

# Projekt mobilnego robota holonomicznego z bezprzewodowym inercyjnym systemem sterowania

## Design of mobile holonomic robot with wireless inertial measurement control system

PIOTR RYCHLIK  
WOJCIECH KACZMAREK\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.7.96>

W artykule przedstawiono projekt mobilnego robota holonomicznego, przy czym szczególną uwagę zwrócono na jego sterowanie. Omówiono sposób przetwarzania wartości z czujnika inercyjnego na sygnały elementów wykonawczych, tworzących wraz z kołami szwedzkimi zdefiniowany wcześniej układ holonomiczny. W celu określenia poprawności funkcjonowania robota przeprowadzono szereg testów obejmujących jego oprogramowanie, a następnie wyznaczono podstawowe parametry charakteryzujące mobilność robota.

**SŁOWA KLUCZOWE:** robot mobilny, holonomia, sterowanie, sensor inercyjny, IMU, koło szwedzkie, koło omnikierunkowe

*The article presents the design of mobile holonomic robot, where special attention was given to the robot's control method. It discusses the way of processing values from an inertial measurement unit to actuator signals. In order to determine the correct functioning of the robot, a number of tests were carried out covering its software, and followed by the determining of basic parameters characterizing robot's mobility.*

**KEYWORDS:** mobile robot, holonomy, control, inertial measurement unit, IMU, swedish wheel, omni wheel

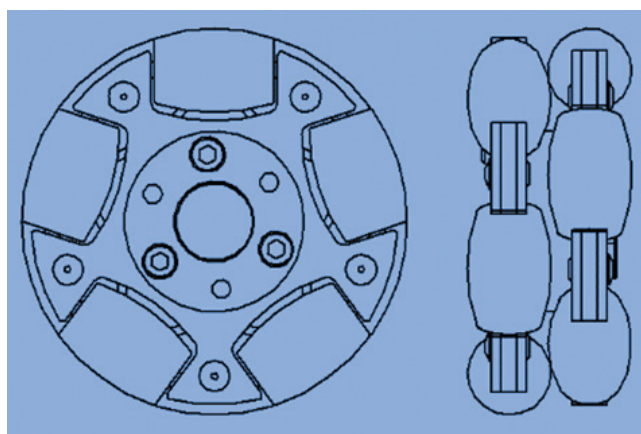
Holonomia jest pojęciem, które dotyczy wszystkich obiektów mogących samodzielnie zmienić swoje położenie w przestrzeni, a zwłaszcza odnosi się do robotów mobilnych – jest jednym z parametrów charakteryzujących podział tych robotów ze względu na model kinematyczny.

Jeżeli za przestrzeń odniesienia przyjmie się przestrzeń  $n$ -wymiarową, to aby nazwać obiekt znajdujący się w tej przestrzeni holonomicznym, musi on mieć co najmniej  $n$  stopni swobody. Jeżeli jednak obiekt może zmienić orientację swojego układu współrzędnych bez zmiany położenia w przestrzeni, to taki układ – mimo braku możliwości ruchu wzdłuż jednej z osi – również nazywa się holonomicznym.

Sterowanie inercyjne polega na odczycie bieżących (chwilowych) wartości przyspieszeń i momentów pochodzących odpowiednio z akcelerometru oraz żyroskopu wzdłuż każdej z trzech osi kartezjańskiego układu współrzędnych. Czujniki inercyjne znalazły zastosowanie zwłaszcza w inercyjnych systemach nawigacji, które są wykorzystywane w pociskach odrzutowych i mają charakter autonomiczny.

### Konstrukcja robota

Jednym ze sposobów zapewnienia robotowi mobilnemu holonomiczności jest zastosowanie kół szwedzkich (omnikierunkowych), które samodzielnie lub zestawione

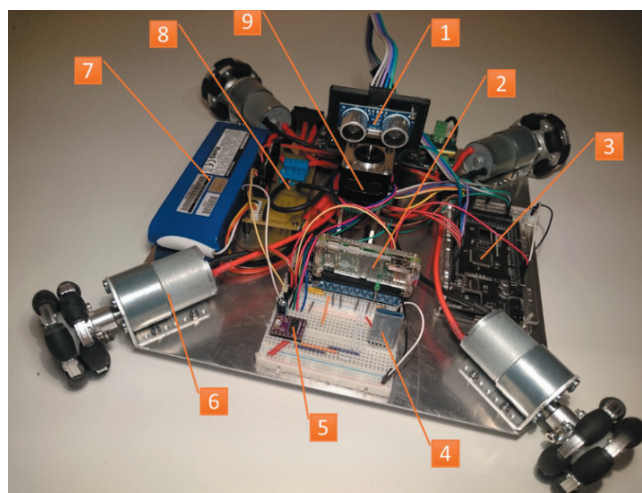


Rys. 1. Podwójne koło omnikierunkowe o średnicy  $\varnothing 60$  mm (opracowano na podstawie modelu 3D dostępnego na: [www.robotshop.com/en/60mm-aluminum-omni-wheel.html](http://www.robotshop.com/en/60mm-aluminum-omni-wheel.html))

w odpowiedni układ zwiększają liczbę stopni swobody robota (rys. 1). Cechą charakterystyczną kół szwedzkich jest umieszczenie na ich obwodzie rolek, co umożliwia ruch wzdłuż głównej (czynnej) osi obrotu koła.

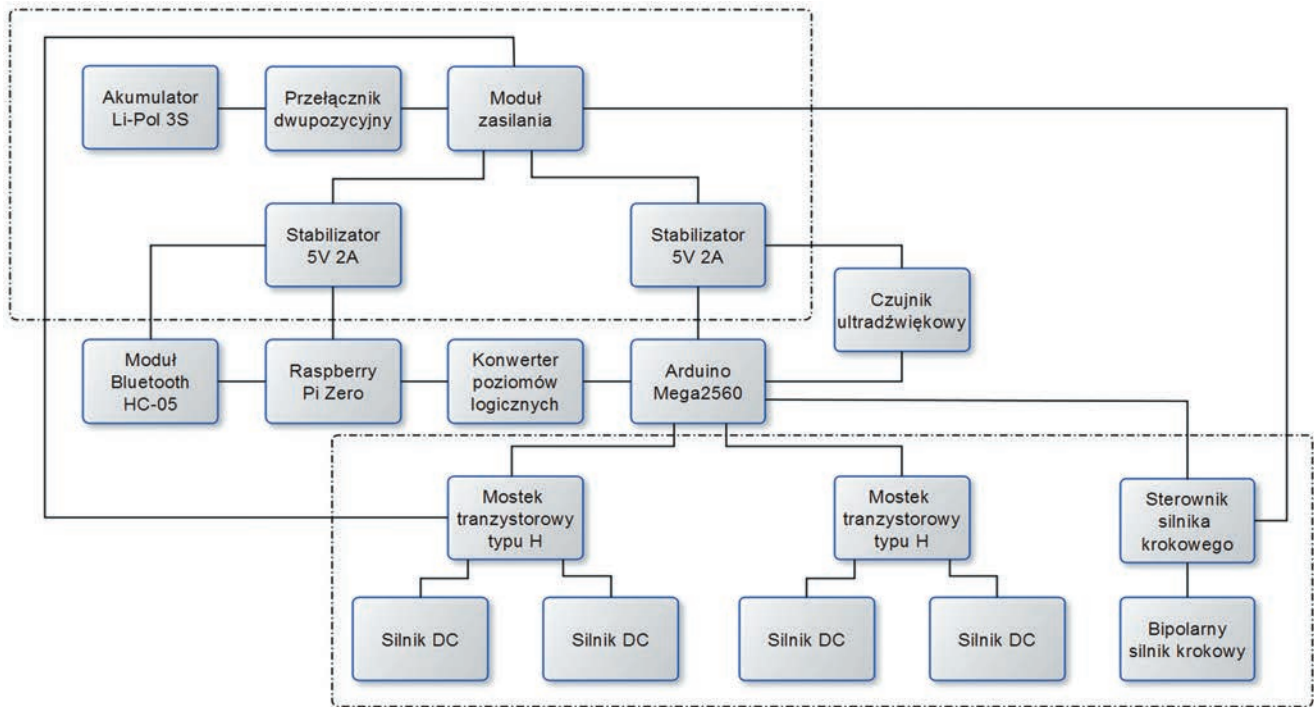
Do napędzania robota zastosowano bezszczotkowe silniki prądu stałego ze zintegrowaną przekładnią planetarną o przełożeniu 70:1, momencie obrotowym 1,41 Nm oraz prędkości obrotowej do 150 obr/min (rys. 2).

Dane wyjściowe czujnika inercyjnego w smartfonie wysyłane są bezprzewodowo do wydajnej pod względem obliczeniowym jednostki nadrzędnej, którą jest mikrokomputer Raspberry Pi Zero, zajmujący się przetwarzaniem danych. Z uwagi na niewielkie możliwości sprzętowego



Rys. 2. Widok robota: 1 – czujnik odległości, 2 – jednostka nadrzędna, 3 – jednostka podrzędna, 4 – moduł Bluetooth, 5 – sterownik silnika krokowego, 6 – silnik DC, 7 – akumulator, 8 – moduł zasilania, 9 – silnik krokowy

\* Piotr Rychlik (piotr.rychlik@student.wat.edu.pl), pplk dr inż. Wojciech Kaczmarek (wojciech.kaczmarek@wat.edu.pl) – Wydział Mechatroniki i Lotnictwa Wojskowej Akademii Technicznej



Rys. 3. Schemat blokowy połączeń elektrycznych

generowania sygnału prostokątnego przez mikrokomputer zastosowano dodatkową jednostkę ATmega2560, bazującą na mikrokontrolerze oraz wyposażoną w 16 portów sprzętowo wspierających modulację szerokości impulsu (do celów realizacji projektu było to w zupełności wystarczające).

Robot został wyposażony w ultradźwiękowy czujnik odległości z możliwością obrotu względem osi pionowej, co pozwoliło na jego obrót zgodnie z kierunkiem ruchu robota. Uproszczony schemat blokowy połączeń elektrycznych przedstawiono na rys. 3.

Komunikacja pomiędzy mikrokomputerem a mikrokontrolerem odbywa się za pomocą interfejsu I<sup>2</sup>C, w którym poprawność przesyłanych danych jest sprawdzana za pomocą cyklicznej kontroli nadmiarowej CRC.

### Platforma programowa i algorytm pracy

Do sterowania kierunkiem i prędkością ruchu robota posłuży modulacja szerokości impulsów PWM oraz sygnały sterujące kierunkiem obrotu wałów silników, które zostaną podane na mostki tranzystorowe typu H, połączone z silnikami prądu stałego. Określenie parametrów ruchu robota nastąpi w jednostce nadrzędnej na podstawie danych pochodzących z akcelerometru smartfona, a następnie parametry te zostaną wysłane do jednostki podrzędnej.

Ramka danych dotyczących kierunku i prędkości ruchu jest wysyłana z telefonu z wykorzystaniem następującego schematu:

$$47_{(16)} Acc_{x(16)} 2C_{(16)} Acc_{y(16)} 2C_{(16)} Acc_{z(16)} 0A_{(16)} \quad (1)$$

Ramka rozpoczyna się od litery „G” zapisanej jako  $47_{(16)}$  w systemie szesnastkowym ASCII [5], a potem następują wartości przyspieszeń  $Acc_{x(16)}$ ,  $Acc_{y(16)}$ , i  $Acc_{z(16)}$  (odpowiednio wzdłuż umownych osi X, Y oraz Z), będące ciągami znaków ASCII – każdy z nich oddzielony jest przecinkiem (zapis  $2C_{(16)}$ ) w celu łatwiejszego i szybszego przetworzenia otrzymywanych wartości przez jednostkę

nadrzędną. Ramka danych kończy się znakiem nowej linii „\n” –  $0A_{(16)}$ .

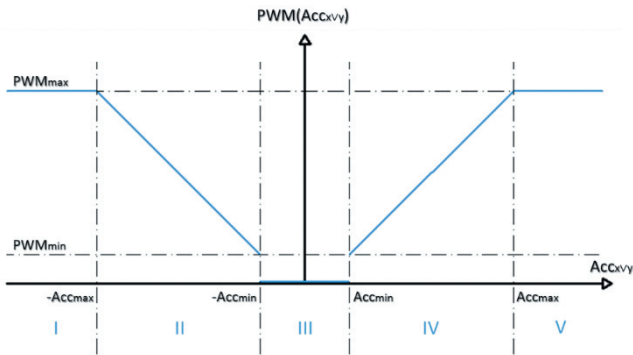
Po uwzględnieniu jedynie przyspieszenia ziemskiego wartości przyspieszenia rejestrowane przez czujnik inercyjny powinny się zawierać w przedziale od 0 do ok.  $\pm 9,81 \text{ m/s}^2$  w zależności od aktualnej orientacji układu współrzędnych akcelerometru względem występującego przyspieszenia. W przypadku wystąpienia dodatkowych przyspieszeń w układzie o zwrocie zgodnym z przyspieszeniem ziemskim wartość wypadkowa przyspieszenia może być większa (lub mniejsza – jeżeli zwrot jest przeciwny) od wyżej wymienionej, dlatego aby wyeliminować niepożądane czynniki, potencjalnie wpływające na ruch robota, obliczany będzie moduł przyspieszenia, porównywany następnie z przyspieszeniem ziemskim i dopuszczalną, ustaloną odchyłką:

$$g - \Delta Acc \leq \sqrt{Acc_x^2 + Acc_y^2 + Acc_z^2} \leq g + \Delta Acc \quad (2)$$

gdzie:  $Acc_x$ ,  $Acc_y$ ,  $Acc_z$  – przyspieszenia wzdłuż osi X, Y oraz Z [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ],  $\Delta Acc$  – odchyłka przyspieszenia [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ],  $g$  – przyspieszenie ziemskie  $\cong 9,81 \text{ [m}\cdot\text{s}^{-2}]$ .

Idea przetworzenia danych z czujnika inercyjnego na kinematyczność robota została przedstawiona na rys. 4. Jak można zaobserwować, funkcja jest parzysta, tzn. średnia wartość generowanego sygnału jest taka sama dla przyspieszeń o tych samych wartościach, lecz o przeciwnych zwrotach. Zaprojektowana charakterystyka jest wprost proporcjonalna do modułu przyspieszenia w przedziałach II oraz IV i może być zapisana jako układ równań:

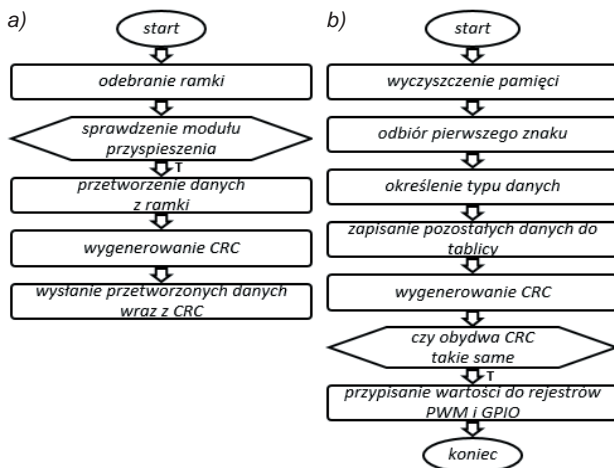
$$PWM(Acc) = \begin{cases} PWM_{\max}, & Acc_{xvy} > |Acc_{\max}| \\ a \cdot |Acc| + b, & Acc_{xvy} \in [\pm Acc_{\min}; \pm Acc_{\max}] \\ 0, & Acc_{xvy} < |Acc_{\min}| \end{cases} \quad (3)$$



Rys. 4. Funkcja sterowania prędkością. Oznaczenia:  $Acc_{xvy}$  – wartość przyspieszenia wzdłuż osi X lub Y smartfona;  $PWM(Acc_{xvy})$  – wartość modulacji szerokości impulsu w funkcji przyspieszenia, która jest wysyłana do odpowiedniego rejestru mikrokontrolera;  $|Acc_{max}|$ ,  $|Acc_{min}|$  – wielkości (punkty) charakterystyczne przyspieszenia, powodujące zmianę monotoniczności funkcji;  $PWM_{min}$  – minimalna średnia wartość sygnału powodująca ruch robota;  $PWM_{max}$  – maksymalna wartość ośmiobitowego rejestru PWM, równoznaczna ze współczynnikiem wypełnienia wynoszącym 100%

Minimalna wartość zmodulowanej szerokości impulsu  $PWM_{min}$ , wywołująca ruch robota, została wyznaczona empirycznie. Wysoka inercja robota nie pozwala mu ruszyć z miejsca przy wartościach mniejszych od  $PWM_{min}$  i większych od zera, co skutkuje tym, że silniki dążą do osiągnięcia maksymalnego poboru prądu – trwa to przez okres utrzymywania się stanu wysokiego generowanego sygnału i powtarza się z okresem odwrotnie proporcjonalnym do częstotliwości sygnału. Właśnie dlatego charakterystyka pokazana na rys. 4 nie obejmuje przedziału na osi rzędnych większych od zera i mniejszych od  $PWM_{min}$ .

Na rys. 5 przedstawiono algorytmy dla jednostki nadrzędnej, zrealizowane w języku Python, oraz algorytm dla jednostki podrzędnej w języku C.



Rys. 5. Algorytmy: a) głównej pętli programowej jednostki nadrzędnej, b) przerwania programowego jednostki podrzędnej

W obu algorytmach zamieszczonych na rys. 5 niespełnienie któregoś z warunków sprawdzających zawartych w polach sześciokątnych powoduje przerwanie dalszego wykonywania algorytmów i powrót do ich początku. Dodatkowo w prostej pętli programowej jednostka podrzędna sprawdza odległość do najbliższej przeszkody – jeżeli jest ona zbyt mała, jednostka nie pozwala na dalszy ruch robota w tym kierunku.

Rotacja wału silnika krokowego odbywa się w sposób autonomiczny na podstawie wartości przyspieszeń wzdłuż osi X oraz Y akcelerometru. Do wyznaczenia kąta obrotu została wykorzystana liczba zespolona  $z$ , w której część

rzeczywista jest równa przyspieszeniu wzdłuż osi X akcelerometru, a część urojona – przyspieszeniu wzdłuż osi Y:

$$z = Acc_x + iAcc_y \quad (4)$$

Wyznaczenie kąta obrotu polega na obliczeniu argumentu głównego liczby zespolonej  $z$ , np. według wzoru [2]:

$$\varphi = \arg z = \arctg \frac{\text{Im}(z)}{\text{Re}(z)} = \arctg \frac{Acc_y}{Acc_x} \quad (5)$$

Następnie należy go przeliczyć na liczbę kroków, które silnik krokowy musi wykonać, aby osiągnąć zadaną pozycję z uwzględnieniem przyrostu, jaki nastąpił względem poprzedniej wartości kąta.

## Testy

Przed przystąpieniem do testów jezdnych sprawdzono: poprawność połączeń poszczególnych elementów, wartości występujących na nich napięć oraz polaryzację. Przeprowadzono także testy programowe dotyczące komunikacji pomiędzy elementami oraz zweryfikowano, czy przetwarzanie danych przebiega prawidłowo i czy daje pożądaną efekt. W ramach transmisji danych celowo wprowadzono błąd do obliczeń CRC, aby sprawdzić, czy w przypadku różnych sum kontrolnych błędne dane zostaną zignorowane.

Podczas testów zasadniczych określono dokładność wykrywania przedmiotów przez zastosowany ultradźwiękowy czujnik odległości, którego dokładność pomiaru wynosi ok. 3 mm. W razie wykrycia przeszkody w odległości 40 cm od czujnika oprogramowanie prawidłowo uniemożliwia dalszy ruch w danym kierunku. Maksymalna prędkość jazdy robota wynosi ok. 0,4 m/s, a kąt nachylenia równi pochyłej, jaką może pokonać robot, to odpowiednio ok. 26°, gdy wykorzystywana jest jedna para silników, oraz 34° dla dwóch par silników. Pomiary prędkości i kąta podjazdu zostały wyznaczone w sposób pośredni, czyli na podstawie zależności funkcyjnej pomiędzy wartością otrzymaną bezpośrednio a wielkością mierzoną [3].

## Wnioski

Zastosowanie kół omnikierunkowych zwiększyło manewrowość robota – umożliwiło jazdę w bok i po skosie oraz obrót wokół własnej osi. Te koła mają jednak swoje wady, które ujawniają się chociażby podczas wjazdu na równię pochyłą. Dla obu przypadków uzyskanego kąta nachylenia silniki mają zapas mocy, by pokonać wzniesienie, lecz koła nie zapewniają wystarczającej płynności ruchu i odpowiedniej przyczepności. Jednym ze sposobów na polepszenie przyczepności i płynności ruchu robota podczas podjazdu na wzniesienie o zwiększonym kącie nachylenia jest zastosowanie większej liczby kół (odpowiednio rozmieszczonych) na jednym wale. Dzięki cyklicznej kontroli nadmiarowej zmniejszono ryzyko przetworzenia nieprawidłowych danych.

## LITERATURA

- Chwaleba A., Moeschke B., Płoszajski G. „Elektronika”. Warszawa: WSiP, 2008, s. 304–324.
- Leitner R. „Zarys matematyki wyższej dla studentów – cz. II”. Warszawa: WNT, 1987, s. 327–343.
- Chwaleba A., Poniński M., Siedlecki A. „Metrologia elektryczna”. Warszawa: WNT, 2010, s. 21.
- Nota katalogowa stabilizatora L78S05CV: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/22636/STMICROELECTRONICS/L78S05CV.html> (dostęp: 25.01.2017 r.).
- Tabela znaków ASCII: [www.asciitable.com](http://www.asciitable.com) (dostęp: 12.01.2017 r.). ■