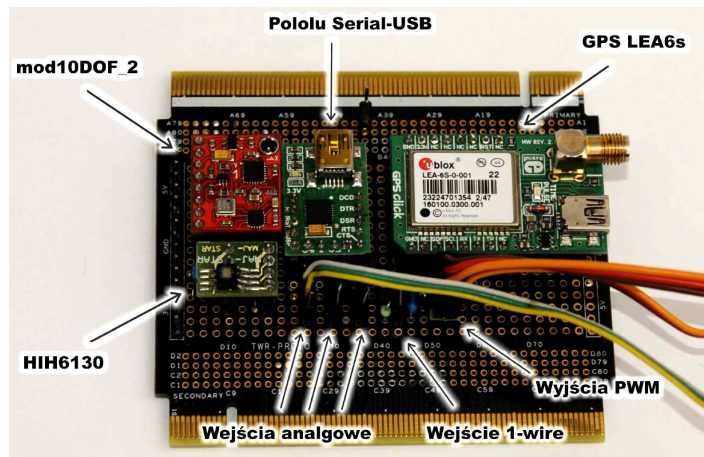
Czujniki orientacji znajdują zastosowania w różnych projektach robotycznych. W pracach badawczych i konstrukcyjnych biorą udział studenci specjalności Robotyka prowadzonej przez Katedrę Cybernetyki i Robotyki (W4/K7) Politechniki Wrocławskiej. W niektórych przypadkach owocuje to projektami inżynierskimi. Elementy tych projektów, związane z pomiarem orientacji, zostaną przedstawione poniżej.

4.1 Przykład 3D - system AHRS

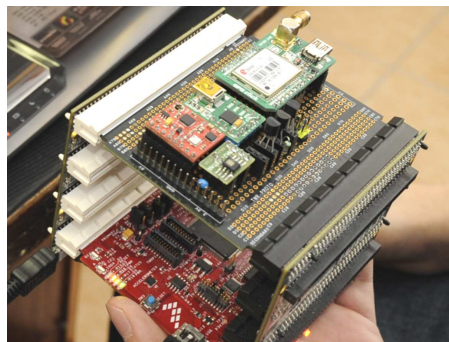
Zaprojektowano i przebadano [2] prototyp sterownika do autonomicznego samolotu typu „latające skrzydło” (rys. 2). Jego ważnym blokiem jest układ AHRS. Wykorzystano moduł IMU 10DOF zawierający akcelerometr i żyroskop MPU6050, magnetometr HMC5883L oraz czujnik ciśnienia BMP085. Dodatkowe czujniki pozwalają na pomiar dodatkowych parametrów otoczenia i lotu (prędkość względem powietrza, wilgotność itp.). Układ jest wyposażony w odbiornik GPS i interfejsy do komunikacji z innymi podsystemami. Jego ważnym blokiem jest układ AHRS. Wykorzystano moduł IMU 10DOF zawierający akcelerometr i żyroskop MPU6050, magnetometr HMC5883L oraz czujnik ciśnienia BMP085. Dodatkowe czujniki pozwalają na pomiar innych parametrów otoczenia i lotu (prędkość względem powietrza, wilgotność itp.). Układ jest wyposażony w odbiornik GPS i interfejsy do komunikacji z innymi podsystemami.

Jako mikroprocesor wykorzystano Kinetis K60 [19] z rdzeniem ARM Cortex4M z koprocesorem zmiennoprzecinkowym. Prototyp zmontowano wykorzystując system TOWER [30] (rys. 3).

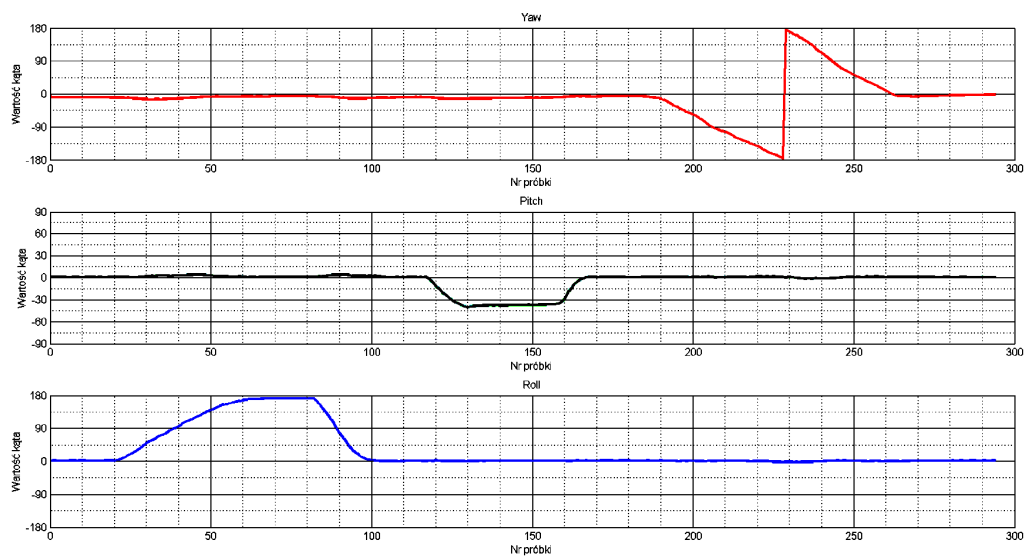
Zaimplementowano algorytm wyliczania orientacji z IMU 9DOF, oparty na rachunku kwaternionów, z prezentacją orientacji w postaci kątów Eulera (R-P-Y). Przykładowe wyniki pokazano na rys. 4. Oś czasu jest skalowana w numerach próbek (okres ok. 10ms). Prbki 20-60 - wolny obrót Roll do pozycji odwróconej, 60-100 - zatrzymanie i powrót, 120-130 - pochylenie na dziób do kąta ok. 45 stopni, 130-170 - zatrzymanie i powrót do poziomu, 190-260 - wykonanie pełnego obrotu wokół osi pionowej (około 230. próbki – zmiana z kątów ujemnych na dodatnie).



Rysunek 2: Prototyp układu [2]



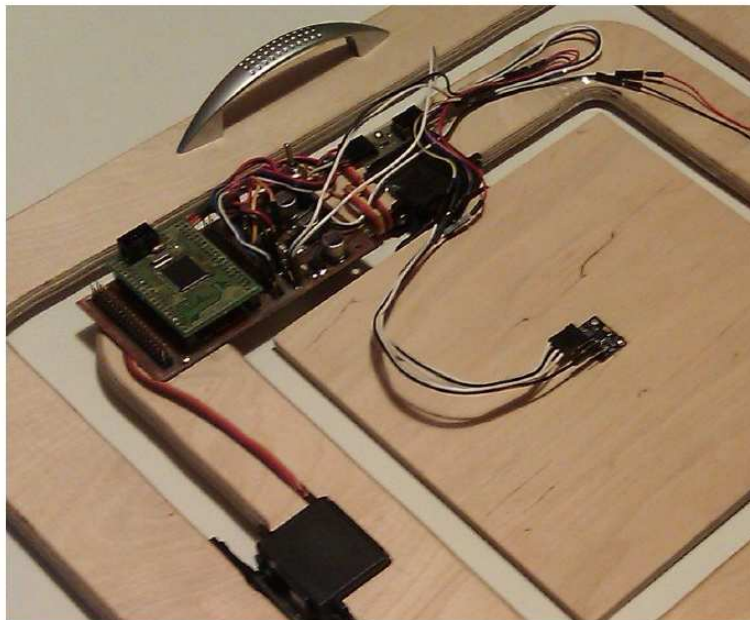
Rysunek 3: Zestaw Tower z mikrokontrolerem K60 [2]



Rysunek 4: Odczyty orientacji 3D [2]

4.2 Przykład 2D - samopoziomująca się platforma

W pracy [4] zaprojektowano i zbadano układ regulujący poziome położenie platformy o dwóch obrotowych stopniach swobody, względem wzajemnie prostopadłych poziomych osi (rys. 5). Do pomiaru



Rysunek 5: Prototyp układu [4]

orientacji wykorzystano moduł GY-521, zawierający akcelerometr i żyroskop MPU6050. Jako jednostkę centralną zastosowano moduł z 16-bitowym mikrokontrolerem 9S12 [5]

Możliwy jest niemal bezpośredni pomiar dwóch kątów (a_x, a_y) pochylenia na podstawie danych z akcelerometru:

$$a_x = \arctg\left(\frac{g_Y}{g_Z}\right), \quad (4)$$

$$a_y = \arctg\left(\frac{g_X}{g_Z}\right), \quad (5)$$

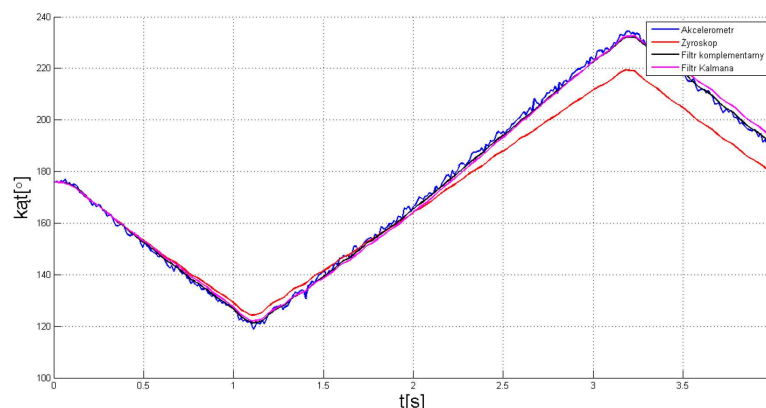
gdzie g_X, g_Y, g_Z są składowymi wektora grawitacji mierzonymi przez akcelerometr 3D. Pomiar ten jest bezwzględny, jest on jednak obarczony znacznymi szumami wysokoczęstotliwościowymi.

Inne źródło danych to żyroskop. Odczyty prędkości kątowych względem obu osi (ω_X, ω_Y) muszą zostać scałkowane:

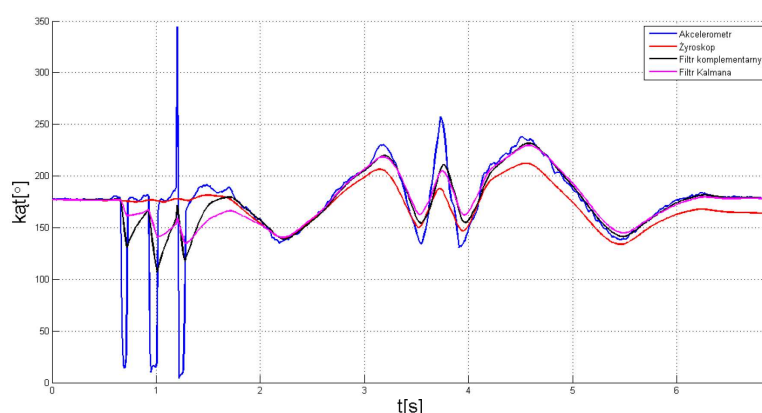
$$a_x(t_i) = a_x(0) + \sum_{j=1}^i \omega_X(t_j)(t_j - t_{j-1}), \quad (6)$$

$$a_y(t_i) = a_y(0) + \sum_{j=1}^i \omega_Y(t_j)(t_j - t_{j-1}). \quad (7)$$

Niedokładność zera żyroskopu powoduje dryf, który trzeba kompensować przy pomocy odpowiedniego filtra.



Rysunek 6: Odczyty orientacji przy ruchach powolnych [4]



Rysunek 7: Odczyty orientacji przy ruchach szybkich [4]

Do filtracji zastosowano zarówno filtr Kalmana, jak i filtr komplementarny. Przykładowe wyniki pomiarów orientacji przedstawiono na rys. 6 i 7.

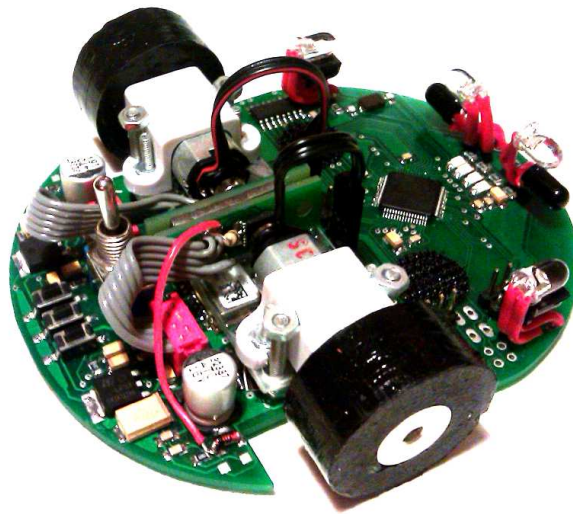
W przypadku ruchów powolnych filtr komplementarny zachowuje się podobnie jak filtr Kalmana. Minimalne różnice widać przy ruchach bardzo szybkich. Oba filtry znakomicie usuwają zarówno szybkozmienne zakłócenia z akcelerometru, jak i dryf żyroskopu.

4.3 Przykład 1D - orientacja myszy w labiryncie

W pracy [10] zaprojektowano i zbadano czujniki pozwalające robotowi klasy Micromouse (rys. 8) poruszać się w labiryncie. Jednym z ważnych zadań jest w tym przypadku odpowiednie zachowywanie orientacji względem osi pionowej.

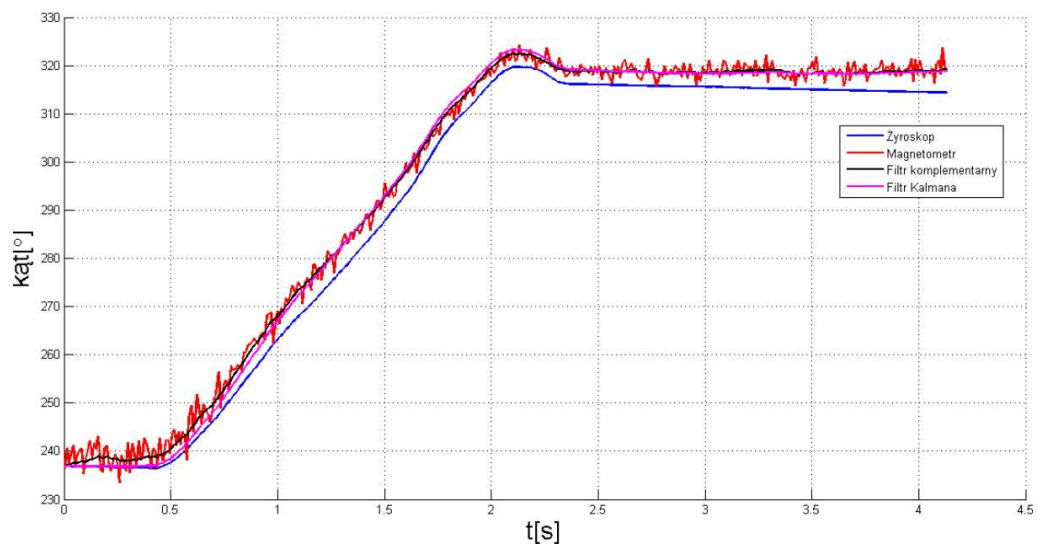
Zazwyczaj stosuje się do tego celu całkowanie sygnału prędkości kątowej z żyroskopu. W przypadku opisywanego robota był to układ LY3200ALH, z wyjściem napięciowym [22]. Jego wyjście podłączono do wejścia przetwornika ADC mikrokontrolera pokładowego (STM32F103RBT6 z rdzeniem ARM Cortex [28]).

Dodatkowym wyposażeniem dla robota (zbudowanego i uruchomionego wcześniej) stał się magnetometr 3D, moduł z układem FXOS8700CQ [17]. Dzięki niemu możliwe stało się wyznaczanie bieżącego kierunku wektora pola magnetycznego Ziemi, a więc – bezwzględnej orientacji robota.



Rysunek 8: Robot klasy Micromouse [10]

Wprawdzie pomiar ten jest obarczony szybkozmiennymi zakłóceniami powodowanymi przez układy napędowe, ale nadaje się do wykorzystania w celu kompensowania dryfu żyroskopu. Podobnie jak w poprzednim przypadku, zastosowano zarówno filtr Kalmana, jak i filtr komplementarny. Wyniki zaprezentowano na (rys. 9).



Rysunek 9: Odczyty orientacji 1D [10]

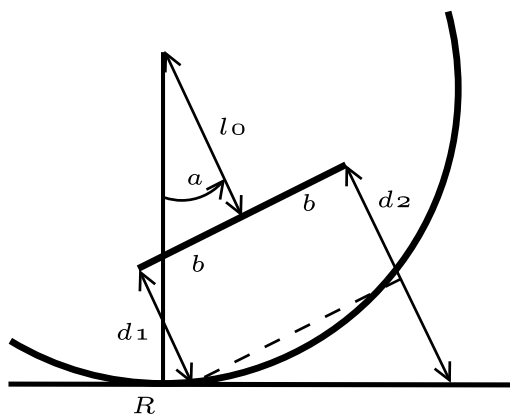
Widać, że dryf całkowania prędkości z żyroskopu jest przez oba filtry usunięty, a zakłócenia szybkozienne - istotnie osłabione.

5 Czujnik pochylenia platformy dwukołowej względem podłoża

W raporcie [12] przedstawiono koncepcję i realizację pomiaru orientacji korpusu robota balansującego względem podłoża przy pomocy dwóch dalmierzy. Dla podłoża poziomego, co jest typową sytuacją dla robotów pracujących we wnętrzach, można w ten sposób uzyskać orientację względem osi kół robota, czyli jego odchylenie od pionu.

5.1 Idea pomiaru

Na rysunku 10 pokazano ideę układu pomiaru kąta α pomiędzy korpusem robota a normalną do podłoża. Dwa czujniki odległości (dalmierze) są umieszczone symetrycznie na korpusie robota (po przeciwnych stronach osi jego kół) i skierowane równoległe do osi korpusu, w kierunku podłoża. Odległość od podłoża w położeniu pionowym jest dobrana tak, by możliwy był pomiar odległości przy odchyłaniu korpusu robota od pionu w żądanym zakresie kątów (w pracy przyjęto maksymalne odchylenie równe 45°).



Rysunek 10: Idea czujnika odchylenia

Przez R oznaczono promień kół, przez l_0 – wysokość umieszczenia czujników ponad osią¹, przez b – połowę rozstawu czujników w stosunku do płaszczyzny symetrii korpusu, przez d_1 i d_2 – pomiary odległości z obu dalmierzy.

Różnica obu pomiarów odległości pozwala wyznaczyć kąt nachylenia:

$$\alpha = \arctan \frac{\Delta d}{2b} \quad (8)$$

5.2 Charakterystyki dalmierzy

Zastosowany dalmierz GP2D120 (rys. 11) ma silnie nieliniową, hiperboliczną zależność napięcia wyjściowego od mierzonej odległości, łatwą do zamodelowania w postaci funkcji wymiernej z trzema parametrami (12).

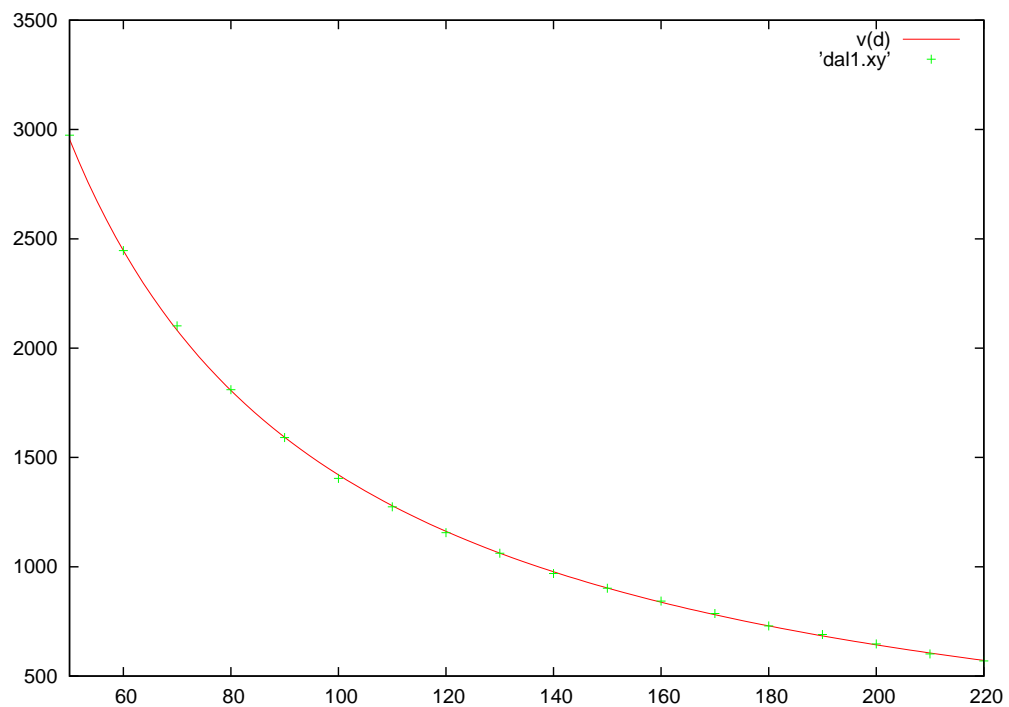
Dalmierze te mają następujące wady:

- Okres pomiarowy wynosi około 40ms (częstotliwość pomiarów ok. 25Hz).

¹Gdy czujniki są umieszczone poniżej osi, $l_0 < 0$



Rysunek 11: Czujniki odległości odpodłoża



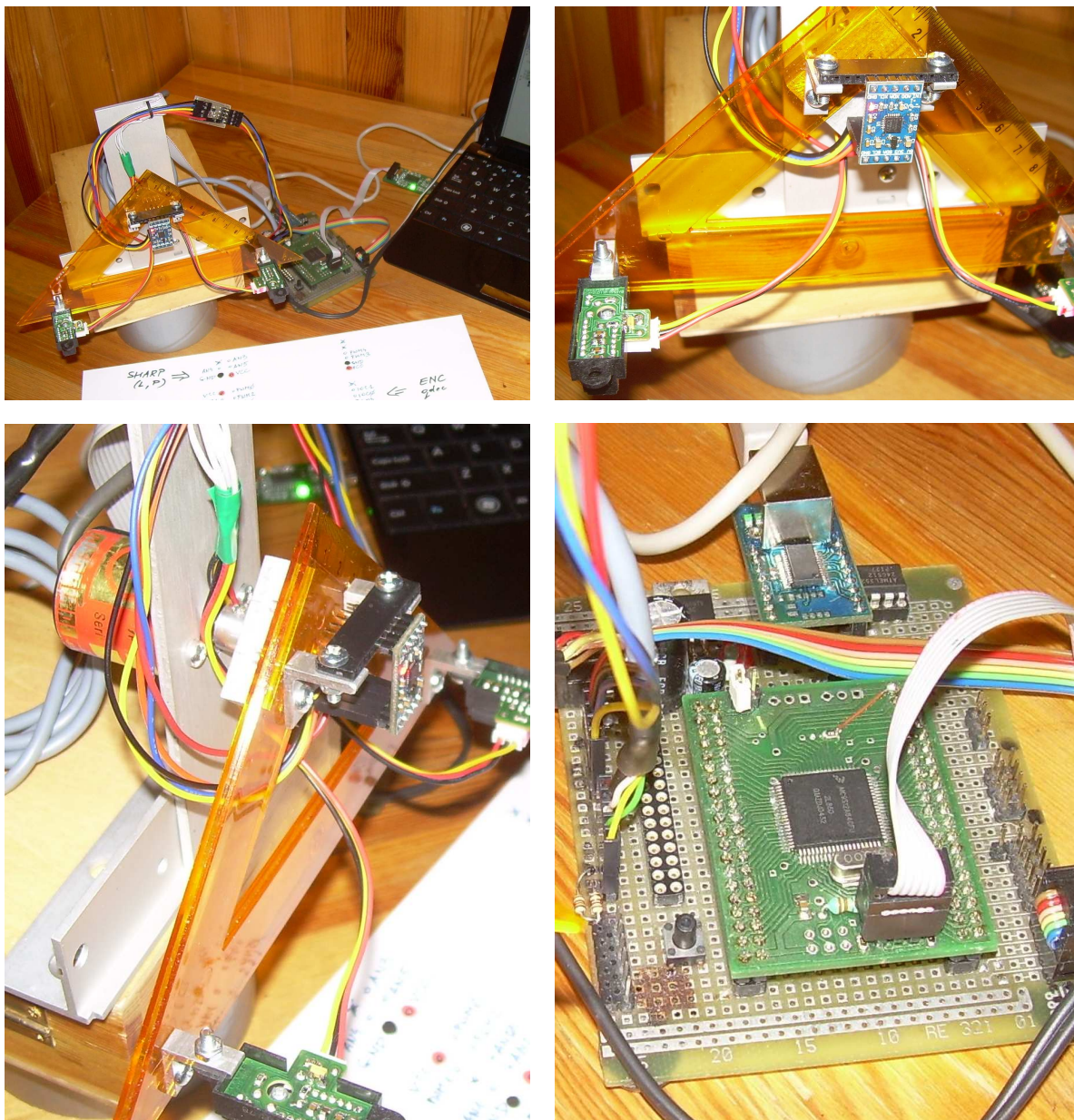
Rysunek 12: Charakterystyka dalmierza SHARP GP120

- Nie ma możliwości zsynchronizowania ich pracy (wyzwalania pomiarów).
- Konieczna jest filtracja pomiarów i eliminacja błędów spowodowanych brakiem synchronizacji.

5.3 Stanowisko badawcze

Opisany układ pomiarowy dostarcza bezwzględnej, choć zakłóconej informacji o orientacji korpusu względem osi kół robota. W celu zbadania przydatności filtracji komplementarnej do poprawienia jakości pomiaru wystarczy wykorzystać całkowanie prędkości kątowej mierzonej żyroskopem MEMS.

W tym celu rozbudowano (rys. 13) stanowisko badawcze opisane w [12] o moduł zawierający układ MPU6050 (z którego wykorzystano tylko oś ω_z żyroskopu).



Rysunek 13: Stanowisko badawcze

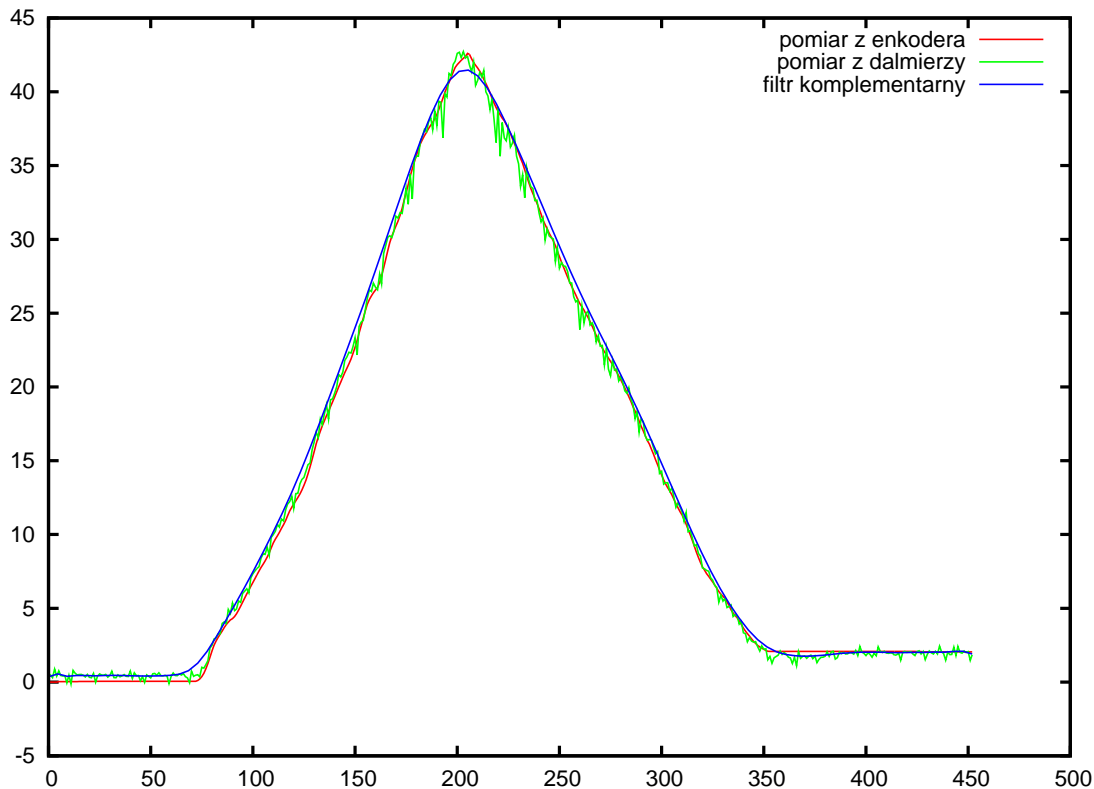
Jako jednostkę centralną zastosowano moduł z mikrokontrolerem 16-bitowym MC9S12A64 [5]. Zaimplementowano na nim algorytm filtracji komplementarnej w celu wyznaczania kąta orientacji β_n :

$$\beta_n = (1 - \varepsilon)(\beta_{n-1} + \tau_c \omega_n) + \varepsilon \alpha_n, \quad (9)$$

gdzie τ_c odpowiada okresowi próbkowania, ω_n jest odczytem z żyroskopu, a α_n – orientacją z opisanego układu dalmierzy (8).

Wyniki przedstawiono na rys. 14.

Filtr komplementarny dał dobre rezultaty. Widoczne jest, że nastąpiło wygładzenie pomiaru kąta β (odchylenia od pionu). Zjawisko dryfu przy całkowaniu żyroskopu nie występuje. Dalszym eta-



Rysunek 14: Wyniki pomiarów

pem badań będzie zaimplementowanie tego algorytmu w robocie RoBik [9, 12] i jego zbadanie na ruchomym obiekcie.

5.4 Uwagi o implementacji w robocie RoBik

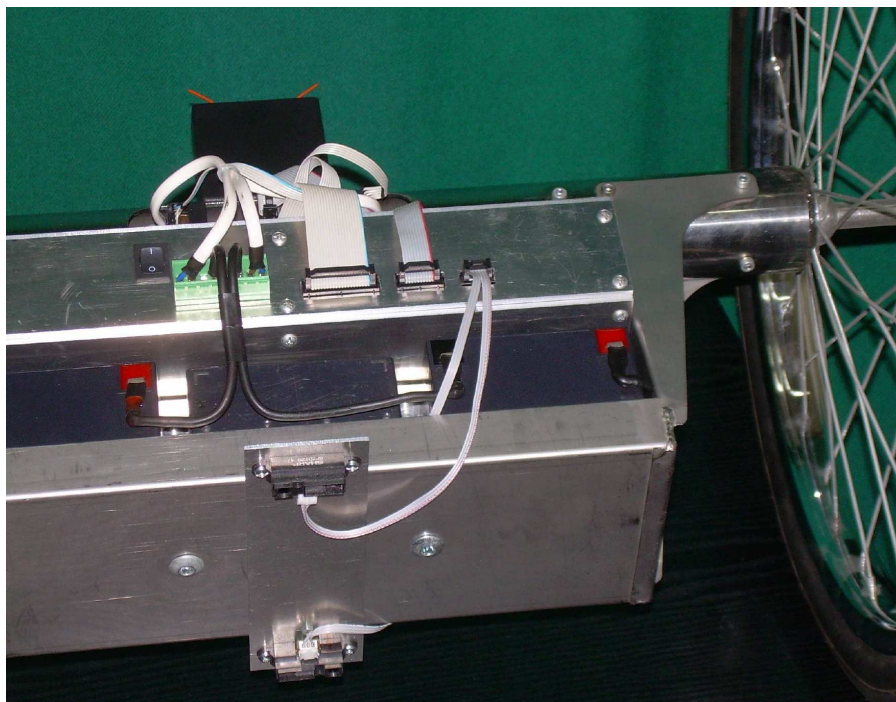
Montaż dalmierzy w robocie RoBik [9] pokazano na rys. 15, a ich podłączenie do przetwornika analogowo-cyfrowego opisano w [12].

Żyroskop w RoBiku jest jednoosiowy, analogowy, typu ENC03JA [15]. Jego wyjście jest podłączone do przetwornika analogowo-cyfrowego za pośrednictwem filtra dolnoprzepustowego. Filtr górno-przepustowy jest wyłączony.

Ze względu na to, że jednostka centralna (MPC555) jest wyposażona w sprzętowy procesor zmien-noprzecinkowy, możliwe będzie zaimplementowanie nie tylko filtra komplementarnego, ale również rozszerzonego fitru Kalmana.

6 Podsumowanie

W przedstawionych przykładach zastosowań filtr komplementarny sprawdził się bardzo dobrze. Daje on rezultaty porównywalne z filtrem Kalmana co do jakości, znacznie przyspieszając go prostotą implementacji. Ma to szczególne znaczenie w niewielkich robotach autonomicznych, w których oszczędność mocy obliczeniowej ma również wymiar energetyczny.



Rysunek 15: Czujniki odległości podłoża w robocie RoBik

Wydaje się, że dobierając starannie parametry filtrów można uzyskać zadowalające rezultaty w zakresie tłumienia szybkozmiennych zakłóceń bez uszczerbku dla szybkości reakcji filtru na chwilowe zmiany orientacji.

Dalsze prace będą ukierunkowane na zbadanie dokładności odwzorowania orientacji z wykorzystaniem manipulatorów przemysłowych jako pozycjonerów.

Literatura

- [1] R. Bieda, R. Grygiel. Wyznaczanie orientacji obiektu w przestrzeni z wykorzystaniem naiwnego filtru Kalmana. *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 1/2014.
- [2] P. Brudny. Czujniki i napędy dla obiektu autonomicznego w przestrzeni trójwymiarowej. Instytut Informatyki Automatyki i Robotyki Politechniki Wrocławskiej, Projekt inżynierski 2014.
- [3] W. Higgins, Jr. A comparison of Complementary and Kalman Filtering. In: *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. Vol. AES-11, No. 3. May 1975.
- [4] A. Jurasik. System stabilizujący poziome położenie platformy. Instytut Informatyki Automatyki i Robotyki Politechniki Wrocławskiej, Projekt inżynierski 2014.
- [5] M. Kabała, M. Wnuk. Moduł z mikrokontrolerem MC9S12A64 (lub MC9S12C32). Instytut Cybernetyki Technicznej Politechniki Wrocławskiej, Raport serii SPR nr 11/2005.
- [6] K. Lauszus A practical approach to Kalman filter and how to implement it.
<http://blog.tkjelectronics.dk/2012/09/a-practical-approach-to-kalman-filter-and-how-to-implement-it/>
- [7] S. Madgwick. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays. April 30, 2010.
- [8] R. Mahony, T. Hamel, J. Pimlin. Nonlinear complementary filters on the special orthogonal group. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, June 2008.
- [9] R. Szlawski, M. Wnuk. Konstrukcja dwukołowego robota mobilnego RoBik. Instytut Cybernetyki Technicznej Politechniki Wrocławskiej, Raport serii SPR nr 12/2004.
- [10] P. Urbaniak. System czujników do robota klasy Micromouse. Instytut Informatyki Automatyki i Robotyki Politechniki Wrocławskiej, Projekt inżynierski 2014.
- [11] G. Welch, G. Bishop. An Introduction to the Kalman Filter. University of North Carolina at Chapel Hill, Department of Computer Science, TR 95-041, March 8, 2007.
- [12] M. Wnuk. Pomiar odchylenia od pionu korpusu robota balansującego. Instytut Informatyki Automatyki i Robotyki Politechniki Wrocławskiej, Raport serii PRE nr 28/2008.
- [13] ADXL345: 3-Axis Digital Accelerometer
<http://www.analog.com/en/mems-sensors/mems-inertial-sensors/adxl345/productsproduct.html>
- [14] BMP085 Datasheet
<http://www.kamami.pl/index.php?productID=179972>
- [15] ENC03JA. Piezoelectric Gyroscopes
<http://www.murata-europe.com/>
- [16] Example-Sketch-for-IMU-including-Kalman-filter.
<https://github.com/TKJElectronics/Example-Sketch-for-IMU-including-Kalman-filter/>
- [17] FXOS8700CQ: Digital Sensor - 3D Accelerometer + 3D Magnetometer
http://www.freescale.com/webapp/sps/site/prod_summary.jsp?code=FXOS8700CQ

- [18] HMC5883L 3-Axis Digital Compass IC
<https://aerospace.honeywell.com/en/products/sensors/non-inertial-sensors/magnetic-field-sensing-and-sensor-solutions/featured-product-hmc5883l>
- [19] Kinetis K6x Ethernet Crypto Microcontrollers (MCUs).
http://www.freescale.com/webapp/sps/site/taxonomy.jsp?code=K60_ETHERNET_CRYPTO_MCU
- [20] L3G4200D MEMS motion sensor: three-axis digital output gyroscope
http://www.st.com/web/catalog/sense_power/FM89/SC1288/PF250373
- [21] LSM9DS0 iNEMO inertial module: 3D accelerometer, 3D gyroscope, 3D magnetometer
http://www.st.com/web/en/catalog/sense_power/FM89/SC1448/PF258556
- [22] LY3200 ALH Gyroscopes mems motion sensor 2000 dps analog yaw
<http://elcodis.com/parts/2065530/LY3200ALH.html>
- [23] MAG3110: Freescale High Accuracy, 3D Magnetometer
http://www.freescale.com/webapp/sps/site/prod_summary.jsp?code=MAG3110
- [24] MAX21000 Ultra-Accurate, Low Power, 3-Axis Digital Output Gyroscope
<http://www.maximintegrated.com/en/products/analog/sensors-and-sensor-interface/MAX21000.html>
- [25] MMA8652FC: Low g, 12-Bit Digital Accelerometer.
http://www.freescale.com/webapp/sps/site/prod_summary.jsp?code=MMA8652FC
- [26] MPL3115A2: 50 to 110kPa, Absolute Digital Pressure Sensor
http://www.freescale.com/webapp/sps/site/prod_summary.jsp?code=MPL3115A2
- [27] MPU-6000/6050: Worlds First Integrated 3-Axis Gyro, 3-Axis Accel and 9-Axis MotionFusion
<http://invensense.com/mems/gyro/mpu6000.html>
- [28] Nota katalogowa mikrokontrolera STM32F103RBT6.
<http://www.st.com/web/catalog/mmc/FM141/SC1169/SS1031/LN1565/PF164487>
- [29] Open source IMU and AHRS algorithms.
<http://www.x-io.co.uk/open-source-imu-and-ahrs-algorithms/>
- [30] Tower System Modular Development Board Platform.
http://www.freescale.com/webapp/sps/site/homepage.jsp?code=TOWER_HOME

dr inż. Marek Wnuk <marek.wnuk@pwr.edu.pl>
Katedra Cybernetyki i Robotyki
Wydział Elektroniki
Politechniki Wrocławskiej
ul. Janiszewskiego 11/17
50-372 Wrocław

Niniejszy raport otrzymują:

1. OINT – 1 egz.
2. Zleceniodawca – 1 egz.
3. Katedra Cybernetyki i Robotyki (W4K7) – 1 egz.
4. Autor – 1 egz.

Raport wykonano w ramach zlecenia S30080: „Sterowanie i percepcja robotów z elastycznościami i emocjonalnie inteligentnych”.

Wpłynęło do redakcji W4/K7
2014-09-25