

KRENICH Stanisław <sup>1</sup>  
SZEWCZYK Paweł <sup>2</sup>  
ZDEBSKI Michał <sup>3</sup>

## PROJEKT I BADANIE WŁASNOŚCI CZTEROKOŁOWEGO ROBOTA MOBILNEGO

*Artykuł prezentuje projekt i badanie własności funkcjonalnych kołowego robota mobilnego stosowanego dla celów inspekcyjnych lub lekkich transportowych. Opracowano konstrukcję czterokołową napędzaną silnikami DC bez sprzężenia zwrotnego bezpośredniego. Dla opracowanej konstrukcji zaprojektowano dwupoziomowy układ sterowania w oparciu o mikrokontroler ATmega328P, sensor zbliżeniowy, kamerę wideo oraz bezprzewodową transmisję sygnałów w standardzie WI-FI a następnie opracowano algorytmy sterowania wykorzystujące analizę sygnału z czujnika zbliżeniowego oraz analizę obrazu w oparciu o bibliotekę OpenCV. Układ i algorytmy sterowania umożliwiają autonomiczną pracę robota oraz sterowanie manualne. W oparciu o wykonany prototyp przeprowadzono testy i badanie własności jezdnych robota.*

## DESIGN AND TESTING OF PROPERTIES OF FOUR-WHEELED MOBILE ROBOT

*The paper presents the design and testing of functional properties of a mobile robot used for the purposes of inspection or light transport. Four-wheel-driven design using DC motors without direct feedback is developed. For the robot design a two-level control system is proposed, which is based on microcontroller ATMEGA328P, proximity sensor, video camera and wireless transmission of signals in the standard WI-FI. Next control algorithms using signal analysis of the proximity sensor and image analysis based on OpenCV library are introduced. Control system and algorithms allow autonomous operations or manual control of the robot. Based on the robot prototype many tests and experiments including study of robot properties are worked out.*

---

<sup>1</sup> Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Instytut ITMiAP, Al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków,  
Tel: +48 12 374 32 18, Fax: +48 12 374 32 04, E-mail: krenich@mech.pk.edu.pl

<sup>2</sup> Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Instytut ITMiAP, Al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków,  
Tel: +48 12 374 32 18, Fax: +48 12 374 32 04, E-mail: szewczyk pawel87@gmail.com

<sup>3</sup> Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Instytut ITMiAP, Al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków,  
Tel: +48 12 374 32 18, Fax: +48 12 374 32 04, E-mail: zdebskimichal@gmail.com

## 1. WSTĘP

Na przestrzeni ostatniej dekady obserwuje się szybki rozwój robotyki mobilnej, co skutkuje powstawaniem nowych konstrukcji o ciekawych i innowacyjnych rozwiązaniach [5, 7], szczególnie dla zadań niebezpiecznych i skomplikowanych, które wymagają większej dokładności, powtarzalności lub szybkości działania. W grupie robotów mobilnych jedną z podstawowych i najczęściej realizowanych konstrukcji są roboty kołowe, które charakteryzują się dobrymi własnościami jezdnyymi na powierzchniach płaskich [2, 4]. Roboty tego typu znajdują zastosowanie jako roboty transportowe w przemyśle, osobiste, usługowe, wojskowe oraz do zastosowań specjalnych, np. inspekcyjnych [1, 2, 7, 8]. Ze względu na zmienne środowisko pracy robota mobilnego wymagania konstrukcyjne dotyczą nie tylko zapewnienia mobilności, lecz co istotniejsze, interakcji ze światem zewnętrznym poprzez odpowiednie technologie sensoryczne i wizyjne. W związku z powyższym założono opracowanie konstrukcji mechanicznej i układu sterowania robota mobilnego, mogącego poruszać się w zróżnicowanym środowisku oraz zbadanie jego możliwości jezdnych dla zadań inspekcyjnych lub transportowych podczas pracy autonomicznej jak i przy sterowaniu manualnym.

## 2. KONSTRUKCJA UKŁADU NOŚNEGO ROBOTA CZTEROKOŁOWEGO

### 2.1 Założenia wstępne

W procesie konstruowania robota mobilnego przyjęto następujące kryteria:

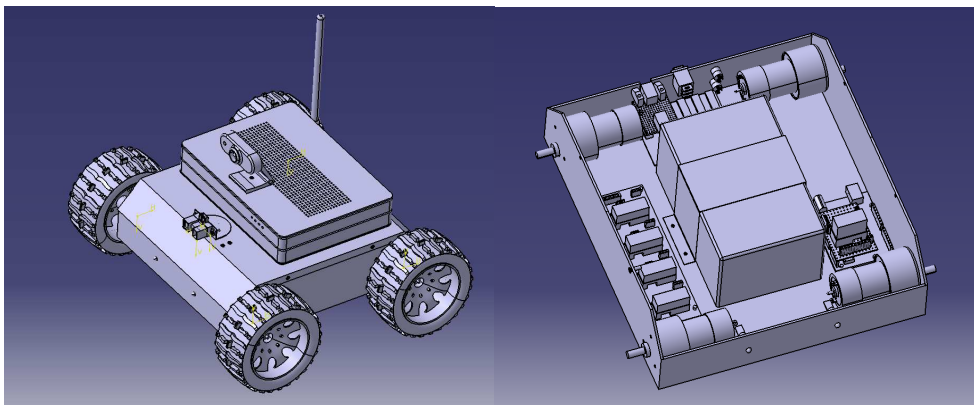
- Założenia funkcjonalne: możliwie prosta konstrukcja, zróżnicowane środowisko pracy robota, zadania inspekcyjne lub lekkie transportowe.
- Zapewnienie mobilności: system czterokołowy, praca autonomiczna oraz sterowana manualnie

Biorąc pod uwagę prostotę konstrukcji przyjęto system czterokołowy o niezależnych czterech napędach, który wydaje się najlepszym rozwiązaniem dla wyznaczonych celów. W przypadku mniejszej liczby kół, układ mechaniczny w niektórych przypadkach mógłby być niestabilny pod względem równowagi, przy większej liczbie kół wymagany byłby bardziej złożony układ sterowania. Założonym środowiskiem pracy robota są: wnętrza budynków, chodniki, nierówne ścieżki, drogi o podłożu kamienistym i żwirowym, progi zwalniające, niskie krawężniki, jak również miejsca trudno dostępne dla człowieka np. z powodów gabarytowych, gdzie robot będzie miał większy zakres działania. Sformułowanie takich założeń prowadzi do określenia wymiarów: zarówno długości, wysokości, szerokości, jak również prześwitu. Mobilność w założonym środowisku wymaga zwrotności i odpowiedniego momentu napędowego. Założono, zatem możliwość poruszania się we wszystkich kierunkach, obrót w miejscu, wyjazd na wzniesienie o kącie do 45 stopni. Jako mechanizm skrętu zaproponowano tzw. system czołgowy, w czasie skrętu koła pracują parami. Wybór takiego rozwiązania upraszcza konstrukcję mechaniczną, gdyż nie wymaga budowy skomplikowanego układu kołowego i kierowniczego.

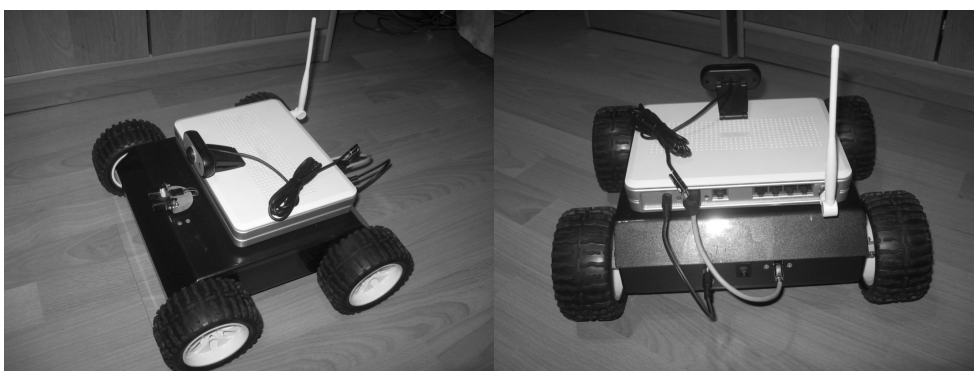
### 2.2 Konstrukcja robota

W oparciu o założenia zaprojektowano konstrukcję robota. Korpus robota jest głównym elementem, do którego przymocowane są silniki i pozostałe podzespoły. Ze względu na fakt, że robot ma poruszać się w trudnym terenie i być odporny na uszkodzenia mechaniczne zdecydowano się użyć blachy stalowej S235 o grubości 2mm. Podwozie ma

następujące wymiary: długość 270 [mm], szerokość 240 [mm], wysokość 70 [mm], koła: średnicę 12 [cm]. Na rysunku 1 przedstawiono zrealizowany w aplikacji Catia model 3D opracowanego robota, wraz z rozmieszczeniem akumulatorów, silników napędowych oraz układu sterowania. Na rysunku 2 przedstawiono wykonany prototyp urządzenia. Aby zminimalizować ryzyko zablokowania się w wąskim przejściu lub podczas obracania, robot posiada zwartą budowę. Duże koła umożliwiają pokonywanie progów i krawężników oraz ochronę konstrukcji i podzespołów przed uszkodzeniem np. podczas zderzenia ze ścianą, jak również zapewniają wysoki współczynnik tarcia. Przy projektowaniu uwzględniono rozłożenie takich elementów jak: akumulator znajdujący się w centralnej części podwozia, (dzięki czemu środek ciężkości robota będzie możliwie najniższy), płytki sterownika do silników, platformę Arduino z mikroprocesorem, radiatora stabilizatora. Na ściankach bocznych zaplanowano montaż silników, na ścianie przedniej diod, a na tylnej gniazda zasilania i ładowania, gniazda USB, oraz przycisku załączania robota. Na górnej powierzchni korpusu zainstalowano kamerę oraz czujnik zbliżeniowy, który może się obracać za pomocą dodatkowego serwomechanizmu napędowego.



Rys. 1. Model 3D i rozmieszczenie elementów robota



Rys. 2. Prototyp robota mobilnego

### 2.3 Dobór napędów

Do napędu opracowanego robota przyjęto cztery silniki DC, każdy z wewnętrzną przekładnią. Wymaganą moc oraz moment obrotowy obliczono dla najbardziej niekorzystnego ruchu robota na wzniesienie o kącie 45 stopni, przy założeniu całkowitej masy robota 6 [kg], osiągniętej prędkości 0,5 [m/s], przyspieszenia 3 [m/s<sup>2</sup>]. Na podstawie obliczeń dobrano silniki DC firmy Micromotors o oznaczeniu RH158.12.75 o napięciu zasilania 12V i parametrach[11]: moment obrotowy 0,5 [Nm] przy 55 [obr/min] i prądzie pobieranym 0,68 A [9].

### 2.4 Dobór sensorów, układu wizyjnego, akumulatora.

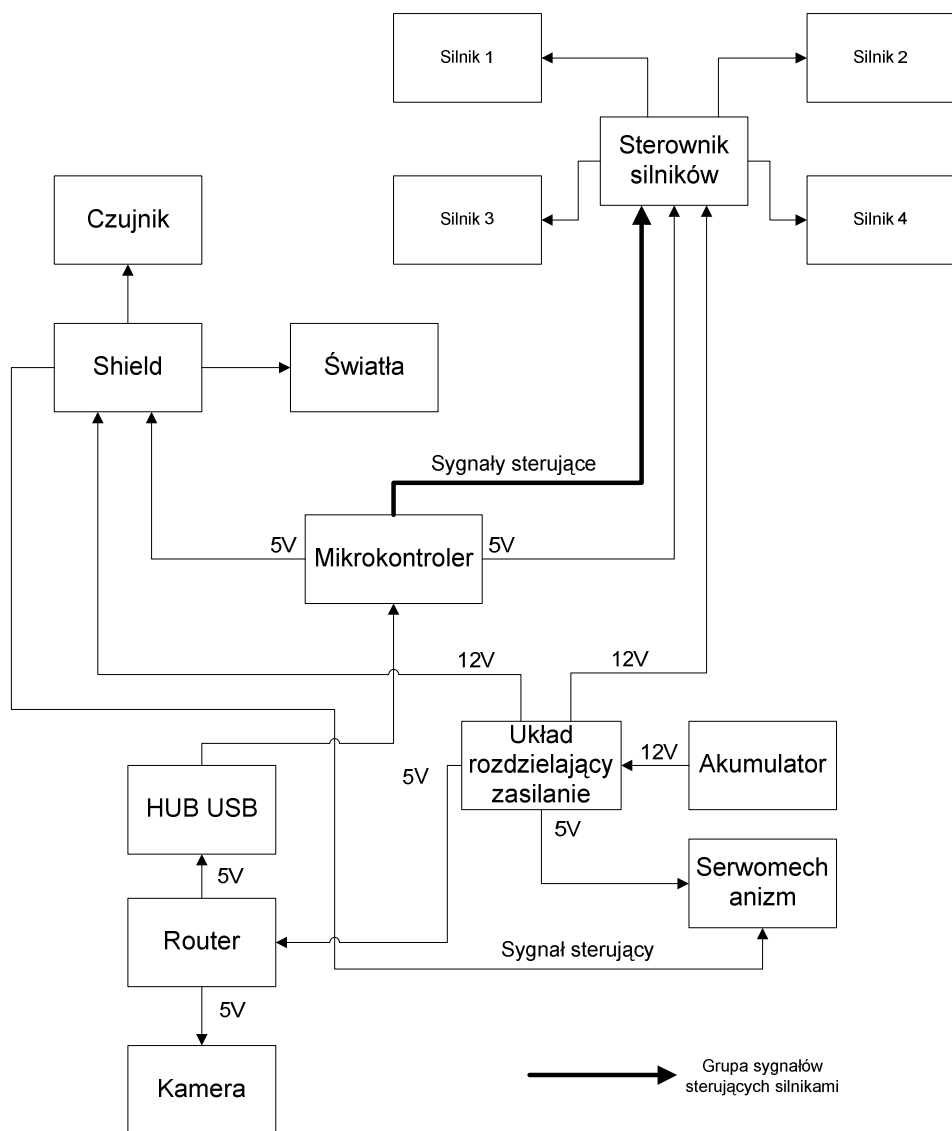
W celu detekcji przeszkód i ich odległości od robota zastosowano sensor odległości typu SHARP GP2Y0A02YK. Czujnik wykonuje pomiar metodą triangulacji, dzięki czemu jest mało podatny na kolor i wielkość namierzonego obiektu jak i wpływ światła zewnętrznego. W celu zmiany orientacji czujnika o zadany kąt zastosowano serwomechanizm Tower Pro SG5010. Dodatkowo w celu detekcji przeszkód zastosowano kamerę Logitech C100 o rozdzielczości 640x480 pixeli z możliwością wykonywania zdjęć z rozdzielczością do 1.3 megapixela. Jako układ zasilający wybrano akumulator PowerMax o następujących parametrach: napięcie 12V, pojemność 7Ah, waga 2,3kg, długość 150mm, szerokość 63mm, wysokość 95mm (z terminalami 99mm).

## 3. OPRACOWANY UKŁAD STEROWANIA

Układ sterowania zrealizowano jako strukturę dwupoziomową i oparto na platformie Arduino Duemilanove zbudowanej na bazie mikrokontrolera ATmega328P [10, 11]. Poziom pierwszy stanowi Zewnętrzna Jednostka Sterująca (ZJS), której zadaniem jest sterowanie i koordynacja robotem w trybie manualnym jak i autonomicznym na podstawie otrzymanych sygnałów wideo oraz z czujnika zbliżeniowego (Rys. 3). Jest nią aplikacja programowa z możliwością sterowania robotem za pomocą klawiatury komputera oraz umożliwiająca analizę i wykrywanie obiektów w podzielonym na kilka obszarów obrazie otoczenia robota. Analiza obrazu oparta o bibliotekę OpenCV [6], umożliwia sterowanie ruchem przód/tył oraz lewo/prawo. Poziom drugi stanowi układ sterowania bezpośrednio zainstalowany w robocie, którego zadaniem jest sterowanie silnikami napędowymi w oparciu o sygnały sensora lub wysyłane z poziomu pierwszego układu sterowania (Rys. 4). Układ ma charakter otwarty i elastyczny, umożliwiający wczytywanie i realizację różnych algorytmów sterowania. Komunikacja między ZJS a układem bezpośredniego sterowania robotem (poziom 2) odbywa się poprzez sieć bezprzewodową w standardzie WI-FI [3].



Rys. 3. Schemat ogólny układu sterowania

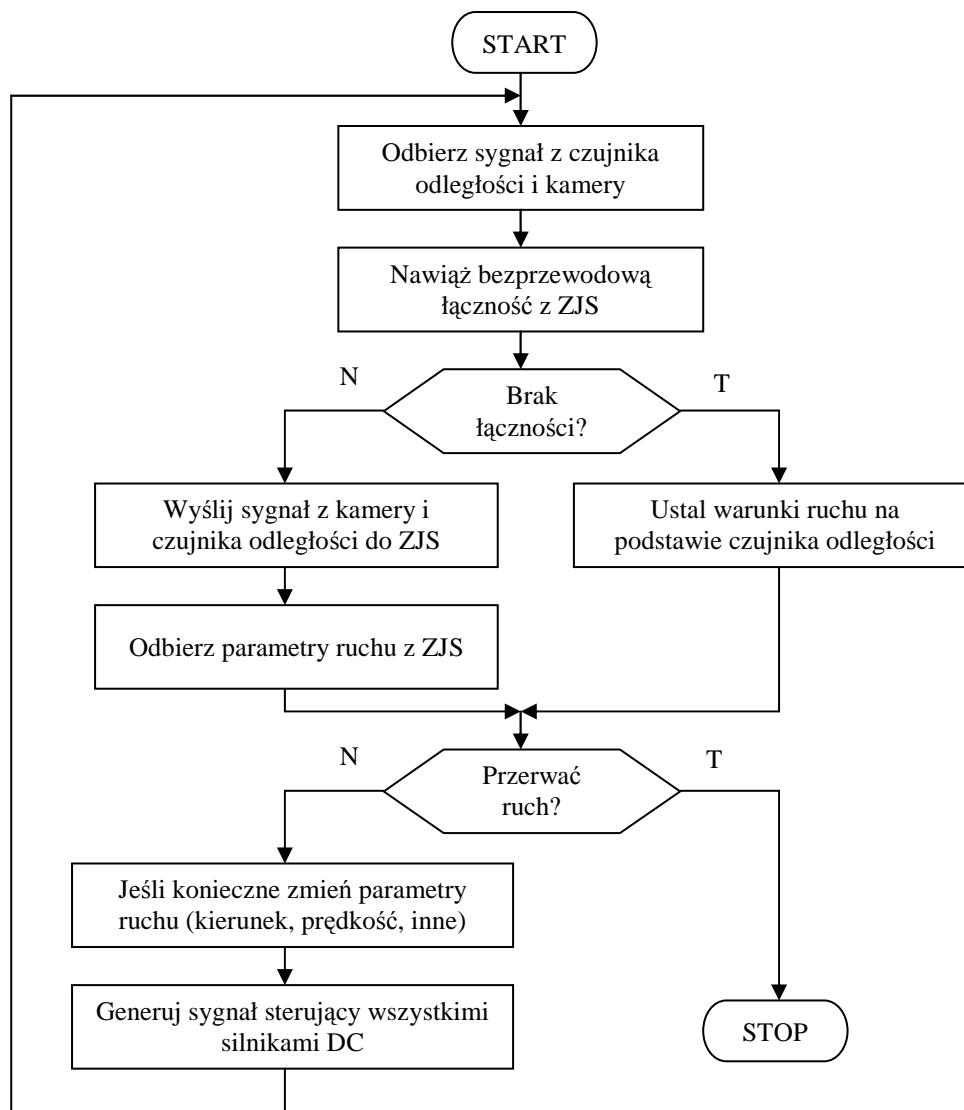


Rys. 4. Schemat sterownika głównego – poziom drugi układu sterowania

#### 4. ALGORYTM STEROWANIA

Dla przyjętego układu sterowania opracowano różne algorytmy sterowania, przy czym schemat ogólny podstawowego algorytmu przedstawiono na rysunku 5. Umożliwia on zarówno sterowanie manualne jak i również autonomiczne. Przy czym uproszczone

sterowanie autonomiczne może odbywać się także bez udziału Zewnętrznej Jednostki Sterującej (ZSJ), wyłącznie na podstawie sygnału z czujnika zbliżeniowego (odległości).

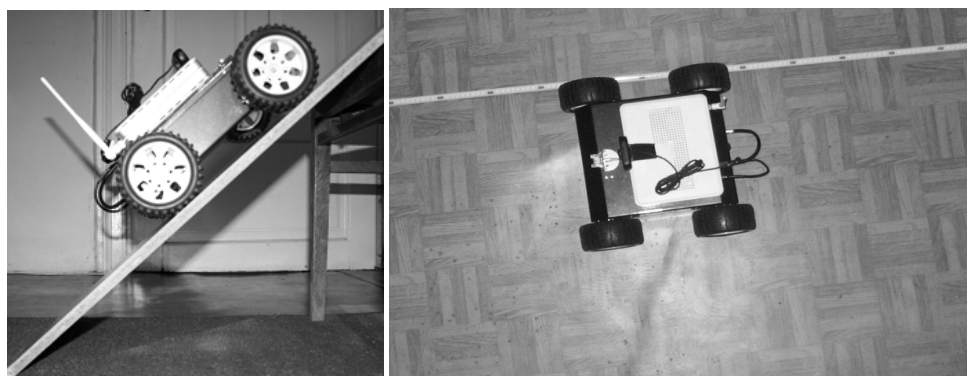


Rys. 5. Ogólny algorytm sterowania robotem mobilnym

## 5. TESTY I BADANIA

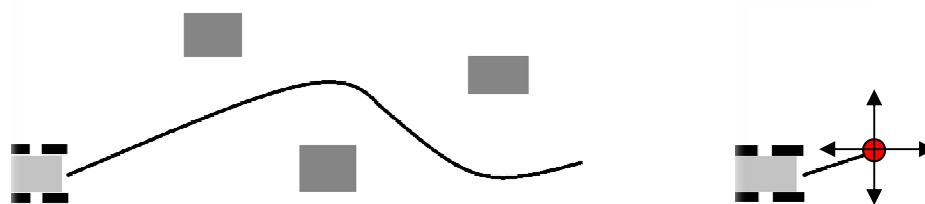
Po wykonaniu prototypu robota, przeprowadzono testy i badania dotyczące zarówno jego parametrów funkcjonalnych takich m.in. jak prędkość ruchu, przyspieszenie, czas pracy na naładowanym akumulatorze jak również własności jezdnych podczas pracy

autonomicznej oraz przy sterowaniu manualnym. Na rysunku 6 przedstawiono przykładowe testy dla celów badania własności funkcjonalnych i jezdnych -maksymalne nachylenie podłoża oraz badanie prędkości ruchu.



Rys. 6. Przykładowe testy funkcjonalne robota – badanie możliwości wjazdu na podłoża pochylone oraz prędkości ruchu na podłożu płaskim

Przeprowadzone badania wykazały, iż robot jest w stanie osiągać maksymalną prędkość średnio ok. 0,41 m/s dla różnych warunków terenowych a więc nieco mniejszą od zakładanej, średnie osiągane przyspieszenie ruchu wyniosło jak zakładane ok. 3 [m/s<sup>2</sup>], czas pracy ciągłej wyniósł 1 godzinę. Własności jezdne robota zostały zbadane zarówno w terenie otwartym jak i w pomieszczeniach zamkniętych. Testy wykazały dobre własności manewrowe robota, m.in. zdolność do zawracania w miejscu, pokonywanie nachyleń terenu do 45 stopni, w tym także o podłożu gładkim. Układ sterowania i komunikacji bezprzewodowej wykazał dużą odporność na zakłócenia i zasięg w terenie otwartym do kilkuset metrów, a w pomieszczeniach zamkniętych z przeszkodami w postaci ścian do kilkudziesięciu. Testy obejmowały także pracę autonomiczną robota w warunkach zmiennego otoczenia przy narzuconym kierunku ruchu oraz podążanie robota za wskaźnikiem w postaci czerwonego koła o średnicy 3 [cm] (Rys. 7).



Rys. 7. Badanie ruchu robota w trybie autonomicznym – ruch w otoczeniu z przeszkodami oraz podążanie za przemieszczanym wskaźnikiem

Badania potwierdziły, iż wykorzystanie czujnika zbliżeniowego w połączeniu z analizą obrazu z kamery umożliwia poprawną pracę robota, przy czym duży wpływ na jego

zachowanie, szczególnie przy ruchu nadążnym ma oświetlenie i jego zmiany. Gwałtowne zmiany natężenia oświetlenia wpływają negatywnie na rozpoznawanie obrazu i wymagają stosowania korekcji, co będzie tematem dalszym badań.

## 6. WNIOSKI

Celem opracowania było zaprojektowanie, wykonanie i zbadanie własności funkcjonalnych oraz jezdnych kołowego robota mobilnego dla celów inspekcyjnych dla ruchu sterowanego manualnie jak i pracy autonomicznej. Przeprowadzone testy i badania na wykonanym prototypie wskazują, iż możliwości manewrowe oraz funkcjonalne robota kołowego są wystarczające dla zadań inspekcyjnych w zmieniającym się otoczeniu, przy czym ograniczeniem mogą tu być uwarunkowania związane z typem i gabarytem niektórych przeszkód, które nie mogą zostać ominięte, np. schody w pomieszczeniach zamkniętych. Zwiększenie możliwości jezdnych wiązałoby się z koniecznością rozbudowy systemu kołowego na przykład o niezależne moduły dostosowawcze każdego koła do terenu, co dodatkowo komplikowałoby system sensoryczny i sterowania robotem. Ze względu na fakt, iż układ sterowania jest układem nadążnym, ewentualne błędy w pozycjonowaniu robota nie mają znaczenia gdyż są na bieżąco korygowane a ich wartość zależy głównie od dokładności sensora zbliżeniowego oraz jakości kamery wideo. Przeprowadzone testy potwierdziły, że przyjęty układ sensora zbliżeniowego o zmieniającym się przez obrót polu działania oraz prosta analiza obrazu z kamery umieszczonej na robocie pozwalają na ruch autonomiczny robota w stabilnych warunkach oświetleniowych. Przy zmianach natężenia oświetlenia odbywających się w sposób nieregularny, układ sterowania robotem wykazywał problemy z analiza obrazu i prawidłowym sterowaniem w trybie autonomicznym. W związku z tym konieczne wydaje się opracowanie algorytmów korekcyjnych obrazu. W zakresie sterowania także przyjęty system komunikacji bezprzewodowej robota z zewnętrzną jednostką sterującą jest wystarczający w zmieniającym się otoczeniu pracy ze względu na odporność na zakłócenia, zasięg pracy oraz przepustowość łącza radiowego. Ze względu na powyższe opracowana konstrukcja robota kołowego może być wykorzystywana w zadaniach inspekcyjnych lub lekkich transportowych przy sterowaniu manualnym oraz autonomicznym, przy czym zwiększenie możliwości w zakresie pracy autonomicznej wiąże się z opracowaniem algorytmów sterowania opartych o metody sztucznej inteligencji.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Ciesielski P., Sawoniewicz J., Szmigielski A.: *Elementy robotyki mobilnej* Warszawa, Wyd. PJWSTK 2004.
- [2] Giergiel M. J., Hendzel Z., Żylski W: *Modelowanie i sterowanie mobilnych robotów kołowych*, Warszawa, PWN 2002.
- [3] John R.: *Sieci bezprzewodowe. Przewodnik po sieciach Wi-Fi i szerokopasmowych sieciach bezprzewodowych*, Gliwice, Helion 2009.
- [4] Kozłowski K., Dutkiewicz P., Wróblewski W: *Modelowanie i sterowanie robotów*, Warszawa, PWN 2003.
- [5] Krenich S., Urbańczyk M.: *Six-legged walking robot for inspection tasks*, Solid State Phenomena - Mechatronic Systems, Mechanics and Materials Vol. 180, Zurich, 2012.



- [6] Rafajłowicz E. Rafajłowicz W. Rusiecki A.: *Algorytmy przetwarzania obrazów i wstęp do pracy z biblioteką OpenCV*, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2009
- [7] Zając J., Krupa K., Słota A., Więk T.: *Autonomiczna platforma mobilna do realizacji transportu międzyoperacyjnego - projekt wstępny*, Logistyka Nr 6, s.3779-3788, 2010.
- [8] Zając J., Krupa K., Słota A., Więk T.: *Konstrukcja i układ sterowania autonomicznej platformy mobilnej*, Pomiary Automatyka Robotyka, Nr 2, 2011.
- [9] <http://www.micromotors.eu>
- [10] <http://www.arduino.cc/>
- [11] <http://www.python.rk.edu.pl/w/p/pyqt/>