

Piotr ŁAZIK  
Mariusz KOSOBUDZKI\*

DOI: [https://doi.org/10.37190/JoT2022\\_05](https://doi.org/10.37190/JoT2022_05)

## ADAPTACJA SYSTEMU ROS DO STEROWANIA POJAZDEM AUTONOMICZNYM SCORPIO

**Słowa kluczowe:** *ROS, Scorpio, autonomia, Rover Challenge Series*

Poniższy artykuł przedstawia wyzwania stawiane przed łażnikami i zespołami startującymi w zawodach z serii Rover Challenge. Omawiane są najczęściej spotykane zadania podczas zawodów, ich cel, wymagania oraz potrzebne funkcjonalności oprogramowania umożliwiające poprawną i bezpieczną ich realizację w oparciu o metody dostarczane przez Robot Operating System. Niezawodność, bezpieczeństwo i prawidłowość działania wymaga również zastosowania odpowiedniego sprzętu i magistrali komunikacyjnych. W artykule omawiane są rozwiązania i argumenty stojące za wyborami dokonanymi przez zespół Scorpio.

### 1. WPROWADZENIE

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie czytelnikowi problemów z jakimi muszą mierzyć się drużyny biorące udział w zawodach Rover Challenge i rozwiązań jakie zostały wykorzystane przez zespół Scorpio. Przybliżane są realia konkurencji oraz przykładowe przebiegi poszczególnych misji w kontekście do rzeczywistych prac i wyzwań jakim są poddawane łażniki badające powierzchnię Marsa.

Prowadzone na świecie prace nad rozwojem systemów autonomii maszyn i urządzeń doprowadziły do powstania oprogramowania, które może być zaimplementowane do różnych obiektów technicznych, w tym do pojazdów. Przykładem takiego oprogramowania jest ROS – Robot Operating System, stosowany m.in. w robotach sprzątających. Innym przykładem wykorzystania ROS jest pojazd Scorpio, skonstruowany i systematycznie rozwijany przez Koło Naukowe Studentów Politechniki Wrocławskiej. Pojazd

---

\* Piotr Łazik – Koło Naukowe Pojazdów Niekonwencjonalnych OFF-ROAD, Politechnika Wroclawska

Mariusz Kosobudzki – Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Układów Mechatronicznych, Politechnika Wroclawska

ten posiada szereg cech funkcjonalnych (w tym funkcje realizowane autonomicznie) pozwalających na udział w międzynarodowych zawodach serii Rover Challenge Series. Najważniejsze zawody tej serii (URC – Universal Rover Challenge) rozgrywane są na pustyni w stanie Utah w okolicy bazy badawczej symulującej warunki panujące na Marsie (MDRS – Mars Desert Research Station) w USA oraz w Kanadzie (CIRC – Canadian International Rover Challenge) w Badlands Community Facility na przedmieściach Drumheller. Zawody składają się zazwyczaj z czterech konkurencji oraz konkursu projektowego [1]: navigation task, maintenance task, science task oraz delivery task. Rosnący poziom przygotowania drużyn powoduje, że przewagę zdobywają te zespoły, których pojazdy mają zaimplementowane układy autonomii pomagające wykonywać poszczególne zadania w konkursach. Stosowanie systemów autonomii ma pozwolić docelowo na odejście od ręcznego sterowania i wyeliminować problem opóźnień w przekazywaniu poszczególnych komend pomiędzy Ziemią a Marsem, który może wynosić nawet 20 minut [2].

Wyeliminowanie wpływu opóźnień w przesyłaniu komend na sterowanie pracą łazika oraz rosnący poziom zaawansowania pojazdów drużyn konkurencyjnych spowodował, że do pojazdu Scorpio 7 koniecznym stało się zaimplementowanie systemu autonomii. Po przeprowadzeniu analiz dostępnych rozwiązań podjęto decyzję o wykorzystaniu systemu ROS [3].

## 2. WYMAGANIA SYSTEMU AUTONOMII DO POJAZDU SCORPIO 7

Od układu sterowania pojazdem wymaga się zapewnienia możliwości realizacji potrzebnych funkcjonalności do prawidłowego i pełnego wykonywania stawianych przed nim zadań. Wzorcowe są tutaj zadania z zawodów University Rover Challenge [4]. Cztery zróżnicowane zadania sprawdzają przygotowanie zespołu i pojazdu do realizacji zadań w symulowanych warunkach marsjańskich. Zadania te zostały zgrupowane w cztery konkurencje: autonomous navigation mission, equipment servicing mission, extremal retrieval and delivery mission oraz science mission.

### 2.1. MISJA NAWIGACJI AUTONOMICZNEJ

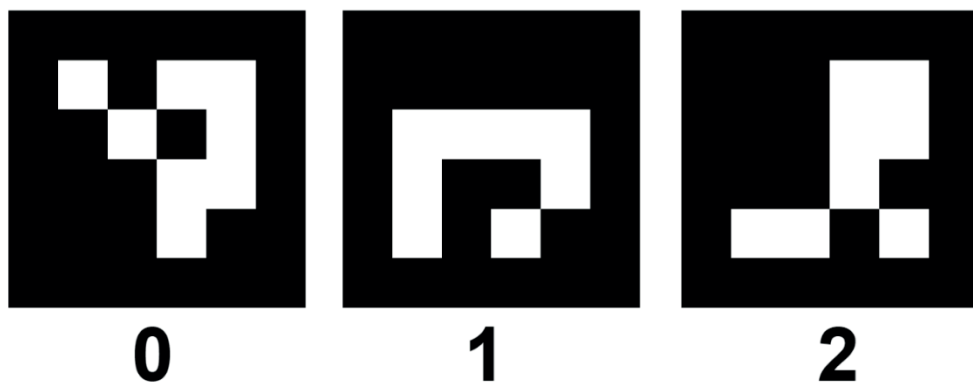
Mars znajduje się około 20 minut świetlnych od Ziemi, co powoduje znaczące opóźnienia w przesyłaniu sygnałów do sterowania urządzeniami, które operują na Czerwonej Planecie. Dlatego coraz ważniejsze staje się rozwijanie algorytmów autonomicznego sterowania niwelujących wpływ czasu transmisji danych. Wtedy Roboty są w stanie wykonywać zadania w krótszym czasie, przebywać większe odległości i być bardziej efektywne nie wydłużając czasu trwania misji.

Czas trwania tego zadania w warunkach symulowanych na Ziemi to 30 minut, a wymagany do przejechania dystans jest nie większy niż 2 km. Te czynniki były brane pod

uwagę przy projektowaniu systemu nawigacji pojazdu, autonomicznego systemu wyznaczania trasy przejazdu oraz efektywnego modułu jezdno.

Pierwsze trzy punkty kontrolne, do jakich ma dojechać robot są oznaczane dokładnymi współrzędnymi GPS. Pojazd musi sekwencyjnie przejechać z punktu do punktu zatrzymując się w promieniu 3 m od niego i włączyć sygnalizator o znajdowaniu się w pobliżu punktu. Trzy następne pozycje są oznaczane wskaźnikiem wizualnym w postaci znacznika Aruco. Ich pozycje są przekazane zespołom z dokładnością od 5 do 20 m. Pojazd musi przejechać w zadane miejsce, a następnie system autonomiczny musi rozpoznać znajdujący się w pobliżu znacznik i zbliżyć się do niego na odległość 2 m. Ostatnią fazą zadania jest przejechanie przez bramę o szerokości 2 m złożoną z dwóch znaczników Aruco.

Program sterujący pojazdem w tym zadaniu musi posiadać funkcję zadawania współrzędnych punktów, ustawiania ich kolejności, rodzaju oraz dodatkowych zadań, którymi w tym wypadku są odszukanie znaczników Aruco [5] i zbliżenie się do nich na wymaganej odległości. Od systemu wymaga się dokładności pozycjonowania, sprawnego wyznaczania optymalnej trasy przejazdu wraz z omijaniem przeszkód i sygnalizacji stanu wykonywanej operacji w danej chwili. Do tych zadań niezbędny jest dokładny GPS, kamera obrotowa lub zestaw kamer obejmujący zasięgiem pole pracy łazika, wydajny komputer pokładowy do przeprowadzania obliczeń i przetwarzania obrazu celem rozpoznawania znaczników oraz wyznaczania optymalnej trasy przejazdu. Na rysunku 1 przedstawiono wzory znaczników Aruco wykorzystywanych w zawodach.



Rys. 1. Znaczniki Aruco z oznaczeniem pozycji w słowniku [12]

Fig. 1. Aruco tags with positions in dictionary [12]

## 2.2. MISJA SERWISOWANIA SPRZĘTU

Rozwiązanie problemu opóźnienia w przesyłaniu sygnałów sterujących pracą robotów na Marsie poprzez rozwinięcie autonomii ich działania w istotnym stopniu wpływa

na osiągnięcie powodzenia całej misji. Nie mniej jednak istnieje ryzyko, że wyposażenie wysłane na Marsa ulegnie awarii i będzie wymagać interwencji udzielonej na miejscu. Przewidywanym sposobem udzielania takiej pomocy jest w takich sytuacjach wykorzystanie obecnych tam robotów. Ponadto, zakłada się współpracę robotów w zakresie wspólnego wykonywania różnych zadań, których wykonanie wykracza poza funkcjonalności pojedynczego systemu technicznego.

Do zbadania możliwości współdziałania robotów oraz sprawdzenia, w jakim zakresie możliwe jest wykorzystanie robotów do wykonywania akcji serwisowych wyposażenia przewiduje się przeprowadzenie odpowiednich testów, których pole działania zajmuje obszar o promieniu 250 metrów i czas wynoszący 30 minut. Zadanie polega na przewiezieniu próbki, której obudowa zawiera uchwyt o długości minimum 10 cm i średnicy nie większej niż 5 cm do lądownika i następnie wykonaniu czynności serwisowych przy lądowniku. Z tego powodu pojazd musi być wyposażony w robotyczne ramię zdolne do otwarcia szafy i umieszczenia w niej próbki oraz zamknięcia i zabezpieczenia jej drzwiczek przed otwarciem poprzez przykręcenie śruby z gniazdem imbusowym 5/16". Następnie należy wprowadzić na klawiaturze zadany tekst oraz manipulując joystickiem nastawić miernik, co ma symulować akcję serwisową. Ostatnimi zadaniami są: wpięcie przewodu do portu USB typu A oraz zmiana pozycji przełączników.

Ze względu na ograniczony czas na wykonanie zadania oraz wymaganą dużą dokładność pracy manipulatora, od systemu sterowania wymaga się takiej jego organizacji, aby operator nie musiał wykonywać dużej liczby ruchów sterujących. W tym celu, dla efektywniejszego wykorzystania dostępnego czasu, do systemu sterowania implementuje się algorytmy z użyciem kinematyki odwrotnej. Takie rozwiązanie wymaga zastosowania czujników położenia każdego członu robota i oddzielne ich sterowanie. Należy mieć na uwadze również prędkość poruszania się punktu referencyjnego: aby ją zwiększyć należy zaimplementować możliwość jednoczesnej zmiany położenia każdego z członów ramienia połączonych z algorytmem kinematyki odwrotnej i generatora ścieżki dla punktu pracy. W ten sposób można uzyskać kojarzenie ruchów poszczególnych członów ramienia, co w efekcie końcowym skraca czas przemieszczenia efektora pomiędzy zadanymi punktami. Rozważany system musi dodatkowo zawierać kamerę obserwującą położenie efektora ramienia robotycznego i dodatkowo kamerę obserwującą cały manipulator. Przykład wykorzystania robota do wykonywania czynności serwisowych został przedstawiony na rysunku 2.



Rys. 2. Model lądownika z interaktywnym panelem [12]

Fig. 2. Lander model with an interactive panel [12]

### 2.3. MISJA ODNALEZIENIA I DOSTARCZENIA ŁADUNKU

Stanowiska do przeprowadzenia różnych konkurencji są rozmieszczone na terenie miejsca przeprowadzania zawodów. Powyższa konkurencja symuluje przygotowanie lądowiska do lądowania lądownika rakiety oraz przewiezienia dostarczonych ładunków do miejsca przeznaczenia.

Zadanie składa się z etapów, na wykonanie których zespół w sumie ma od 30 do 60 minut. Oddalenie się pojazdu od punktu startowego może wynieść do 1 kilometra. Zakończenie każdego etapu w wymaganym czasie dobranym każdorazowo przez organizatorów do trudności danej edycji zawodów oraz zakończonych z zadowalającą dokładnością pozwala na przejście do kolejnego etapu. Poszczególne zadania dotyczą odnalezienia, podniesienia lub przecignięcia narzędzi, skał lub obiektów z przyczepioną liną i dostarczenie ich w podane miejsce. Te rzeczy charakteryzują się różnymi wielkościami, masą do 5 kilogramów, posiadaniem uchwytów lub kół do łatwiejszego transportu.

Ze względu na sterowanie zdalnie przez operatorów wymaga się odpowiednio rozwiniętego systemu komunikacji radiowej dla zapewnienia mocy sygnału wystarczającej do strumieniowania obrazu potrzebnego przy sterowaniu. Dużym atutem przygotowanego

do zawodów pojazdu jest posiadanie przynajmniej częściowej autonomii, która jest przydatna w przypadku zerwania łączności lub jej znaczącego ograniczenia. W przypadku problemów z przesyłaniem obrazu wykorzystujemy algorytmy autonomicznego pokonywania przeszkód i planowania trasy. Opiera on się na trójwymiarowym obrazie terenu generowanym przy wykorzystaniu kamery stereo ZED, pozwalającej na uzyskaniu odległości do obiektów. Wymagania dotyczące ramienia robotycznego są takie same jak przy Equipment Servicing Mission. Moduł jezdny powinien dodatkowo pozwalać na sterowanie manualne przez operatora. Przykład przedstawiający sposób realizacji zadania został przedstawiony na rysunku 3.



Rys. 3. Łazik podczas transportu ładunku w postaci torby z obciążeniem 3 kg [12]

Fig. 3. Rover during transportation of a bag with a 3 kg load [12]

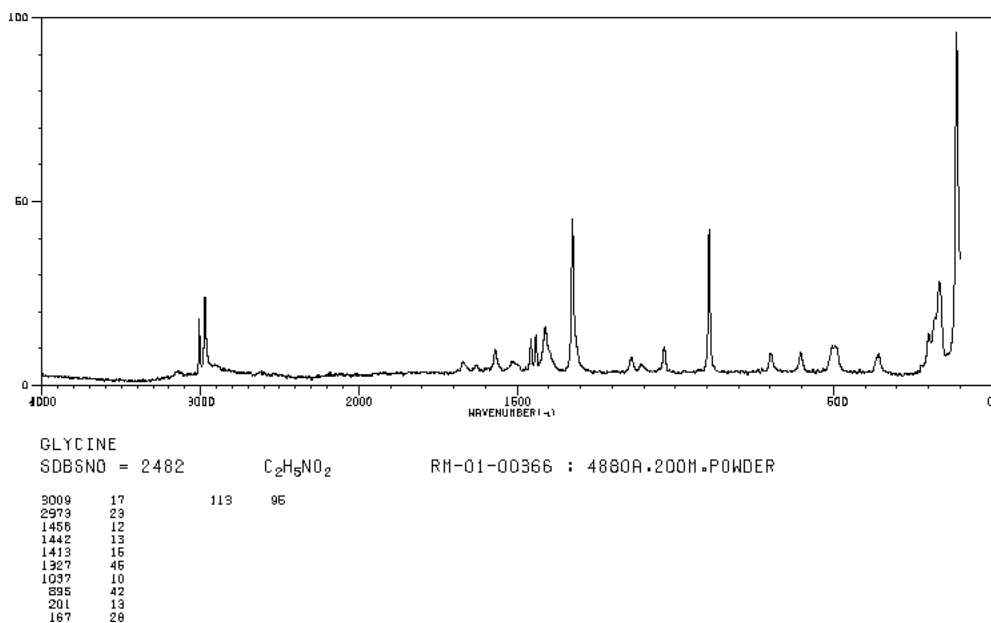
#### 2.4. MISJA NAUKOWA

Wysyłanie pojazdów bezzałogowych na niez rozpoznane planety (w tym przypadku na Marsa) zawsze jest celowe. W tym przypadku zadaniem jest przeprowadzić badania geologiczne podłoża, składu chemicznego atmosfery, czy śladów obecności życia na planecie. Badania takie są przeprowadzane z wykorzystaniem oprzyrządowania, które

stanowi wyposażenie łazika, najlepiej w trybie automatycznym bez konieczności ręcznego sterowania.

W tym zadaniu, na obszarze o promieniu 800 metrów w czasie od 30 do 45 minut, zespół musi przy pomocy instrumentów badawczych zamontowanych na pojeździe wybrać warty zbadania teren i przeprowadzić jego analizy pod kątem obecności życia lub występowania jego śladów. Wszystkie badania muszą być przeprowadzone bezpośrednio na próbce lub po jej pobraniu, na pokładzie pojazdu. Zabrania się przywożenia próbek i analizowania ich przez członków zespołu.

Pojazd powinien być zatem wyposażony w odpowiednie instrumenty badawcze zdolne pobrać próbkę i zbadać zawartości pierwiastków charakterystycznych, związków organicznych lub przez kontrolowane reakcje z odczynnikami chemicznymi. Moduł naukowy musi gromadzić dane, a następnie przysyłać je do bazy zespołu, by tam zostały zinterpretowane. Na podstawie przeprowadzonych badań zespoły mają sformułować swoje wnioski co do obecności życia na planecie. Do tych celów wykorzystywane są mobilne laboratoria wykorzystujące odczynniki do wykrywania substancji wybranych przez zespoły naukowe lub spektrofotometry mogące określać dokładny skład chemiczny próbek na podstawie widma Ramana lub widma światła odbitego [6]. Przykładowy wykres z badania próbki w postaci widma Ramana przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Widmo spektroskopu Ramana [11]

Fig. 4. Raman spectroscopy spectrum [11]

### 3. WYMAGANIA SYSTEMU ZARZĄDZANIA POJAZDEM ZE WZGLĘDU NA OCZEKIWANY POZIOM BEZPIECZEŃSTWA

Ukończenie z sukcesem zadań na zawodach zależy m.in. od niezawodnego pojazdu i jego wyposażenia zapewniających wykonywanie zadań z wysokim prawdopodobieństwem ich ukończenia. Przebieg konkurencji oraz sama punktacja nie jest tutaj głównym celem zawodów. Aby zapewnić odpowiednią niezawodność pojazdu i jego wyposażenia należy wykorzystywać technologie i rozwiązania sprawdzone np. w przemyśle. Pojazd Scorpio korzysta z dwóch głównych systemów wymiany danych między podzespołami sterującymi, tj. magistrali CAN stosowanej do przesyłania komunikatów do sterowników odpowiednich silników kół oraz sterowników członów manipulatora robotycznego i Ethernetu do przesyłania obrazu i danych komunikacyjnych. Połączenie ze sobą niezawodności całego systemu informatycznego łożnika i wysokiej przepustowości danych nie było łatwym zadaniem. Problem bezpieczeństwa w sterowaniu kluczowymi elementami pojazdu tzn. modułu jezdnego oraz modułu ramienia roboczego z problemem zapewnienia wysokiej przepustowości między komputerami pokładowymi rozwiązano przy wykorzystaniu dwóch różnych systemów. Wykorzystano znaną z przemysłu samochodowego magistralę CAN o niewielkiej prędkości przesyłu danych i wysokiej niezawodności oraz standard Ethernet łączący wewnętrzne komputery, kamery i radia z wysokimi prędkościami przesyłów.

#### 3.1. CHARAKTERYSTYKA MAGISTRALI CAN

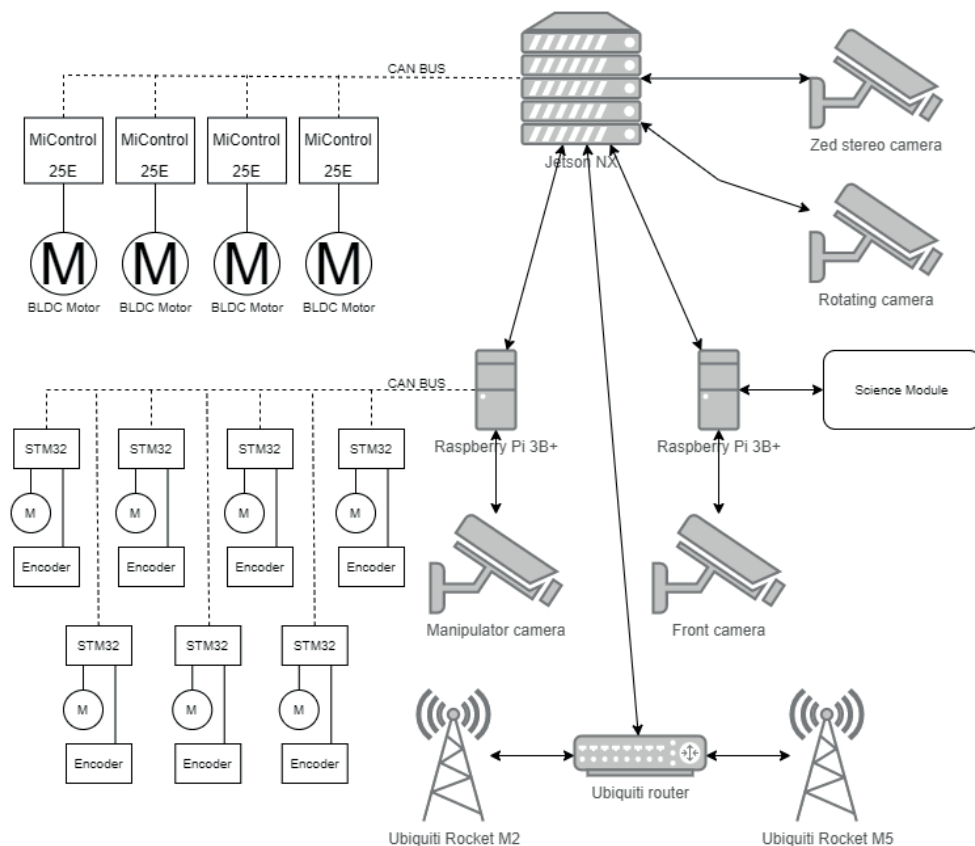
W pojeździe wydzielono dwie osobne linie magistrali CAN, które zostały skonfigurowane w różny sposób. Zabezpieczenie w postaci wykorzystania osobnej linii danych do komunikacji ze sterownikami MiControl 25E zwiększyła niezawodność redukując wpływ uszkodzenia lub wystąpienia błędów na linii komunikującej się z kontrolerami członów manipulatora. Linia ta jest skonfigurowana do pracy z wysoką przepustowością 1Mbit/s co jest wartością graniczną dla magistrali CAN [7]. Drugą oddzielną linią magistrali CAN jest linia łącząca ze sobą kontrolery członów ramienia robotycznego. Każdy z członów posiada niezależny enkoder absolutny, silnik DC oraz płytkę z mikrokontrolerem STM32 komunikującą się poprzez magistralę CAN z komputerem zarządzającym.

#### 3.2. CHARAKTERYSTYKA SIECI ETHERNET

Infrastruktura sieciowa pojazdu jest uzupełniona o Ethernet w standardzie 100 Mbit/s, który łączy ze sobą główne komputery pojazdu wraz z systemem radiowym i kamerami. Pozwala to na strumieniowanie obrazu, przesyłanie danych z przepustowościami wymaganymi do zapewnienia ciągłości pracy. Sieć ta nie jest tak niezawodna jak



magistrala CAN [8]. Decyzja o zastosowaniu dwóch różnych form komunikacji modułów Scorpio została podjęta na podstawie analiz wymagań i możliwości każdego rozwiązania. Struktura sieci przesyłu danych w pojeździe Scorpio została przedstawiona na rysunku 5.



Rys. 5. Schemat sieci informatycznej w pojeździe Scorpio [12]

Fig. 5. Diagram of the IT network in the Scorpio vehicle [12]

Głównym elementem sterującym pracą poszczególnych układów pojazdu jest komputer Nvidia Jetson Xavier NX stworzony dla systemów wbudowanych i pojazdów autonomicznych. Razem z systemem Linux Ubuntu 18.04, na którym zainstalowane zostały niezbędne narzędzia potrzebne do działania i sterowania funkcjami pojazdu. Komputer ten uruchamia funkcję roscore – podstawowy moduł zarządzania procesami i komunikacją. Włączane są m.in. funkcje logowania danych, nazewnictwa procesów i serwer parametrów. [9]

#### 4. WNIOSKI

Wymagania zawodów serii Rover Challenge wymagają niestandardowego podejścia do projektowania pojazdów autonomicznych. Z jednej strony ważna jest prostota rozwiązań, która minimalizuje ilość kluczowych podzespołów, których awarie mogą skutkować niepowodzeniem wykonywanego zadania, a z drugiej strony skomplikowanie misji wymaga od programistów uwzględnienia możliwie dużej ilości scenariuszy.

Z pomocą programistom przychodzi ROS, system organizujący komunikację między procesami jak również pozwalający na współdziałanie wielu komputerów i mikroprocesorów. Standaryzuje rodzaj i sposób przekazywanych danych, odstępstwa i błędy są sygnalizowane dzięki czemu wszelkie nieprawidłowości mogą być szybko wychwycone przez programistów i operatorów. Dostarczanie przykładowego kodu, robotów dla środowiska symulacyjnego Gazebo oraz biblioteki zapewniające podstawowe rozwiązania autonomiczne ułatwiło tworzenie na ich bazie i programowanie algorytmów do działań autonomicznych. Modułowa architektura, którą należy stosować przy tworzeniu oprogramowania w oparciu o ROSa pozwoliła na zrównoleglenie prac i wprowadziła dodatkowy poziom bezpieczeństwa w postaci przygotowania zapasowych modułów, które można uruchomić gdy zawiodą podstawowe rozwiązania.

Algorytmy autonomii muszą być dostosowane do różnych środowisk pracy, przeznaczenia i danych wejściowych. Niezawodność, jakiej wymaga się od całego układu pojazdu, determinuje sposób komunikacji wewnętrznej, który ze względu na bezpieczeństwo działania musi korzystać z niezawodnych kanałów wymiany informacji. Wykorzystane przez zespół Scorpio magistrala CAN oraz protokół Ethernet sprawdzają się podczas wykonywania zadań testowych. Dostępność rozwiązań i opracowań miała również wpływ na wybór tych środków. Duża grupa zespołów biorących udział w zawodach Rover Challenge korzysta z podobnych rozwiązań [10]. Ros jest dostosowany do działania z robotami kołowymi, gąsienicowymi i pływającymi natomiast przypadku budowania robotów z innym przeznaczeniem należy zawsze uwzględnić wady i zalety dostępnych rozwiązań systemów.

#### LITERATURA

- [1] [www.rcs.marssociety.org](http://www.rcs.marssociety.org) (dostęp: 06.05.2022).
- [2] [www.mars.nasa.gov/mer/mission/technology/autonomous-planetary-mobility](http://www.mars.nasa.gov/mer/mission/technology/autonomous-planetary-mobility) (dostęp: 06.05.2022).
- [3] MARIN-PLAZA P., HUSSEIN A., MARTIN D., DE LA ESCALERA A, *Global and Local Path Planning Study in a ROS-Based Research Platform for Autonomous Vehicles*, Journal of Advanced Transportation, vol. 2018, Article ID 6392697, 2018.
- [4] [www.urc.marssociety.org/home/requirements-guidelines](http://www.urc.marssociety.org/home/requirements-guidelines) (dostęp: 06.05.2022).
- [5] [www.docs.opencv.org/4.x/d5/dae/tutorial\\_aruco\\_detection.html](http://www.docs.opencv.org/4.x/d5/dae/tutorial_aruco_detection.html) (dostęp: 06.05.2022).
- [6] [www.engineering.usu.edu/mae/students/senior-projects/fall2018-spring2019/university-rover-science](http://www.engineering.usu.edu/mae/students/senior-projects/fall2018-spring2019/university-rover-science) (dostęp: 06.05.2022).

- 
- [7] [www.can-cia.org/can-knowledge/can/classical-can/](http://www.can-cia.org/can-knowledge/can/classical-can/) (dostęp: 06.05.2022).
- [8] SAWANT A., JOSHI D., SVB L., *CAN, FlexRay, MOST versus Ethernet for vehicular networks*, International Journal of Innovations & Advancement in Computer Science, 2018.
- [9] [www.wiki.ros.org/roscore](http://www.wiki.ros.org/roscore) (dostęp: 06.05.2022).
- [10] SNIDER D., MIRVISH M., BARCIS M., TEZER V. A., *University Rover Challenge: Tutorials and Team Survey*, [w:] Robot Operating System (ROS): The Complete Reference (Volume 3), 2018.
- [11] [www.sdfs.db.aist.go.jp](http://www.sdfs.db.aist.go.jp) (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 09.06.2022).
- [12] opracowanie własne.

## ADAPTATION OF THE ROS SYSTEM TO CONTROL THE SCORPIO AUTONOMOUS VEHICLE

**Key words:** *ROS, Scorpio, autonomia, Rover Challenge Series*

The following article presents the challenges faced by rovers and teams competing in the Rover Challenge series. The most common tasks during the competition are discussed, along with their purpose, requirements and needed software functionality to enable their correct and safe implementation based on methods provided by the Robot Operating System. Reliability, safety and correct operation also require the use of appropriate hardware and communication networks. The paper discusses the solutions and arguments behind the choices made by the Scorpio team.

Corresponding author:  
e-mail: 260371@student.pwr.edu.pl