

doi:10.15199/48.2024.01.64

Analiza funkcjonowania systemu LIDAR w autonomicznym robocie mobilnych AMR

Streszczenie. W artykule przedstawiono problematykę funkcjonowania systemu lokalizacji typu LIDAR w zastosowaniach autonomicznych robotów mobilnych klasy AMR. Skupiono się na wykorzystaniu tych robotów jako platform jezdnych do różnych zadań, które wymagają precyzyjnego pozycjonowania. Badania i prace rozwojowe mające na celu stworzenie robota zdolnego do wykonywania prac ogrodniczych, takich jak monitorowanie uprawy (robot inspekcyjny), zbieranie owoców oraz prace pielęgnacyjne, doprowadziły do określenia wymagań konstrukcyjnych i eksploatacyjnych dla platformy jezdnej. W celu spełnienia tych wymagań, zdecydowano się na budowę dedykowanego systemu jezdnych, co zaowocowało przeprowadzeniem badań doświadczalnych w celu oceny dokładności pozycjonowania seryjnie produkowanego robota mobilnego. Wyniki tych badań będą stanowiły punkt odniesienia dla tworzonego prototypu. Wszystkie opisane działania mają na celu osiągnięcie wysokiej precyzji pozycjonowania, która jest kluczowa dla skuteczności wykonywanych zadań. Platformy jezdne robotów AMR zazwyczaj wykorzystują kilka systemów lokalizacyjnych, które współpracują ze sobą. Mogą to być układy kamer wzajemnie zsynchronizowanych lub oparte na triangulacji (pomiarze kątów do trzech obiektów znajdujących się na jednym obrazie). Te metody mogą być uzupełnione przez skanery laserowe, które mierzą odległości od obiektów w bliskim otoczeniu, pozwalając na równoczesny pomiar w szerokim zakresie kątowym. Analiza uzyskanych wyników pozwoliła stwierdzić, że wykorzystanie pojedynczej metody nawigacji w interfejsie robota mobilnego prowadzi do osiągnięcia niskiego stopnia powtarzalności i precyzji dla całego systemu robotycznego.

Abstract. The article presents the issue of the functioning of the LIDAR type location system in the applications of autonomous mobile robots of the AMR class. The focus was on using these robots as mobile platforms for various tasks that require precise positioning. Research and development work aimed at creating a robot capable of performing gardening tasks, such as crop monitoring (inspection robot), fruit picking and maintenance work, led to the determination of construction and operational requirements for the mobile platform. In order to meet these requirements, it was decided to build a dedicated drive system, which resulted in conducting experimental research to assess the positioning accuracy of a mass-produced mobile robot. The results of these tests will be a reference point for the prototype being created. All described activities are aimed at achieving high positioning precision, which is crucial for the effectiveness of the tasks performed. AMR robotic mobile platforms typically use several locating systems that work together. These can be systems of cameras synchronized with each other or based on triangulation (measuring the angles of up to three objects in one image). These methods can be complemented by laser scanners that measure distances to objects in close proximity, allowing simultaneous measurement over a wide angle range. The analysis of the obtained results allowed to conclude that the use of a single navigation method in the mobile robot interface leads to a low degree of repeatability and precision for the entire robotic system. (**Analysis of the functioning of the LIDAR system in the autonomous AMR mobile robot**)

Słowa kluczowe: autonomiczny robot mobilny, nawigacja LIDAR

Keywords: Autonomous Mobile Robot (AMR), navigation LIDAR

Wprowadzenie

Roboty autonomiczne AMR (ang. AMR - Autonomous Mobile Robots) to zaawansowane urządzenia robotyczne zdolne do wykonywania zadań bez bezpośredniego zaangażowania człowieka i nie wymagające stałego nadzoru. Są one wyposażone w systemy nawigacji, percepcji otoczenia oraz algorytmy sterowania, które umożliwiają im poruszanie się oraz reagowanie na zmienne warunki otoczenia i wykonywanie określonych zadań [14]. Roboty autonomiczne są zdolne do nawigacji w przestrzeni bez potrzeby bezpośredniego sterowania. Wykorzystują do tego zróżnicowane technologie, takie jak skanery laserowe, kamery, system LIDAR (ang. Light Detection and Ranging), czujniki ultradźwiękowe czy czujniki odometrii [2,3,10]. Są one niezbędne aby analizować otoczenie, identyfikować przeszkody i planować optymalną trasę. Roboty autonomiczne wykorzystują algorytmy planowania ruchu, które pozwalają im znaleźć optymalną ścieżkę do wykonania zadanego przemieszczenia [1]. Algorytmy te uwzględniają informacje o otoczeniu, obiektach ruchomych i przeszkodach, minimalizując ryzyko kolizji. Bezpieczeństwo jest kluczowym aspektem dla robotów autonomicznych, szczególnie w sytuacjach, gdzie mogą współpracować z ludźmi. Dlatego projektowanie i testowanie systemów bezpieczeństwa jest nieodzowne [13]. Roboty autonomiczne posiadają duży potencjał w poprawianiu efektywności i bezpieczeństwa w wielu dziedzinach życia, ale wymagają zaawansowanych technologii, odpowiednich algorytmów oraz monitorowania ze strony specjalistów, aby zagwarantować poprawność ich funkcjonowania [5]. Ronald C. Arkin [1] w 1998r. stwierdził, iż sterowanie robotów mobilnych opiera się w oparciu o dwa nurty, tzn.:

- podejście deliberatywne – działanie w oparciu o szersze rozważanie oraz późniejszą „konfrontację” zebranych informacji w celu znalezienia odpowiedniego wyjścia;
- podejście reaktywne – działanie na zasadzie reakcji na bodźce w czasie rzeczywistym.

Nowoczesne podejście, na miarę możliwości sprzętowych bazuje na tzw. drzewach behawioralnych BT (ang. Behavior Trees). Z racji tego, iż nie kreują one toru jazdy na bazie informacji zbieranych w czasie rzeczywistym z otoczenia, lokuje się je pomiędzy systemem reaktywnym, a hybrydowym. System ten wymaga wcześniejszego zaplanowania, a wybór odpowiedniego toru ruchu uzależniony jest od aktualnie pobieranych sygnałów z sensorów. Drzewa behawioralne służą do planowania sekwencji postępowania w celu zdobycia długoterminowych celów [7,12].

Celem pracy była analiza i ocena funkcjonowania systemu autonomicznej identyfikacji położenia autonomicznego robota mobilnego w otoczeniu w kontekście wypracowania założeń dla projektowanej autonomicznej platformy jezdnej.

Analiza i ocena funkcjonowania systemu autonomicznej identyfikacji położenia autonomicznego robota mobilnego w otoczeniu jest kluczowym aspektem zapewnienia skuteczności i bezpieczeństwa działania robota [4]. Proces ten wymaga uwzględnienia wielu czynników i technologii, które wpływają na dokładność i niezawodność identyfikacji położenia. Poniżej przedstawiono te, które uwzględniono w metodyce badawczej jako kluczowe dla projektowanej platformy jezdnej:

- technologie lokalizacyjne. Należy zidentyfikować zastosowane technologie lokalizacyjne, takie jak skanery laserowe (LIDAR), kamery, GPS, inercyjne jednostki pomiarowe (IMU) i inne. Każda z tych technologii ma swoje ograniczenia i precyzję, która wpływa na ogólną dokładność identyfikacji położenia [15];
- dokładność pomiarów: Należy ocenić dokładność pomiarów dostarczanych przez różne czujniki. To pozwoli zrozumieć, jakie błędy mogą wystąpić w procesie identyfikacji położenia i jakie mogą mieć wpływ na działanie robota;
- kalibracja czujników: Niezawodność identyfikacji położenia wymaga prawidłowej kalibracji wszystkich używanych czujników. Błędna kalibracja może prowadzić do znacznego pogorszenia dokładności identyfikacji [17];
- algorytmy integracji danych: Wieloczynnikowe (multi-sensor) podejście, w którym dane z różnych czujników są łączone, może poprawić dokładność identyfikacji [6];
- zakłócenia środowiskowe: Analiza wpływu różnych czynników środowiskowych, takich jak oświetlenie, warunki atmosferyczne czy obecność przeszkód, na działanie systemu identyfikacji położenia jest ważna dla zrozumienia, jak system zachowuje się w różnych warunkach [8];
- pretesty w rzeczywistych warunkach: Przeprowadzenie testów w rzeczywistych warunkach, w różnych otoczeniach i scenariuszach, pozwoli ocenić, czy system identyfikacji położenia działa zgodnie z oczekiwaniami. Warto także testować zachowanie systemu w obliczu niespodziewanych zmian w otoczeniu [9];
- dokładność porównawcza: W celu oceny skuteczności systemu identyfikacji położenia, można porównać wyniki jego działania z dokładnymi punktami odniesienia, jeśli są dostępne;
- analiza i korekta funkcjonowania: Na podstawie wyników analizy można wdrożyć działania i ulepszenia, które mogą obejmować zmiany w algorytmach, kalibrację czujników, lub zastosowanie nowych technologii;
- długoterminowa stabilność, wynikająca z odporności na warunki eksploatacyjne. Analiza długoterminowej stabilności systemu jest istotna, aby ocenić, czy dokładność identyfikacji położenia pozostaje na stałym poziomie w miarę upływu czasu;
- bezpieczeństwo. W przypadku robota pracującego w bliskim otoczeniu ludzi lub wrażliwych obszarach, ocena systemu musi uwzględniać aspekty bezpieczeństwa, takie jak unikanie kolizji [11].

Analiza i ocena funkcjonowania systemu autonomicznej identyfikacji położenia to kompleksowe zadanie, które wymaga zarówno teoretycznych badań, jak i praktycznych testów. Wszelkie znalezione niedoskonałości powinny być skrupulatnie analizowane i poprawiane w celu osiągnięcia optymalnej dokładności i niezawodności identyfikacji położenia robota mobilnego.

Problematyka badawcza i metodyka

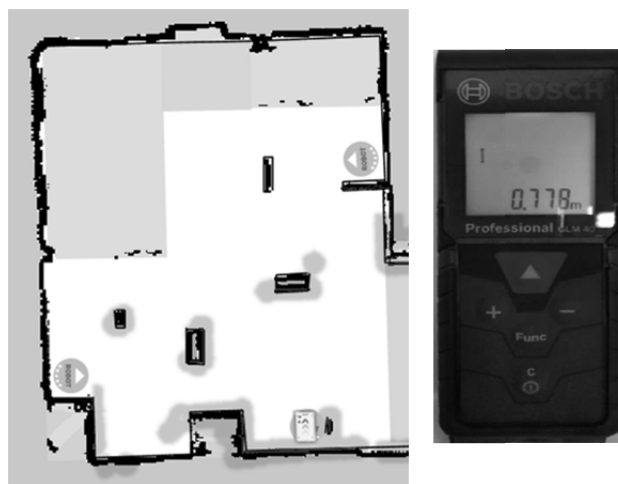
Badania doświadczalne obejmowały przeprowadzenie pomiarów dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota mobilnego MiR 100 na wyznaczonych punktach bazowych. Oceniano powtarzalność, precyzję realizacji zadania oraz szybkości reakcji na zakłócenia oraz stabilności układów pomiarowych robota w zainscenizowanym środowisku pracy. Analizie podlegało również zachowanie robota mobilnego w stosunku do zmiennych zewnętrznych odbieranych przez układy

sensoryczne oraz wpływu otoczenia pracy robota na jego dokładność i szybkość w wykonywaniu zaprogramowanych czynności.

W badaniach posłużono się metodą obserwacji oraz eksperymentu naukowego. W środowisku testowym (symulacyjnym), przy pomocy aparatury pomiarowej, markerów, zebranej fotorelacji oraz naocznych obserwacji zebrano szereg danych, które w późniejszym kroku pozwoliły na wykonanie analiz i wyciągnięcie jednoznacznych wniosków. Do przeprowadzenia badań posłużono się również rekwizytami (obiektami) emitującymi inne maszyny i objekty, które mogłyby się znaleźć w rzeczywistym środowisku pracy robota mobilnego (rys.1 i 2).



Rys. 1. Zainscenizowane środowisko testowe



Rys. 2. Cyfrowy obraz środowiska testowego oraz dalmierz laserowy

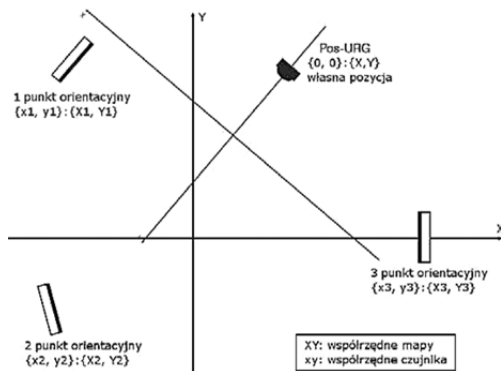
Pomiarów odległości od punktów bazowych (markerów) dokonywano przy pomocy dalmierza laserowego (rys. 3) o dokładności pomiarowej równej +/- 1,5 mm. Każdą z wykonanych prób (misję/zadanie) powtórzono trzydziestokrotnie dla tych samych ustawień początkowych. Badanie dokładności lokalizacji zrealizowano poprzez analizę wyników otrzymywanych metodą odometrii w ruchu na wprost. Przejazd rozpoczynał się wczytaniem zaprogramowanej misji obejmującej przejazd z punktu A do B, w których zmieniano prędkość przejazdu. Błąd e każdego przejazdu *i* przy określonej prędkości *v* wyznaczano wg standardowego wzoru (1):

$$(1) \quad e_{iv} = \frac{|d_m - d_{s1}|}{d_m}$$

gdzie: d_m – zmierzona odległość, d_{sl} – odległość pozyskana z systemu lokalizacji. Następnie uśredniono serie wyników i otrzymano średni względny błąd lokalizacji robota mobilnego przy określonej prędkości v (2):

$$(2) \quad \bar{e}_v = \frac{\sum_{i=1}^n e_{iv}}{n}$$

W pomiarach lokalizacyjnych system LIDAR wysyła krótkie impulsy światła laserowego w kierunku docelowego obiektu/ów, a następnie mierzy czas, jaki upływa od wysłania impulsu do jego odbicia od obiektu i powrotu do detektora. Systemy LIDAR są zdolne do skanowania otoczenia w sposób punktowy lub w postaci chmur punktów, tworząc trójwymiarową mapę otoczenia. W badaniach zastosowano metodologię, która opiera się na dokładnym określaniu pozycji absolutnej w każdym punkcie oraz korekcie skumulowanej odometrii [15,16]. W obu przypadkach kluczową rolę pełnią zarówno czujniki zewnętrzne (np. czujnik laserowy, kamera wizyjna), jak i czujniki wewnętrzne (np. żyroskop, enkodery na kołach). Zarejestrowano ich pozycje, konfiguracje, odległości między nimi oraz wektory usytuowania w formie mapy danych. Następnie dokonano odczytu współrzędnych, zgodnie z przedstawionym schematem na rysunku 3.



Rys. 3. Wyznaczanie pozycji robota w odometrii pomiarach jakościowych

Przybliżenia pozycji P pochodzące z odczytów odometrii oznaczone są przez u_i , a rzeczywista pozycja przez x_i , oba parametry indeksowane w taki sam sposób. Teraz, jeśli m będzie poprawną mapą otoczenia robota, to przy pewnych założeniach, prawdziwe jest równanie (3) opisujące rozkład prawdopodobieństwa w punkcie czasu t :

$$(3) \quad P(x_{1:t}, m \mid z_{1:t}, u_{1:t}) = P(m \mid x_{1:t}, z_{1:t})P(x_{1:t} \mid z_{1:t}, u_{1:t})$$

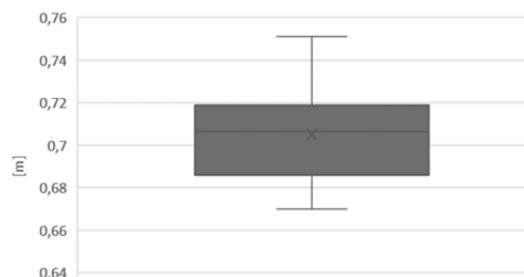
Wyniki badań i ich analiza

Na potrzebę przeprowadzenia eksperymentu w robocie zaprogramowano dwie misje. Pierwsza z nich polegała na cyklicznym przemieszczaniu się robota w pętli zamkniętej pomiędzy punktem początkowym, a target-em numer 1. Badanie miało odpowiedzieć na pytanie: „Czy minimalna ilość bodźców zewnętrznych znacząco wpływa na sensorykę robota, decydując o późniejszej precyzyjności pozycjonowania robota mobilnego?”; Druga misja polegała na zwiększeniu stopnia komplikacji zadań. Robot zaczynał swoją pracę w punkcie startu, następnie kierował się do punktu weryfikacji numer 1, pozycjonował się, aby bezpośrednio w kolejnym etapie wyruszyć do punktu weryfikacji numer 2. Tam jednostka mobilna zostawała poddawana procesowi auto-pozycjonowania względem markera. W następnym kroku robot kierował się do punktu startu, gdzie zbierano ostatni – trzeci pomiar dokładności pozycjonowania. Badanie miało

odpowiedzieć na pytanie: „Czy zwiększona liczba bodźców zewnętrznych oraz zastosowanie punktów pobocznych w misji jednoznacznie wpłynęło na całościowy wynik poprawności pozycjonowania robota względem zaprogramowanych punktów?”;

Trzeci etap badań miał za zadanie ocenić skuteczność działania systemów bezpieczeństwa robota mobilnego. Dane zawierają odległości pomiędzy robotem, a przeszkodą, które były mierzone w sytuacji wymuszonego uaktywnienia systemów bezpieczeństwa przy różnych prędkościach roboczych robota.

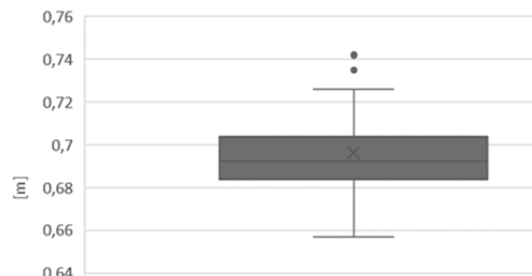
Wyniki pomiarów dokładności pozycjonowania dla pierwszego zadania testowego przedstawiono na rysunku 4. Zebrane dane rozkładają się zarówno poniżej jak i powyżej wartości wzorca. Wraz z kolejnymi pomiarami błąd się powiększał (11 ostatnich iteracji zawiera się dla wartości błędu względnego większej niż 0,5 % – robot nie zbliżał się do niemal zerowych błędów pozycjonowania, tak, jak zaobserwowano dla przy wcześniejszych próbach. Średni błąd względny pomiarów odczytanych pomiędzy punktem postoju, a wartością wzorcową pozycji numer jeden wynosi ok. 2,60 %.



Rys. 4. Misja 1 – rozkład pomiarów pozycjonowania do punktu 1

W tej misji robot kończył pracę w tzw. „punkcie końcowym”, wyniki pomiarów były zbliżone, średni błąd względny wynosi w przybliżeniu 3,03 % ale zauważono, że z każdym pomiarem błąd malał (robot pracował dokładniej).

Następnie takie same pomiary przeprowadzono dla drugiej misji (rys. 5), która zawierała bardziej rozbudowane operacje, wymagające skomplikowanych manewrów ale położenie punktów nie uległo zmianie. Odczytane wartości w kolejnych pomiarach były coraz bliższe wartości poprawnej, co świadczy o tym, iż robot wraz z kolejnym obrotem misji zatrzymywał się coraz to bliżej punktu pomiaru. Średni błąd względny wartości odczytanych z dalmierza do wartości wzorca wynosi ok. 2,70 % – co daje nam porównywalny wynik jak w przypadku misji pierwszej (różnica na poziomie 0,10 wartości punktu procentowego).

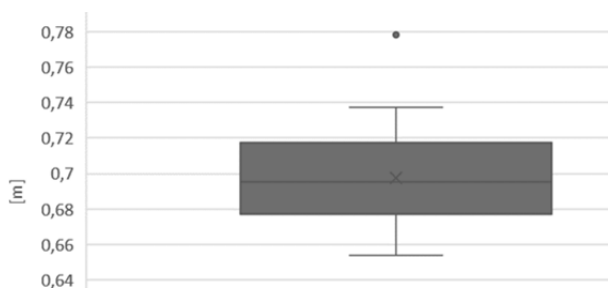


Rys. 5. Misja 2 – rozkład pomiarów pozycjonowania do punktu 1

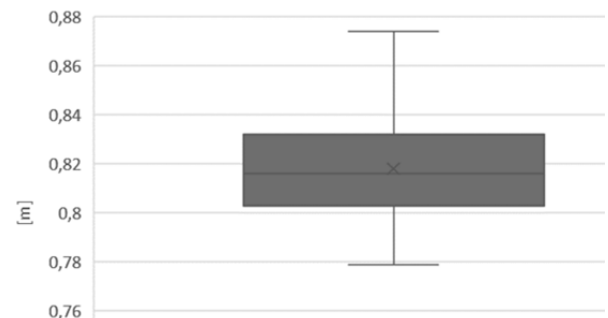
Kolejno oceniano precyzyjność zatrzymywania się robota w punkcie drugim (rys. 6). Średnia wartość błędu względnego wynosiła 3,60 %.

Ostatnim etapem oceny poprawności pozycjonowania była analiza zatrzymywania się robota na końcu misji. Średni błąd względny dla pomiarów w końcowym punkcie misji 2 wynosił ok. 7,23 %, co jest dwukrotnością wartości

uzyskanej dla punktu drugiego (rys. 7). Zauważono, że robot za każdym razem zatrzymywał się znacznie wcześniej niż powinien.



Rys. 6. Misja 2 – rozkład pomiarów pozycjonowania do punktu 2



Rys. 7. Misja 2 – rozkład pomiarów pozycjonowania do punktu końcowego

Ostatnim badanym zagadnieniem była efektywność działania systemu bezpieczeństwa robota. Robot rozjeżdżano do zaprogramowanych prędkości ruchu (0,5 oraz 1,0 m/s) a następnie wprowadzano na tor jazdy przeszkodę – co doprowadzało do awaryjnego zatrzymywania układu napędowego robota mobilnego. Przy prędkości 0,5 m/s robot zatrzymywał się w odległości od 6,5 do 9,5 cm. Przy prędkości robota 1 m/s wartości odległości zatrzymania robota od przeszkody wzrosły do przedziału 12,5 – 16,5 cm. W żadnym przypadku nie miała miejsca sytuacja w której dochodzi do kolizji robota i przeszkody.

Podsumowanie

Przeprowadzone badania pozwoliły na wyciągnięcie wniosków, które będą miały istotne znaczenie przy zabudowie na platformie jezdnej systemu wizyjnego wraz z ramieniem robota. Otóż w sytuacji, kiedy wymagana jest wysoka ostrość obrazu, przy braku zmiennej ogniskowej kamery - może dochodzić do problemów z lokalizacją podejmowanych detali. Jak dowiodły badania robot, który w swojej budowie posiada tylko jeden rodzaj sensorów (w tym przypadku czujniki laserowe), nie jest w stanie zapewnić wysokiej powtarzalności i precyzji w wykonywaniu autonomicznych czynności ruchowych. Nawet najmniejsza liczba bodźców zewnętrznych (misja 1) generowała błąd pozycjonowania w zakresie +/- 9 cm. Zauważono, że większa ilość punktów pośrednich w misji nie wpływa na jakość pozycjonowania, wręcz ją pogarsza. Jeszcze gorzej wypadła precyzja lokalizacji w punkcie końcowym, różnica pomiędzy wartością wzorcową zawierała się w przedziale +/- 11 cm. W zakresie oceny funkcjonowania systemu bezpieczeństwa zauważono, że prędkość ruchu ma wpływ na zapewnienie większej odległości od przeszkody, ale zatrzymywania awaryjne nie wpływały na precyzję późniejszego pozycjonowania przy obiektach docelowych.

Autorzy: dr inż. Marcin Tomasiak, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Inżynierii Bioprocusów, Energetyki i Automatykacji, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, e-mail: marcin.tomasik@urk.edu.pl.

mgr inż. Szymon Małek, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Inżynierii Bioprocusów, Energetyki i Automatykacji, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków.

dr inż. Stanisław Lis, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Inżynierii Bioprocusów, Energetyki i Automatykacji, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, e-mail: stanislaw.lis@urk.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Aufrere R., Gowdy J., Mertz C., Thorpe C., Wang C., Teruko Yata T. Perception for collision avoidance and autonomous driving. *Mechatronics*, (2003), No. 13(10), 1149-1161.
- [2] Azartash H., Banai N., Nguyen T. Q. An integrated stereo visual odometry for robotic navigation. *Robotics and Autonomous Systems*, (2014), No.62(4), 414-421.
- [3] Babinec A., Jurišica L., Hubinský P., Duchoň F. Visual localization of mobile robot using artificial markers. Modelling of Mechanical and Mechatronic Systems MMaMS. *Procedia Engineering*. (2014), No 96, 1-9.
- [4] Bonanni T. M., Della-Corte B., Grisetti G. 3-D Map Merging on Pose Graphs. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2(2), (2017), No. 4, 1031-1038.
- [5] Drwiega M., Jakubiak J.. A Set of Depth Sensor Processing ROS Tools for Wheeled Mobile Robot Navigation. *Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems*. (2017), No. 11(2), 48-56.
- [6] Dudzik S., Podsiedlik A., Rapalski A. Test stand to design control algorithms for mobile robots. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2021, nr 3, 35-38.
- [7] Iovino M., Scutkins E., Styrod J., Ögren P., Smith Ch. A survey of Behavior Trees in robotics and AI. *Robotics and Autonomous Systems*. (2022), Vol. 154, 104096.
- [8] Khai, T.Q. Ryoo, Y.J. Gill, W.R. Im, D.Y. Design of kinematic controller based on parameter tuning by fuzzy inference system for trajectory tracking of differential, *Drive Mobile Robot. Int. J. Fuzzy Syst.* (2020), No. 22, 1972-1978.
- [9] Kis K. B., Csemesz J., Csáji B. C. A simultaneous localization and mapping algorithm for sensors with low sampling rate and its application to autonomous mobile robots. *Procedia Manufacturing*. (2021), Vol. 54, 154-159.
- [10] Łabęcki P., Kasiński A., Aktywny pokładowy system wizyjny dla robota autonomicznego, *Pomiary Automatyka Kontrola*, nr 55(9), (2009), 731-736.
- [11] Masłowski D., Czubenko M. System bezpieczeństwa dla współpracującego robota przemysłowego na bazie kamer głębi. *Pomiary Automatyka i Robotyka*. (2019), nr 4, 41-46.
- [12] Oliveira A. S. S., dos Reis C. M., da Mota F. A. X., Martinez M. E. M., Alexandria A. R. New trends on computer vision applied to mobile robot localization. *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, (2022), Vol. 2, 63-69.
- [13] Panigrahi P. K., Bisoy S. K. Localization strategies for autonomous mobile robots: A review. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*. (2022), Vol. 34, No 8, 6019-6039.
- [14] Parker L.E. Multiple mobile robot systems. *Handbook of Robotics*, Springer. (2008), 921-941.
- [15] Pawłowski P., Jeske M., Kwiatkowski S., Kołodziejczyk N. Zrobotyzowane mapowanie przestrzeni z wykorzystaniem czujnika LIDAR. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2021, nr 2, 52-56.
- [16] Tomasiak M., Lis S. Problematyka eksploatacji autonomicznych robotów mobilnych AMR. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2023, nr 1, 315-318.
- [17] Skrzypczyński P., Simultaneous Localization and Mapping: A Feature-based Probabilistic Approach, *Int. Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, (2009), Vol. 19, No. 4, 575-588.