

Test stand to design control algorithms for mobile robots

Abstract. The work presents a stand for researching mobile robots, allowing for prototyping of new or improving the existing control algorithms. The elements of the research stand were described, including the parameters of the QBot 2e wheeled mobile robot. In addition, the article presents the results of exemplary odometry measurements obtained for two robot paths based on data read from an inertial measurements unit equipped with a gyroscope and an accelerometer.

Streszczenie. W pracy przedstawiono stanowisko służące do badań robotów mobilnych, pozwalające na prototypowanie nowych, bądź też ulepszanie istniejących algorytmów sterowania. Opisano elementy stanowiska, w tym parametry kołowego robota mobilnego QBot 2e. Dodatkowo, w artykule zaprezentowano wyniki przykładowych pomiarów odometrycznych uzyskanych dla dwóch zadanych ścieżek robota na podstawie danych odczytywanych z inercyjnej jednostki pomiarowej wyposażonej w żyroskop i akcelerometr. (Stanowisko do prototypowania algorytmów sterowania kołowymi robotami mobilnymi)

Keywords: wheeled mobile robot, forward kinematics, real-time target, hardware in the loop
Słowa kluczowe: kołowe roboty mobilne, kinematyka prosta, platforma docelowa czasu rzeczywistego

Wprowadzenie

W ciągu ostatnich lat zauważa się znaczący wzrost rozwoju technologii, które związane są ze sterowaniem oraz komunikacją dotyczącą robotów mobilnych w tym kołowych robotów mobilnych. Posiadanie odpowiedniego i niezbędnego sprzętu i oprogramowania pozwalającego na prototypowanie i symulację algorytmów w warunkach laboratoryjnych jest bardzo ważne, aby móc rozwijać te technologie. Artykuł przedstawia utworzone na Wydziale Elektrycznym Politechniki Częstochowskiej Laboratorium Inteligentnych Robotów Mobilnych. W skład wyposażenia laboratorium wchodzi cztery quadcoptery (QDrone), dwa roboty kołowe (QBot 2e), które wyposażone zostały bogatym zestawem czujników, osiem kamer lokalizujących (OptiTrack Flex 13), naziemną stację kontroli wraz z oprogramowaniem Matlab-Simulink oraz infrastrukturę niezbędną do komunikacji i bezpieczeństwa. W artykule przedstawione zostało pełne wyposażenie laboratorium oraz przedstawione zostały przykładowe trajektorie kołowego robota mobilnego wraz z wynikami pomiarów z czujników monitorujących różne dane zarejestrowane podczas pracy.

W ostatnim czasie robotyka rozwija się bardzo szybko. Powstaje znaczna liczba nowych rozwiązań technologicznych wspierających ludzką pracę. Nierzadko są to prace wykonywane w trudnych warunkach lub też wymagające dużego wysiłku fizycznego a także prace, których ludzie nie są w stanie wykonać sami [1]. Jedną z najszybciej rozwijających się gałęzi robotyki są roboty mobilne, które mają dużą zdolność do poruszania się w przestrzeni lądowej, powietrznej oraz wodnej [2]. Roboty takie mogą być sterowane zdalnie przez człowieka lub też mogą służyć jako autonomiczne jednostki. W zależności od stosowanego systemu mobilności, roboty można podzielić na: kołowe, chodzące, podwodne i inne [1]. Kołowe roboty mobilne mają swoje zastosowanie w wielu dziedzinach życia, zaczynając na prostych zadaniach domowych takich jak sprzątanie, kończąc na specjalistycznych pracach jakimi może być praca w skażonym środowisku [3, 4]. W celu usprawnienia komunikacji pomiędzy robotami oraz możliwości ich pracy autonomicznej, opracowywane są coraz to nowsze rozwiązania. Roboty doposażają się w odpowiednie narzędzia pozwalające im na wykonanie zadań, jakie zostają przed nimi postawione. Realizacja wspierana jest za pomocą różnych lokalizatorów takich jak GPS, systemów wizyjnych i innych dodatkowych czujników. Do sprawnego poruszania się w środowisku konieczne jest, aby robot posiadał możliwość tworzenia mapy otaczającej go przestrzeni oraz

do lokalizowania się w niej. Jest to bardzo ważny obszar badawczy. Ciągłe rozwijające się roboty mobilne są związane z wynalezieniem nowych układów zasilania, nowych materiałów, zwiększaniem mocy obliczeniowej elektronicznych układów i rozbudowa układów sterowania co przyczynia się do powstawania lepszych projektów stosowanych w dziedzinach życia ludzkiego. Jednym z ważnych zadań robota, niezbędnych do prawidłowego sterowania jest zadanie lokalizacji robota w czasie rzeczywistym. Jest ono często realizowane z wykorzystaniem danych odometrycznych. Z tego powodu roboty często wyposaża się w inercyjne jednostki pomiarowe (IMU) w technologii MEMS. Jednostki takie posiadają zintegrowany akcelerometr i żyroskop, dzięki którym możliwe są pomiary przyspieszenia liniowego i kątownego oraz prędkości liniowej i kątownej platformy jezdnej robota [7].

Stanowisko do badań robotów mobilnych

Laboratorium wyposażono w zestaw sprzętowo-programowy, o nazwie Autonomous Vehicles Research Studio, umożliwiający przeprowadzenie badań związanych z robotami mobilnymi. W jego skład wchodzi: cztery quadcoptery (QDrone), dwa roboty kołowe (QBot 2e), osiem kamer lokalizujących (Optitrack Flex 13) oraz naziemna stacja kontroli (Ground Control Station) [8]. Fotografie laboratorium zaprezentowano na rys. 1.



Fig. 1. Laboratorium Inteligentnych Robotów Mobilnych.

Stacja kontroli składa się z komputera PC o parametrach: Intel Core i7 z 32 GB pamięci RAM DDR4 [8] wraz z oprogramowaniem: Matlab 2018a, QUARC Real-Time Control Software 2018, Motive 2.0, Visual Studio Community Compiler 2017. Do obsługi posiadamy trzy monitory, joystick kontrolera lotu na USB, router dwuzakresowy 2.4Ghz i 5Ghz.



Fig. 2. Kołowy robot mobilny QBot 2e [9]

Jednym z elementów środowiska jest robot mobilny QBot 2e. Jest to autonomiczny robot naziemny o otwartej architekturze, zbudowany na dwukołowej platformie mobilnej Kobuki. Składa się z dwóch centralnych kół napędowych (z enkoderami) zamontowanych na wspólnej osi, która przecina robota. Odległość między lewym i prawym kołem wynosi 23,5 cm. Średnica pojazdu zaś 35 cm, a jego wysokość (bez dodatków) wynosi 10 cm z zamontowanym czujnikiem Kinect sięga 27 cm. Platforma może się poruszać z maksymalną prędkością 0,7 m/s [9]. Robot wykorzystuje mechanizm napędowy zwany napędem różnicowym. Kółka z przodu i z tyłu robota stabilizują platformę bez uszczerbku dla ruchu. Każde koło napędowe może być niezależnie napędzane do przodu i do tyłu. Ruch każdego koła mierzy się za pomocą enkoderów, a orientację robota lub kąt odchylenia można szacować za pomocą zintegrowanego żyroskopu (IMU). QBot 2e posiada zintegrowane czujniki uderzenia (lewy, prawy i środkowy) oraz czujniki krawędzi (lewy, prawy i środkowy) [9]. Robot wyposażono w komputer pokładowy Raspberry Pi 3 B+ i zintegrowaną bezprzewodową sieć LAN, co umożliwi bezprzewodowe połączenie między stacją badawczą i/lub innymi pojazdami. Na pokładzie robota znajdziemy system wizyjny Microsoft Kinect, co pozwala przetwarzać dane RGB i głębokości do różnych celów, w tym inspekcji wzrokowej, mapowania siatki 2D i 3D. Kamery posiadają rozdzielczość 640x480 pikseli. Czujnik głębokości Kinect wykorzystuje światło podczerwone i ma zasięg od 0,5 m do 6 m [1]. Całkowita masa robota wynosi to 3,82 kg. Robota QBot 2e przedstawiono na rys. 2.

Przestrzeń roboczą otacza siatka w formie kwadratu, a podłoga wyłożona panelami antypoślizgowymi. Całość posiada wymiary 5x5 x 2,5 metra.

W warstwie programowej laboratorium wyposażone jest w środowisko Matlab/Simulink współpracujące ze sterownikami sprzętowymi QUARC firmy Quanser. Pozwala to na wykorzystanie kluczowych funkcjonalności wymaganych do badań nad wieloma pojazdami poprzez różnorodne konfigurowalne moduły. Dodatkowo umożliwia tworzenie aplikacji wysokiego poziomu i rekonfigurację procesów niskiego poziomu obsługiwanych przez wstępnie wbudowane moduły i biblioteki QUARC, przygotowane przez producenta. Aplikacje te można rozbudowywać lub tworzyć swoje algorytmy od podstaw, wykorzystując jedynie bloki lub fragmenty wcześniej wspomnianych bloków.

Oprogramowanie QUARC Real-Time Control Software 2018 generuje kod w czasie rzeczywistym bezpośrednio ze sterowników zaprojektowanych przez Simulink i uruchamia go w czasie rzeczywistym na docelowym systemie Windows.

W związku z potrzebą komunikacji między stacją roboczą a robotem, często stosuje się dwa modele utworzone w Simulink. Jeden z nich (Mission Server)

pozwała na planowanie ścieżki robota, a drugi (Stabilizer) jest odpowiedzialny za jej realizację. Każdy z wyżej wymienionych modeli jest uruchomiony na innej docelowej platformie sprzętowej, Mission Server na stacji bazowej pod kontrolą systemu Windows, a Stabilizer na systemie operacyjnym Linux badanego robota. Modele wymieniają dane za pośrednictwem protokołu TCP IP i routera bezprzewodowego.

W dalszej części pracy opisano model kinematyki robota Qbot 2e oraz wyniki przykładowych badań przeprowadzonych na wyżej opisanym stanowisku.

Model kinematyki kołowego robota mobilnego QBot 2e

Ruch kołowego robota mobilnego QBot 2e opisywany jest przez równania kinematyki prostej i odwrotnej napędu różnicowego. Kinematyka prosta używana jest do lokalizacji robota w przestrzeni roboczej natomiast kinematyka odwrotna pozwala na sterowanie robotem i programowanie jego ruchu. Schemat robota mobilnego w lokalnym układzie odniesienia, wraz z podstawowymi parametrami kinematyki przedstawiono na rys. 3.

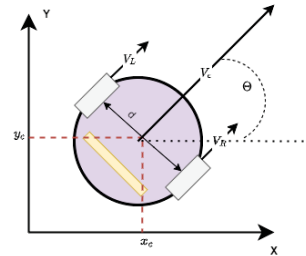


Fig. 3. Schemat robota mobilnego QBot 2e

Na rys. 3 przyjęto następujące oznaczenia parametrów kinematyki: v_L , v_R , m/s – prędkości liniowe odpowiednio: lewego i prawego koła, v_c , m/s – prędkość liniowa platformy jezdnej, d , m – odległość pomiędzy kołami, Θ , rad – kąt obrotu platformy jezdnej względem osi OX wokół osi prostopadłej do płaszczyzny OXY , x , y – współrzędne środka platformy jezdnej opisujące położenie robota.

Uwzględniając oznaczenia z rys. 3 można wyprowadzić następujące równania opisujące ruch robota [5, 6]:

$$(1) \quad \begin{aligned} v_c &= \frac{v_R + v_L}{2}, \\ \omega_c &= \frac{v_R - v_L}{d}, \\ r_{ICC} &= d \cdot \frac{v_R + v_L}{2(v_R - v_L)}, \end{aligned}$$

gdzie: r_{ICC} – chwilowy promień krzywizny ścieżki, $\omega_c = \dot{\Theta}$ – prędkość kątowa wokół osi obrotu robota.

Równania (1) odnoszą się do opisu ruchu względem lokalnego układu odniesienia (tzn. układu związanego z platformą jezdnią). W praktyce, dla przykładu w zagadnieniu mapowania otoczenia, niezbędne jest uzyskanie opisu w odniesieniu do globalnego układu współrzędnych. W takim przypadku opisywany model kinematyki prostej przyjmuje następującą postać [5]:

$$(2) \quad \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\Theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(v_R + v_L) \cos \Theta \\ \frac{1}{2}(v_R + v_L) \sin \Theta \\ \frac{1}{d}(v_R - v_L) \end{bmatrix}.$$

Model kinematyki odwrotnej wyraża się równaniem:

$$(3) \quad \begin{bmatrix} v_R \\ v_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_c + \frac{1}{2}d\omega_c \\ v_c - \frac{1}{2}d\omega_c \end{bmatrix}.$$

W przykładowych badaniach opisanych w dalszej części niniejszej pracy model 2 został zastosowany do wyznaczania pozycji robota QBot 2e.

Metodyka badań

W dalszej części opisano przykładowe badania dwóch algorytmów lokalizacji robota QBot 2e przeprowadzone na opisywanym stanowisku. Badania przebiegały w następujących etapach:

1. Zaprogramowanie ruchu robota zgodnie z przyjętą ścieżką w środowisku Matlab/Simulink
2. Kompilacja i przesłanie modelu symulacyjnego na platformę docelową działającą w czasie rzeczywistym (ang. *real time target*)
3. Uruchomienie modelu na platformie docelowej i symulacja sprzętowa w trybie HIL (ang. *hardware in the loop*)
4. Analiza wyników symulacji sprzętowej HIL

Do programowania ruchu robota zastosowano model symulacyjny programu Simulink, którego schemat przedstawiono na rys. 4. Ruch robota został zaprogramowany

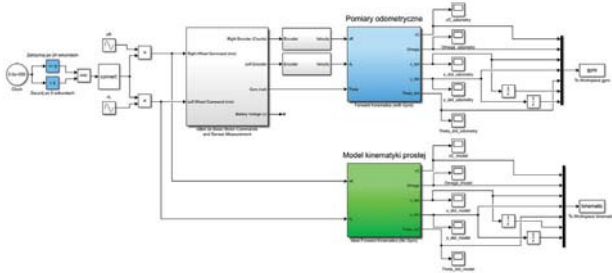


Fig. 4. Schemat modelu symulacji sprzętowej zastosowany do badania algorytmów lokalizacji robota mobilnego QBot 2e

w taki sposób, aby możliwe było porównanie lokalizacji uzyskiwanej z wykorzystaniem danych odometrycznych rejestrowanych w czasie rzeczywistym przez enkodery podłączone do kół robota oraz czujnik IMU zainstalowany na platformie jezdnej (rys. 4 blok niebieski), z wynikami symulacji modelu kinematyki (2), (rys. 4 blok zielony). Ścieżkę ruchu zadawano poprzez zmianę w czasie prędkości $v_R(t)$ i $v_L(t)$. Przykładowe wyniki badań uzyskano dla dwóch wariantów ścieżek. W wariacie pierwszym prędkości $v_R(t)$ i $v_L(t)$ zadawano za pomocą następujących funkcji czasu:

$$(4) \quad \begin{aligned} v_L(t) &= 0.15\sin(t + 3.1) + 0.35, \text{ m/s,} \\ v_R(t) &= 0.15\sin(t) + 0.35, \text{ m/s.} \end{aligned}$$

W wariacie drugim, zadaną ścieżkę zaprogramowano zadając stałe prędkości liniowe kół $v_R(t) = 0.6$ m/s i $v_L(t) = 0.3$ m/s, co skutkuje jazdą po okręgu ze stałą prędkością v_c .

Jak wspomniano wyżej, w trakcie realizacji zadanej ścieżki, rejestrowano w czasie rzeczywistym dane pochodzące z enkoderów, żyroskopu i akcelerometru, w tym prędkość liniową platformy jezdnej v_c oraz prędkość kątową platformy ω_c . W dalszej kolejności wyniki tych pomiarów posłużyły do lokalizacji odometrycznej robota, przy czym pozę w chwili t , w globalnym układzie odniesienia uzyskano na podstawie całkowania równania (2) w granicach od 0 do t :

$$(5) \quad \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ \Theta(t) \end{bmatrix} = \int_0^t \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(v_R + v_L) \cos \Theta \\ \frac{1}{2}(v_R + v_L) \sin \Theta \\ \frac{1}{d}(v_R - v_L) \end{bmatrix} dt.$$

Wyniki badań

Poniżej zaprezentowano przykładowe wyniki badań dla dwóch wyżej wymienionych wariantów ścieżek. Na rys. 5 przedstawiono ścieżkę robota, uzyskaną na podstawie symulacji modelu (2) oraz pomiarów odometrycznych i równania (5). Przebiegi czasowe prędkości liniowej v_c i kątowej ω_c pokazano na rys. 6 i 7. Dodatkowo na rys. 8 przedstawiono przebiegi czasowe zmian położenia współrzędnych x i y robota.

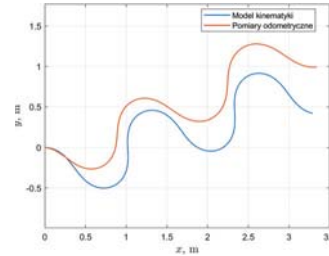


Fig. 5. Ścieżka robota QBot 2e odtwarzana w trakcie symulacji sprzętowej HIL (wariant 1)

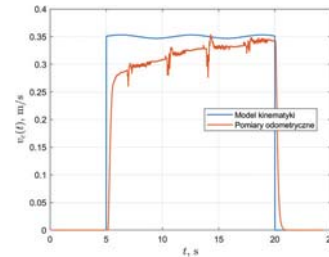


Fig. 6. Przebieg czasowy prędkości liniowej v_c robota w trakcie symulacji sprzętowej HIL (wariant 1)

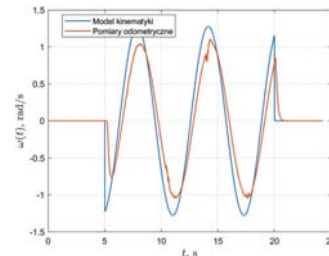


Fig. 7. Przebieg czasowy prędkości kątowej ω_c robota w trakcie symulacji sprzętowej HIL (wariant 1)

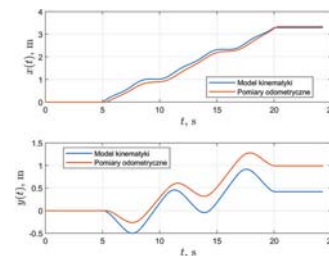


Fig. 8. Przebiegi czasowe położenia środka platformy jezdnej robota w trakcie symulacji sprzętowej HIL (wariant 1)

Wyniki uzyskane dla wariantu drugiego przedstawiono na rys. 9–12. Ścieżkę robota wyznaczoną na podstawie symulacji modelu (2) oraz pomiarów odometrycznych i równania (5) przedstawiono na rys. 9. Z kolei na rys. 10–12 zaprezentowano odpowiednio: przebiegi czasowe prędkości liniowej v_c , przebiegi czasowe prędkości kątowej ω_c oraz przebiegi czasowe zmian położenia współrzędnych x i y robota.

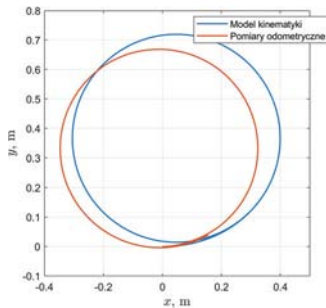


Fig. 9. Ścieżka robota QBot 2e odtwarzana w trakcie symulacji sprzętowej HIL (wariant 2)

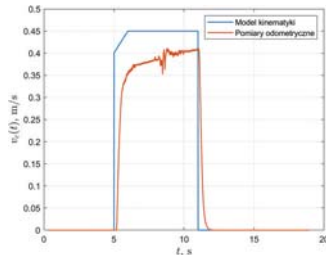


Fig. 10. Przebieg czasowy prędkości liniowej v_c robota w trakcie symulacji sprzętowej HIL (wariant 2)

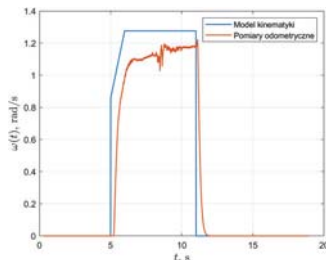


Fig. 11. Przebieg czasowy prędkości kątowej ω_c robota w trakcie symulacji sprzętowej HIL (wariant 2)

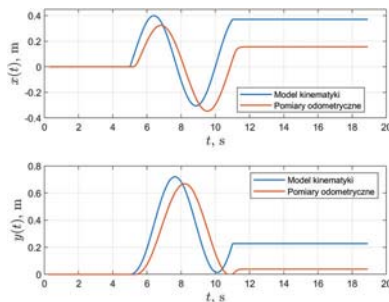


Fig. 12. Przebiegi czasowe położenia środka platformy jezdnej robota w trakcie symulacji sprzętowej HIL (wariant 2)

Wnioski

W pracy przedstawiono stanowisko do prototypowania algorytmów sterowania kołowymi robotami mobilnymi QBot 2e. Wyniki badań przeprowadzonych w laboratorium wskazują na duże możliwości symulacji sprzętowej HIL (*Hardware In the Loop*) ścieżek robotów mobilnych, w szczególności robotów kołowych opisywanych równaniami kinematyki napędu różnicowego. Dodatkowo, stanowisko pozwala na weryfikację dokładności pomiarów sygnałów pochodzących z czujników zainstalowanych na platformie jezdnej robota. Dzięki zastosowaniu oprogramowania Matlab/Simulink możliwa jest też rejestracja parametrów ruchu badanego robota w czasie rzeczywistym. Architektura oprogramowania używanego na opisywanym stanowisku została zaprojektowana tak, aby zapewnić kluczowe funkcjonalności wymagane do badań nad wieloma pojazdami, poprzez różnorodne konfigurowalne moduły. Umożliwia to tworze-

nie aplikacji wysokiego poziomu i rekonfigurację procesów niskiego poziomu, obsługiwanych przez wbudowane sterowniki i biblioteki.

Analizując rys. 6–8 oraz 10–12 można zauważyć, że niezerowe wartości sygnałów są obserwowane w przedziale czasowym $t > 5$ s. Jest to spowodowane faktem, iż w modelach symulacyjnych zastosowano 5-sekundowy czas opóźnienia przed wykonaniem ścieżki, przeznaczony na kalibrację żyroskopu zainstalowanego na robocie QBot 2e. W trakcie badań stwierdzono, że kalibracja ta istotnie zwiększa dokładność pomiarów odometrycznych. Jak można zauważyć z rys. 5 i 9, występuje różnica w lokalizacji robota za pomocą modelu kinematyki i pomiarów odometrycznych dla obu testowanych wariantów ścieżek. Z tego powodu należy stwierdzić, że równania kinematyki są niewystarczające do poprawnej lokalizacji robota w przestrzeni. Różnica w lokalizacji jest spowodowana m.in. poślizgiem oraz wpływem właściwości dynamicznych platformy jezdnej, nieuwzględnionych w równaniach (2) opisujących kinematykę badanego robota. Wpływ ten zobrazowano na wykresach przebiegów czasowych prędkości liniowej i kątowej przedstawionych na rys. 6, 7 oraz 10 i 11.

Authors: dr hab. inż. Sebastian Dudzik, Politechnika Częstochowska, Katedra Automatyki, Elektrotechniki i Optoelektroniki, ul. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, Poland, email: sebdud@el.pcz.czest.pl; mgr inż. Anna Podsiedlik, Politechnika Częstochowska, ul. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, Poland, email: anna.podsiedlik@pcz.pl; mgr inż. Adam Rapalski, Politechnika Częstochowska, ul. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, Poland, email: adam.rapalski@pcz.pl;

REFERENCES

- [1] Clue A. Le, R., Wang J. Ahn I. S.: Distributed Vision-Based Target Tracking Control Using Multiple Mobile Robots, IEEE International Conference on Electro/Information Technology (EIT), Rochester, MI, 2018, pp. 0471-0476.
- [2] Trojnecki M., Szykarczyk P., Andrzejuk A.: Tendencje rozwoju mobilnych robotów lądowych, *Pomiary Automatyka Robotyka* (6), pp. 11–14, 2008.
- [3] Machado T., Malheiro T., Monteiro S., Erlhagen W., Bicho E.: Attractor dynamics approach to joint transportation by autonomous robots: theory, implementation and validation on the factory floor", *Autonomous Robots* 43, pp. 589–610, 2019.
- [4] Yamaguchi H., Nishijima A., Kawakami A.: Control of two manipulation points of a cooperative transportation system with two car-like vehicles following parametric curve paths, *Robotics and Autonomous Systems* (63), pp. 165-178, 2015.
- [5] Dudek G., Jenkin M.: *Computational Principles of Mobile Robotics*. Cambridge University Press, 2010
- [6] Bethencourt, J. V. M., Ling, Fernández Q, Á. V.: Controller design and implementation for a differential drive wheeled mobile robot, *Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, Mi-nyang, pp. 4038-4043, 2011.
- [7] Hoflinger F. Muller J. Tork M. Reindl L. M. Burgard W.: A Wireless Micro Inertial Measurement Unit (IMU), *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 62(9) DOI: 10.1109/I2MTC.2012.6229271
- [8] QUANSER: <https://www.quanser.com/products/autonomous-vehicles-research-studio/>
- [9] QUANSER: <https://www.quanser.com/products/qbot-2e/>