

# Porównanie metod pozycjonowania robota mobilnego w terenie

Kamil Borycki, Szczepan Kostecki, Michał Sokołowski, Daniel Włodarczyk

Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono trzy wybrane metody pozycjonowania robota mobilnego w terenie oraz ich weryfikację na torze testowym, zbudowanym na potrzeby zawodów European Rover Challenge 2019. Badania zrealizowano z użyciem łazika marsjańskiego „IMPULS II” zbudowanego przez studentów Politechniki Świętokrzyskiej. Przeprowadzone badania pozwoliły na porównanie dokładności pozycjonowania robota mobilnego w terenie. Do analizy oraz wizualizacji badań posłużyła aplikacja umożliwiająca sterowanie oraz śledzenie pozycji robota. Dodatkowo zostały wykonane pomiary odległości łazika od zadanego punktu. Analiza mapy terenu oraz zastosowane algorytmy pozwalają na dojazd robotem do zadanego punktu.

**Słowa kluczowe:** robot mobilny, system GPS, łazik marsjański, nawigacja inercyjna, znacznik terenowy, system nawigacyjny

## 1. Wprowadzenie

Współczesny rozwój robotyki jest dużym wyzwaniem dla konstruktorów i naukowców ze względu na już istniejące technologie czy wymagania użytkowników. Można spotkać wiele urządzeń, które realizują ściśle określone zadania, m.in. roboty spawalnicze, sprzątające, wojskowe. Obecnie konstruktorzy skupiają się na rozwoju systemów autonomicznych. Dzięki nim robot będzie mógł samodzielnie podejmować decyzje – na podstawie widoku z kamer oraz informacji pochodzących z czujników.

Kierunek rozwoju systemów nawigacyjnych dla robotów mobilnych jest przedmiotem wielu publikacji [1–3]. Nowoczesne urządzenia poruszające się w trudnym terenie powinno mieć wbudowane systemy autonomicznego pozycjonowania, wykrywania elementów, przeszkód czy nawet podejmowania decyzji. Do takich zadań został również przygotowany łazik marsjański „IMPULS II”.

W artykule zostały przedstawione metody pozwalające na pozycjonowanie robota mobilnego w terenie, są to:

- wyznaczanie współrzędnych robota za pomocą odbiornika GPS i cyfrowego kompasu,
- nawigacja inercyjna na podstawie odometrii i czujników bezwładnościowych (żyroskop i akcelerometr),
- rozwinięcie nawigacji inercyjnej z wykorzystaniem systemów wizyjnych.

## 2. Systemy nawigacyjne robota „IMPULS II”

Istnieje wiele rozwiązań problemu określenia pozycji robota mobilnego w terenie [4]. Jednym z nich jest zastosowanie bezpośrednich odczytów lokalizacji za pomocą modułu GPS, a użycie odbiornika działającego w trybie różnicowym pozwala zminimalizować błędy pozycji.

Robot mobilny został wyposażony w moduł GPS pracujący w trybie różnicowym, charakteryzujący się parametrami przedstawionymi w Tabeli 1.

**Tabela 1. Parametry modułu GPS**

Table 1. GPS module parameters

Dokładność pozycji poziomej	2,5 m
Dokładność położenia w pionie	5,0 m
Rozdzielczość pozycji	1 mm
Dokładność statyczna	0,3°
Dokładność dynamiczna	0,3°
Rozdzielczość kątowna	< 0,05°
Powtarzalność kątowna	< 0,1°

Podczas planowania trasy przejazdu robota wymagane jest określenie współrzędnych geograficznych poszczególnych punktów. Jeżeli ich wyznaczenie jest wykonane podczas przejazdu trasy przez robota, to błąd pozycji jest równy błędowi odczytów pozycji zastosowanego w nim lokalizatora GPS. Jeśli natomiast punkty zostały wyznaczone za pomocą innego urządzenia lokalizacyjnego, błędy odczytów pozycji sumują się, przez co dokładność pozycjonowania robota w trakcie ruchu po wyznaczonym torze maleje. Dużą niedogodnością metody z użyciem

### Autor korespondujący:

Kamil Borycki, kborycki96@gmail.com

### Artykuł recenzowany

nadesłany 12.11.2019 r., przyjęty do druku 05.12.2019 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

odbiornika GPS jest znaczne pogorszenie lub brak sygnału z satelitów nadawczych w zamkniętych pomieszczeniach, co skutkuje brakiem możliwości wyznaczenia pozycji urządzenia.

Kolejną metodą pozycjonowania robota w terenie jest system nawigacji inercyjnej oparty na algorytmach przyrostowych. W przypadku robota „IMPULS II” jest to fuzja odometrii polegającej na zliczaniu przez procesor pokonanego dystansu za pomocą sygnałów generowanych przez enkodery inkrementalne będące na wyposażeniu zespołu napędowego robota oraz modułu nawigacji inercyjnej. Przeliczając zmiany położenia kąтового kół określone zostaje położenie, natomiast system inercyjny zwraca orientację robota w lokalnym układzie współrzędnych. Układ ten zostaje określony wraz ze startem ruchu robota. Rozwiązanie to nie wymaga sygnałów zewnętrznych określających położenie, lecz wykorzystuje czujniki umieszczone na robocie. Jednak w przypadku uślizgu kół algorytm ten dodaje przemieszczenie, które nie zostało zrealizowane przez robota. Metoda ta oparta na całkowaniu powoduje też nieograniczoną kumulację błędów. Znaczny wpływ ma tutaj również błąd orientacji robota w układzie współrzędnych.

Ostatnią prezentowaną metodą pozycjonowania robota mobilnego jest połączenie nawigacji przyrostowej z wykrywaniem za pomocą kamer, znaczników nawigacyjnych w postaci ARTag o znanym położeniu, kształcie i wielkości. Zastosowanie systemu wizyjnego pozwala na wprowadzenie poprawki do pozycji wyznaczonej za pomocą algorytmu nawigacji inercyjnej, znacząco zwiększając precyzję pozycjonowania robota w terenie. Do efektywnych obliczeń, wymaganych przy operacjach morfologicznych, zastosowano wydajną jednostkę obliczeniową NVIDIA Jetson TX.

### 3. System wizyjny – wykrywanie znaczników

System wizyjny robota „IMPULS II” składa się z głowicy zawierającej dwie kamery pracujące w rozdzielczości 1080 px oraz jednostki obliczeniowej NVIDIA Jetson TX.

Na podstawie otrzymanego obrazu algorytm zwraca poprawki pozycji robota, a następnie za pomocą interfejsu komunikacji szeregowej przesyła je do jednostki głównej robota. Program realizujący wyznaczanie pozycji oraz wprowadzanie poprawek, został napisany w języku C++ z wykorzystaniem autorskich rozwiązań rozpoznawania obrazu wspomaganych bibliotekami OpenCV. Znacznik typu ARTag (rys. 1) jest złożony z kwa-

dratowej, czarnej ramki i wewnętrznej macierzy binarnej, która określa jego identyfikator (id). Czarna ramka ułatwia detekcję znacznika ARTag, a binarna kodyfikacja pozwala na jego identyfikację oraz zastosowanie technik wykrywania i korekcy błędów.

Detekcja znacznika polega na wykonaniu następujących operacji na pojedynczym zdjęciu z kamery cyfrowej. Algorytm obejmuje proces:

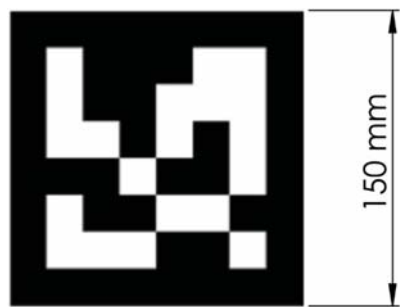
- progowania adaptacyjnego,
- przeprowadzenia operacji morfologicznych (dylatacji, otwarcia, domknięcia oraz erozji),
- analizy otrzymanego obrazu binarnego.

Rozpoznanie markera rozpoczyna się od wykrycia kwadratowych kształtów, które są zbliżone do znacznika ARTag. Następnie obraz poddany jest progowaniu, segmentacji, operacjom morfologicznym oraz szukaniu konturów. Kontury wklęsłe lub odbiegające kształtem od kwadratu są odrzucane. Kolejnym etapem jest filtrowanie (usuwanie zbyt małych lub zbyt dużych konturów, usuwanie konturów zbyt blisko siebie itp.). Po detekcji kształtu kandydującego następuje sprawdzenie czy wykryty element jest znacznikiem typu ARTag. Realizacja następuje przez analizę wewnętrznej kodyfikacji markera. Ten krok rozpoczyna się od wyszukania bitów każdego znacznika. Jest to możliwe dzięki zastosowaniu transformacji perspektywicznej, która pozwala uzyskać marker w jego kanonicznej formie. Następnie obraz kanoniczny jest progowany do oddzielania białych i czarnych bitów. Obraz jest podzielony na komórki zgodnie z wielkością znacznika, wielkością ramki oraz liczbą czarnych lub białych pikseli na każdej komórce, aby ustalić czy jest to bit biały, czy czarny. Na koniec bity są analizowane w celu ustalenia, czy obiekt pasuje do biblioteki zapisanych znaczników ARTag.

### 4. Badania porównawcze dokładności pozycjonowania robota

Teren, na którym zostały przeprowadzone badania, to tor przygotowany na potrzeby zawodów robotycznych European Rover Challenge 2019, mieszczący się na terenie Politechniki Świętokrzyskiej. Dostarczone od organizatorów dane pozwoliły na wyznaczenie mapy (rys. 2), na której zaznaczone zostały zarówno punkty docelowe (czerwone), jak i miejsca ustawienia znaczników ARTag (szare).

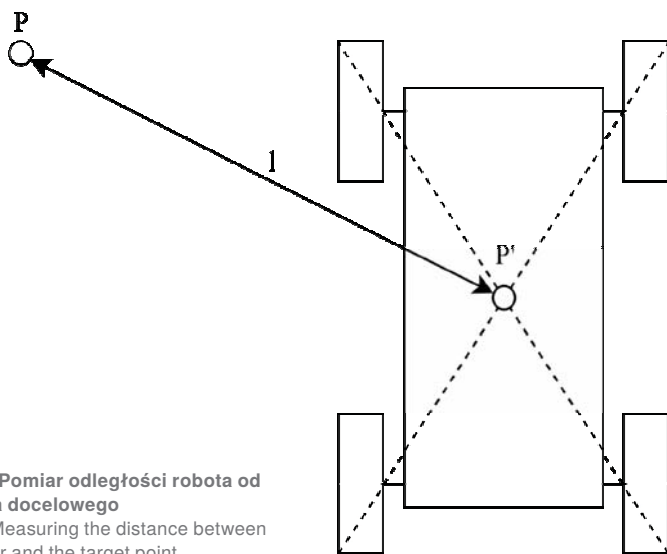
Badanie polegało na wykonaniu serii przejazdów łazikiem „IMPULS II” po wyznaczonej trasie z wykorzystaniem wcze-



Rys. 1. Przykładowy znacznik nawigacyjny umieszczony w punkcie o ściśle określonych współrzędnych znanych a priori  
Fig. 1. Example of landmark placed in known specific point



Rys. 2. Mapa terenu zawodów ERC 2019  
Fig. 2. ECR 2019 competition terrain map



Rys. 3. Pomiar odległości robota od miejsca docelowego  
Fig. 3. Measuring the distance between the rover and the target point



śniej opisanych systemów pozycjonowania robota oraz na pomiarze odległości urządzenia od podanych punktów (rys. 3). Pomiary zostały wykonane taśmą mierniczą z dokładnością do 10 mm.

Różnice pozycji łazika od punktu docelowego wyznaczano od środka geometrycznego łazika, do środka geometrycznego znacznika umieszczonego na torze. Otrzymane wyniki zostały zaprezentowanie w Tabeli 2.

Rozrzut wyników, rozumiany jako różnica między maksymalną a minimalną otrzymaną wartością pomiaru przedstawiono na rys. 4.

Przedziały, w jakich zawierają się otrzymane wartości, przedstawia rys. 5.

Dla zebranych wyników został wyznaczony średni błąd kwadratowy – wzór (1)

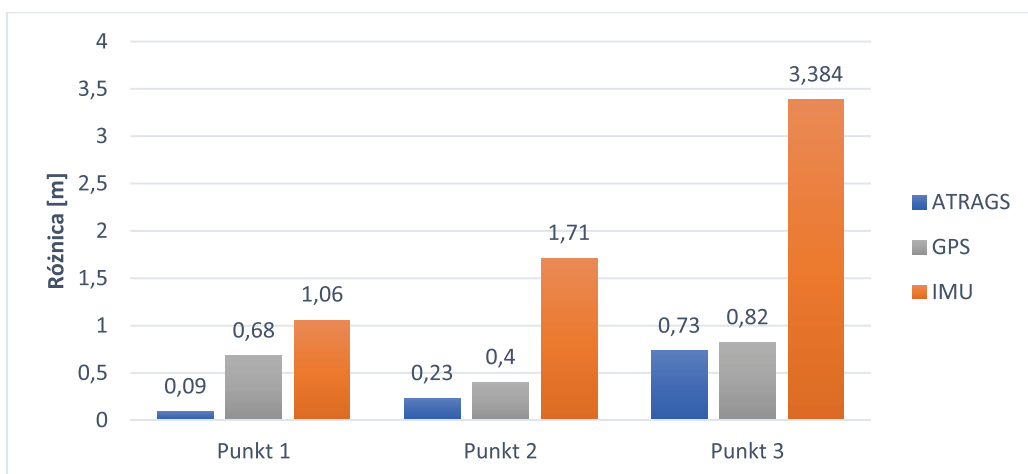
$$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n}} \tag{1}$$

gdzie:  $\bar{x}$  – wartość średnia  $x$  dla całej serii pomiarowej,  $n$  – liczba pomiarów,  $x_i$  – wartość  $i$ -tego pomiaru.

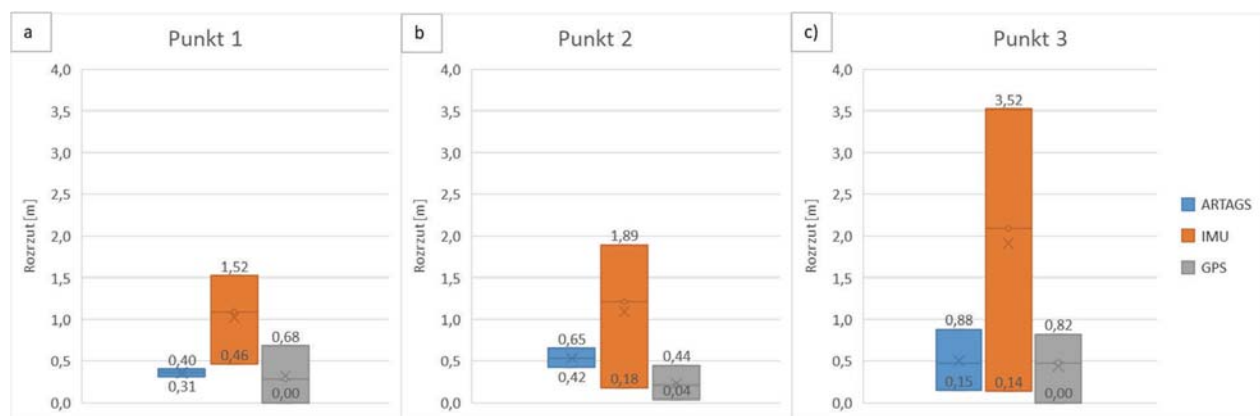
Wartość średniego błędu kwadratowego dokładności dla opisanych metod pozycjonowania robota mobilnego przedstawia rys. 6.

Tabela 2. Uśrednione wyniki różnicy położenia robota od punktu docelowego [m]  
Table 2. Average distance between the rover and the target point [m]

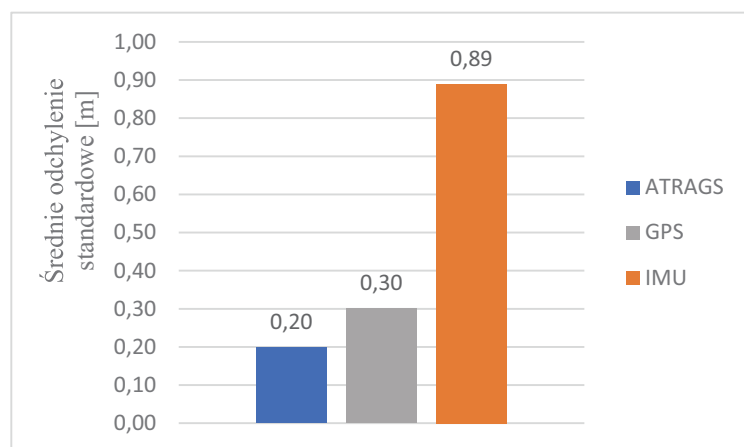
	Punkt 1	Punkt 2	Punkt 3	Średnia
Pozycjonowanie GPS	0,28	0,21	0,48	0,32
Nawigacja inercyjna	1,09	1,21	2,09	1,46
Nawigacja inercyjna + ARTag	0,36	0,53	0,47	0,46



Rys. 4. Rozrzut wyników pomiarów  
Fig. 4. Standard deviation of measurements data



Rys. 5. Przedziały, w których mieszczą się dane pomiarowe dla poszczególnych punktów  
 Fig. 5. Specific points measurement data in characteristic range



Rys. 6. Średni błąd kwadratowy  
 Fig. 6. Mean Squared Error

## 5. Wnioski

Na podstawie analizy otrzymanych wyników można stwierdzić, że najmniejszy błąd pozycji robota został uzyskany podczas przejazdu trasy z użyciem odczytu z różnicowego odbiornika GPS. Natomiast największy błąd został uzyskany przy wykorzystaniu nawigacji inercyjnej. Poprawki otrzymywane na podstawie znaczników ARTag znacząco redukują odchyłkę pomiaru pozycji robota, skutkiem czego wyniki są zbliżone do metody wykorzystującej system GPS. Pozycjonowanie robota bazujące jedynie na nawigacji inercyjnej wykazuje największy rozrzut otrzymanych wyników. Oznacza to, że metoda ta jest najmniej powtarzalna. W przypadku tym błąd pozycji rośnie wraz z kolejnymi punktami docelowymi, co jest spowodowane ciągłą akumulacją błędów powodowanych przez uślizgi kół. Najmniejsza różnica między minimalną a maksymalną wartością błędu występuje w przypadku nawigacji inercyjnej, rozszerzonej o poprawki otrzymywane z systemu wizyjnego. Rozwiązanie to cechuje się największą powtarzalnością otrzymanych wyników.

## Bibliografia

1. Skrzypczyński P., *Postępy autonomii robotów mobilnych: percepcja i nawigacja*. „Pomiary Automatyka Robotyka”, R. 14, Nr 2, 2010, 73–92.
2. Trojnacki M., Szynkarczyk P., *Tendencje rozwoju mobilnych robotów lądowych (3). Autonomia robotów mobilnych stan obecny i perspektywy rozwoju*. „Pomiary Automatyka Robotyka”, R. 12, Nr 9, 2008, 5–9.
3. Giergiel J., Giergiel M., Małka P., *Metody nawigacji mini-robotów kołowych na przykładzie minirobota kołowego m.r.k.* „Pomiary Automatyka Kontrola”, R. 53, Nr 10, 2007, 50–54.
4. Borenstein J., Everett H.R., Feng L., Wehe D., *Mobile robot positioning: Sensors and techniques*. “Journal of Robotic Systems”, Vol. 14, No. 4, 1997, 231–249.

# Comparison of Mobile Robot Positioning Methods in Off-Road Conditions

**Abstract:** The article presents three selected methods of positioning the mobile robot in the off-road conditions and their verification on the test track built for the European Rover Challenge 2019 competition. The research was carried out using the Mars rover „IMPULS II” built by students of the Kielce University of Technology. The research allowed comparison of the mobile robot positioning accuracy in the off-road conditions. The analysis and visualization of research was done using an application that allows control and tracking of the robot's position. Additionally, measurements of the rover's distance from the given point were made. Terrain map analysis and applied algorithms allow robot to get to the given point.

**Keywords:** mobile robots, GPS system, Mars rover, inertial navigation, landmarks, navigation system

**inż. Kamil Borycki**

kborczyk96@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-2584-3536

**inż. Szczepan Kostecki**

szczepan.kostecki@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-4669-5851

**inż. Michał Sokołowski**

michal.sokolowski95@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-1377-1088

**inż. Daniel Włodarczyk**

danielwladarczyk1995@gmail.com  
ORCID: 0000-0003-1149-0538



Drużyna Impuls od kilku lat z powodzeniem zajmuje się projektowaniem i budową łazików marsjańskich. W jej skład wchodzi pasjonaci robotyki, ludzie, którzy chcą szukać nowych rozwiązań technologicznych oraz poszerzać swoje umiejętności. Wszyscy są absolwentami Wydziału Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej. W ciągu ostatnich lat zespół kilkakrotnie stawał na podium w międzynarodowych zawodach łazików marsjańskich. Największym osiągnięciem zespołu jest zdobycie pierwszego miejsca w zawodach: University Rover Challenge w 2019 r. USA, European Rover Challenge w 2018 r. w Starachowicach oraz European Rover Challenge w 2019 r. w Kielcach..