

dr inż. Mariusz Olszewski
dr inż. Michał Bartyś
mgr inż. Rafał Chojecki
Instytut Automatyki i Robotyki Politechniki Warszawskiej

MINIATUROWE ROBOTY INSPEKCYJNE IARTUS R1 I IARTUS R2

W pracy omówiono budowę oraz zastosowania miniaturowych robotów mobilnych zbudowanych w Instytucie Automatyki i Robotyki Politechniki Warszawskiej.

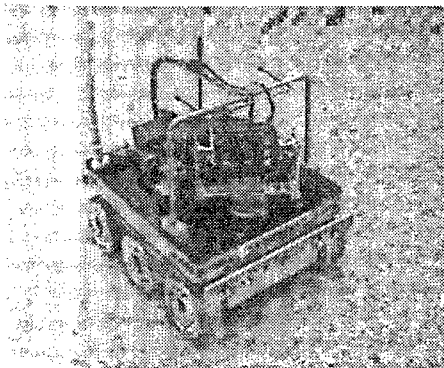
IARTUS R1 AND IARTUS R2: THE INSPECTION ROBOTS

In this paper the structure and applications of miniature mobile robots are described. Mobile robots are designed in the Institute of Automatic Control and Robotics of Warsaw University of Technology.

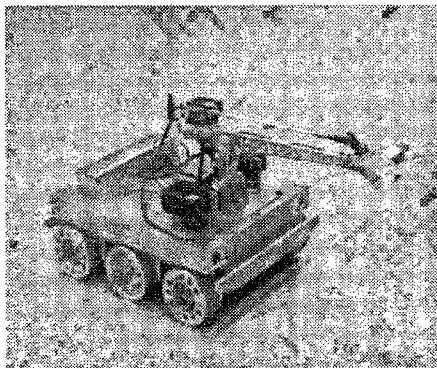
1. WPROWADZENIE

Miniaturowe roboty mobilne w dzisiejszych czasach znajdują coraz więcej zastosowań. Stosowane są w systemach dozoru, do penetracji i identyfikacji nieznanego i niebezpiecznego terenu, w transporcie elementów wewnątrz hal zakładów przemysłowych. Placówki naukowe stosują je do badań nad algorytmami sterowania oraz nawigacji. Na wielu uniwersytetach w Europie Zachodniej, Stanach Zjednoczonych i Japonii zespoły inżynierów i studentów zajmują się konstruowaniem i badaniem miniaturowych robotów mobilnych. Opracowane rozwiązania techniczne nierzadko znajdują zastosowanie w przemyśle.

a)



b)



Rys. 2. Miniaturowe roboty inspekcyjne: a) Iartus R1, b) Iartus R2

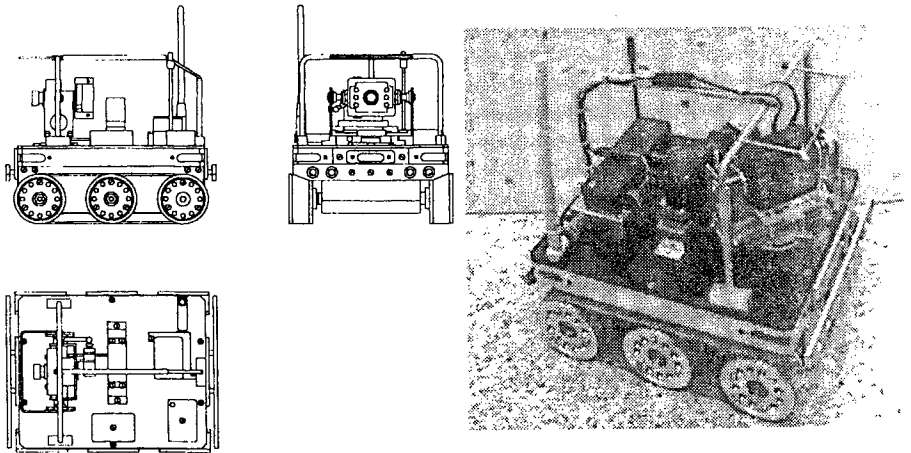
Miniaturowe Roboty Inspekcyjne Iartus R1 i Iartus R2 (rys.1) powstały w Instytucie Automatyki i Robotyki Politechniki Warszawskiej. Są pierwszymi rozwiązaniami z planowanej rodziny urządzeń tego typu, dzięki którym możliwe będzie prowadzenie prac

badawczych i rozwojowych nad systemami sterowania i nawigacji robotów mobilnych w zmieniającym się dynamicznie otoczeniu. Dzięki swoim wielu zaletom mogą stanowić interesującą ofertę dla uczelni technicznych, Policji, Wojska i Straży Pożarnej jak również i służb technicznych zajmujących się inspekcją instalacji wentylacyjnych i rurociągów.

2. BUDOWA ROBOTA

Miniaturowy robot inspekcyjny Iartus R1 (rys.2) ma wymiary 225 x 174 x 235 mm. Robot ma strukturę modułową. Można wyróżnić w niej moduł napędowy -platformę jezdnią, moduł sterujący oraz moduł obserwacyjny - wykonawczy. Taka budowa zapewnia łatwy dostęp do wszystkich zespołów urządzenia, pozwala na wymianę poszczególnych modułów nie wpływając na inne elementy. W zależności od potrzeby, możliwe jest tworzenie kolejnych wersji robota z różnymi modułami posiadającymi odpowiednie oprzyrządowanie.

Platforma mobilna robota została zaprojektowana na podwoziu gąsienicowym. Złożona jest z kadłuba wykonanego z aluminium oraz dwóch zespołów napędowych napędzających prawą i lewą gąsienicę. Każdy z dwóch zespołów napędowych składa się z trzech jednakowych kół o średnicy 54 mm wykonanych z duraluminium. Gąsienice wykonane są z twardego poliuretanu wzmocnianego stalowymi linkami. Zapewniają dobrą przyczepność do szorstkim podłożu i odznaczają się dużą trwałością. Oba zespoły napędzane są przez dwa silniki prądu stałego o napięciu znamionowym 12V, ze zintegrowanymi reduktorami prędkości. Reduktory mają przełożenie 75:1 i pozwalają na uzyskanie maksymalnego momentu obrotowego równego 0,5 Nm. Silniki wyposażono w przetworniki obrotowo - impulsowe. Budowa podwozia pozwala na pokonywanie przeszkód poprzecznych do wysokości 25 mm oraz podjazdów o nachyleniu do 30°.



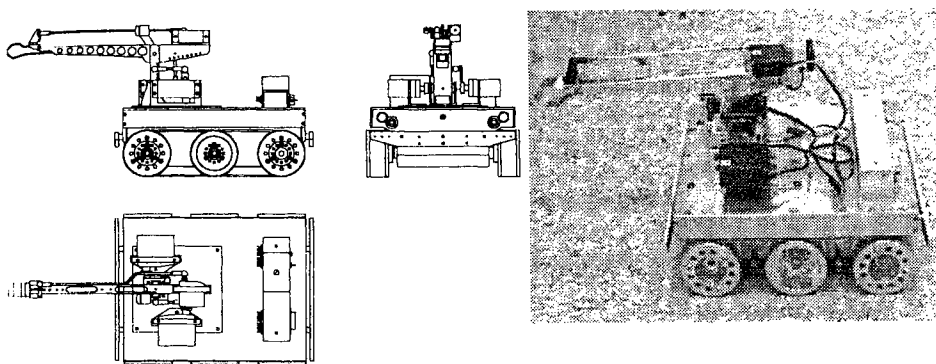
Rys.2. Miniaturowy Robot Mobilny Iartus R1

Moduł sterowania został umieszczony bezpośrednio nad kadłubem. Składa się z duralowej obudowy przykrytej metapleksową pokrywą. Przymocowany jest do modułu napędowego za pomocą specjalnych klamer, dzięki którym, jeśli zajdzie potrzeba można go w prosty i szybki sposób odłączać. Wewnątrz znajduje się mikroprocesorowy sterownik [1] kontrolujący pracę

robota. W ściankach obudowy znajdują się otwory, w których zostały umieszczone czujniki działające w paśmie podczerwieni służące do lokalizowania przeszkód wokół robota.

Moduł obserwacyjny - wykonawczy znajduje się nad modulem sterowania. Składa się z czarno-białej kamery CCD wspomaganej oświetlaczami w zakresie podczerwieni i z nadajnika służącego do przekazywania obrazu do komputera nadrzędnego. Kamera zamocowana została na obrotowym statywie, mogącym obracać się w dwóch osiach. Osie statywu poruszane są za pomocą dwóch modułowych serwomechanizmów, dzięki czemu kamera może obracać się automatycznie w poziomie w zakresie $\pm 45^\circ$ oraz w pionie w zakresie $\pm 30^\circ$. Istnieje możliwość instalacji mikrofonu sprzężonego z kamerą, co przy niektórych rodzajach zadań stanowi udogodnienie.

Miniaturowy Robot Inspekcyjny- Iartus R2 (rys.3) jest rozwinięciem konstrukcji MRI- Iartus R1. Tak jak w poprzednim modelu robot oparty jest na podwoziu gąsienicowym. Gabaryty oraz napęd zasadniczo się są zbliżone. Zmianie uległa konstrukcja kadłuba.



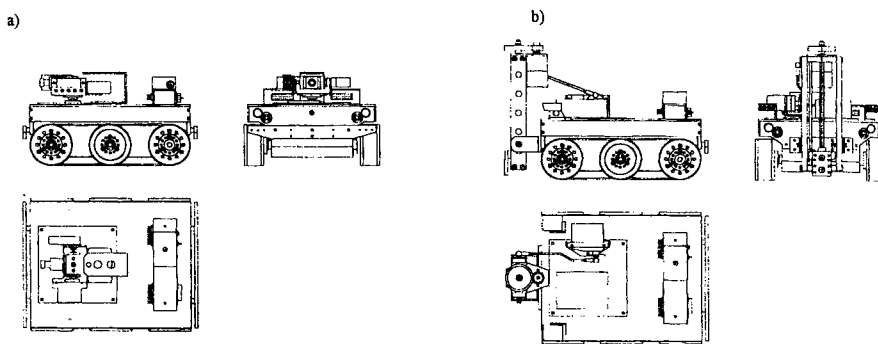
Rys.3. Miniaturowy Robot Mobilny Iartus R2

W przeciwieństwie do R1 moduły napędowy i moduł sterujący zostały zintegrowane w jednym elemencie. Kadłub został wzmocniony i dodatkowo uszczelniony. Umożliwi to pokonywanie przeszkód wodnych o głębokości 30-40 mm oraz pracę w środowisku zapyłonym. W przedniej części kadłuba zainstalowano dwa refleksyjne czujniki optoelektroniczne, dzięki którym możliwe jest wykrycie przeszkód znajdujących się 150 mm przed robotem. Zainstalowano dodatkowo z boku kadłuba między kołami zaczepy umożliwiające instalacje osłon kół lub innego wyposażenia. Do napędu użyto podobnie jak w modelu R1 dwóch silników prądu stałego o napięciu 12 V. Nowe przekładnie o przełożeniu 200:1 pozwalają na osiągnięcie maksymalnego momentu obrotowego wynoszącego 1 Nm. Prędkość jazdy w porównaniu do poprzedniego modelu zmniejszyła się dwukrotnie. Doświadczenia zdobyte podczas testowania R1 pokazały, że dla tego typu urządzeń wartość prędkości nie jest najistotniejszym parametrem robota. Bardziej istotne są możliwości pokonywania przeszkód terenowych i możliwości przenoszenia dodatkowego wyposażenia. Z silnikami zintegrowane są hallotronowe przetworniki obrotowo-impulsowe dzięki którym możliwy jest pomiar prędkości i przebytej drogi. Dają one trzy impulsy na obrót wałka silnika, co biorąc pod uwagę przełożenie daje 600 impulsów na obrót koła. Dla tego typu robotów jest to zadowalająca dokładność pomiaru. W modelu R2 zmodyfikowana została konstrukcja kół. Nowe koła odznaczają się mniejszą masą i są przystosowane do pracy w wodzie.

Robot został wyposażony w wymienne moduły. Pierwszym z nich jest manipulator. Wykonany jest z profili aluminiowych. Składa się z dwóch członów i mini-chwybaka. Do jego napędu zastosowano dwa modelarskie serwomechanizmy HS-300 i jeden HS-80. Zastosowane mechanizmy odznaczają się zwartą budową, małymi wymiarami, niską masą i dużym momentem obrotowym. Na ramieniu manipulatora zainstalowano kamerę CCD. Umożliwi ona obserwację podczas poruszania się robota jak i wykonywania czynności manipulacyjnych.

Drugim modułem jest moduł obserwacyjny wyposażony w miniaturową kamerę CCD. Podobnie jak w R1 umożliwia obracanie kamerą płaszczyźnie poziomej o kąt $\pm 90^\circ$ i w pionie o kąt 90° . W porównaniu ze starszym rozwiązaniem odznacza się lepszymi właściwościami ruchowymi i mniejszą wysokością (rys.4a).

Trzecim modułem jest elektryczny podnośnik. Dzięki niemu robot może podnosić i transportować elementy. Planowane jest również opracowanie specjalnego miniaturowego chwytaka mocowanego do podnośnika. Moduł ten będzie szczególnie przydatny podczas prac badawczych związanych z transportem elementów w dynamicznie zmieniającym się otoczeniu.



Rys. 4. Miniaturowy Robot Mobilny Iartus R2: a) z modułem kamery, b) z podnośnikiem

2. UKŁAD STEROWANIA

Głównym elementem układu sterowania jest mikrokontroler typu MSP430F149 firmy Texas Instruments. Jednostka centralna oraz pozostałe elementy układu sterowania zasilane są z układu zasilania. Układ ten pozwala na zasilanie sterownika w bardzo szerokim zakresie napięć (8..48VDC). Układy sterowania silników pozwalają na realizację pracy nawrotnej. Układy te pracują w klasycznym układzie mostkowym i są sterowane przez jednostkę centralną metodą modulacji szerokości impulsu. Prędkość obrotową silników mierzona jest przez zliczanie w jednostkowych odcinkach czasu impulsów z fotooptycznych przetworników obrotowo-impulsowych zainstalowanych na wałkach silników napędowych. Dzięki temu w układzie sterowania napędu silników możliwe jest zrealizowanie układów automatycznej regulacji prędkości, różnicy prędkości i przemieszczenia kąowego. Jednostkę centralną tworzy pojedynczy układ mikrokontrolera jednomodułowego. Jądem mikrokontrolera jest szesnastobitowa jednostka arytmetyczno-logiczna o architekturze ortogonalnej ze zredukowaną listą rozkazów (RISC). Mikrokontroler posiada wewnętrzną reprogramowalną pamięć programu typu flash o pojemności 60 KB oraz 2KB pamięci o swobodnym dostępie typu RAM. Mikrokontroler zasilany jest ze źródła o napięciu 3,3V pobierając moc rzędu 5mW przy częstotliwości oscylatora kwarcowego równej 4,9152MHz. Mikrokontroler zawiera ponadto szereg dodatkowych modułów w tym:

napędu po zakończeniu realizacji pierwszej wartości zadanej będzie pominięty. Ten, w istocie pseudoinkrementalny sposób sterowania jest wygodny w praktyce gdyż pozwala na:

- tolerowanie asynchronicznego transferu wartości zadanych przez układ sterowania zewnętrznego charakterystycznego dla protokołu MODBUS RTU
- automatyczne zatrzymanie się minirobotu w przypadku zerwania kabla, błędu oprogramowania lub awarii zewnętrznego systemu sterowania

Regulator prędkości jest regulatorem o strukturze prostego regulatora o działaniu proporcjonalnym. Wymaga on dostarczania wyłącznie wartości zadanych prędkości dla każdego napędu niezależnie. Regulator nie posiada wewnętrznego układu pozwalającego na łagodną zmianę prędkości napędu w przypadku wystąpienia wymuszeń skokowych wartości zadanej.

Układ sterowania napędów można scharakteryzować następującymi parametrami technicznymi:

Tabl. 1. Parametry techniczne układu sterowania

NAPIĘCIE ZASILANIA	8..48VDC
POBÓR PRĄDU NA BIEGU JALOWYM	7 mA
LICZBA STEROWANYCH NAPIĘDÓW	5
LICZBA POMIARÓW PRĘDKOŚCI	2
MOC MAKSYMALNA SILNIKA	40W
MAKSYMALNY PRĄD SILNIKA	1A
ZAKRES TEMPERATUR PRACY	-40..+85°C
PROTOKÓŁ KOMUNIKACYJNY	MODBUS-RTU
PRĘDKOŚĆ TRANSMISJI	1200..76800 Bd
WARSTWA FIZYCZNA KOMUNIKACJI	RS232 RS485 CAN 2.0B

3. PROGRAM STERUJĄCY

Program sterujący pracuje w środowisku Windows. Pozwala na sterowanie robotem poprzez komputer kasy PC. Interfejs programowy umożliwia pełne wykorzystanie manewrowych właściwości robota. Operator może sterować prędkością i kierunkiem jazdy robota. Program umożliwia zakręcanie jedną gaśnicą jak również poprzez ich przeciwbieżną pracę.

Program umożliwia sterowanie robotem w różnych konfiguracjach. W zależności od zainstalowanego modułu wyświetlane zostają różne parametry robota oraz uaktywniane odpowiednie funkcje.

W opisywanym programie istnieje możliwość zadawania trajektorii na trzy sposoby. W pierwszym wariantcie parametry trajektorii wprowadzane są do programu poprzez jego wewnętrzny edytor tekstowy jako współrzędne punktów w przestrzeni XY. Drugim sposobem jest projektowanie trasy w trybie graficznym w oknie edytora graficznego należącego do programu. Trzecim sposobem wprowadzania danych trajektorii robota jest metoda nauczania. W tym trybie operator kieruje robotem a parametry przesunięć i prędkości zapisywane są automatycznie. Dzięki tej funkcji możliwe jest odtwarzanie przebytej trajektorii zarówno w przód jak i rewersyjnie.

W oknie programu wyświetlany jest obraz z kamery zainstalowanej na robocie. W przypadku sterowania robotem w trybie teleoperatora możliwe jest przełączenie obrazu na cały ekran monitora. Niezbędne informacje dotyczące stanu robota są wyświetlane na przekazywanym obrazie. Program umożliwia zapisanie w czasie pracy robota obrazów z kamery co jest szczególnie przydatne w zadaniach inspekcyjnych.

Inną cechą programu jest możliwość sterowania robotem poprzez Internet z wykorzystaniem lokalnej sieci.

- 10 układów 16 bitowych modulatorów PWM
- 2 moduły dwukierunkowej, jednoczesnej transmisji szeregowej
- 12 kanałowy 12-to bitowy kompensacyjny przetwornik analogowo-cyfrowy
- porty wejść/wyjść cyfrowych
- układ pomiaru temperatury

Mikrokontroler przystosowany jest do pracy w zakresie temperatur (-40 ..+85°C) określanych powszechnie zakresem „temperatur przemysłowych”.

Układ sterowania napędów zaopatrzone w trzy opcjonalne interfejsy transmisji szeregowej: RS485, CAN 2.0B, RS232C. Dwa pierwsze przeznaczone są do zastosowań przemysłowych, ostatni do badań laboratoryjnych. Interfejs umożliwia dwukierunkową naprzemienną transmisję szeregową danych z prędkościami transmisji w zakresie 1 200..76 800Bd. Interfejs umożliwia sprzężenie jednostki sterowania napędami z zewnętrzną jednostką nadrzędną typu *master* drogą radiową (radiomodem) lub przez bezpośrednie połączenie kablowe. W warstwie aplikacyjnej zaimplementowano ogólnie znany i zweryfikowany w warunkach przemysłowych protokół komunikacyjny MODBUS-RTU zapewniający dostatecznie wysoki poziom bezpieczeństwa transmitowanych danych. Dla minimalizacji zużycia energii w kanale RS232 zastosowano energooszczędny układ z funkcją auto-shutdown, zaś w kanale RS485 układ sterownika magistrali o poborze prądu wynoszącym zaledwie 0,3mA.

Do pomiaru rzeczywistej prędkości obrotowej silników w robocie zastosowano przetwornik obrotowo-impulsowy. Impulsy przetwornika obrotowo-impulsowego zliczane są przez jednostkę centralną w określonych jednostkowych odcinkach czasu. W ten sposób wyznaczana jest uśredniona prędkość obrotowa silnika w odcinku jednostkowym czasu. Prędkość ta jest w przybliżeniu liniowo zależna od napięcia zasilania. W celu wyeliminowania wpływu wahań wartości napięcia zasilania oraz wpływu chwilowych obciążeń na prędkość obrotową silników konieczne stało się zastosowanie układów automatycznej regulacji prędkości.

Układ sterowania napędu robota mobilnego sterowany jest przez zewnętrzną, nadrzędną jednostkę sterującą. Dla celów komunikacyjnych wybrano protokół MODBUS-RTU dobrze ugruntowany w praktyce przemysłowej. W przypadku układu napędu robota przyjęto skrajnie zredukowaną listę rozkazów standardu MODBUS-RTU. Zaimplementowano tylko dwa, ale wystarczające do obsługi układu sterującego symetryczne rozkazy RTU. Sterownik traktowany jest jako typowe urządzenie podporządkowane (*slave*) o programowalnym adresie z zakresu 1..247 i programowalnej prędkości transmisji z zakresu 1200..76800 Bd. Domyślny adres jest równy 1, zaś domyślna prędkość transmisji jest równa 9600Bd.

Tryb sterowania lokalnego odciąża kanał komunikacyjny od ciągłego transferu wartości sygnału nastawiającego generowanego przez zewnętrzny układ sterowania. Tryb sterowania zdalnego może być wykorzystywany do realizacji sterowań niekonwencjonalnych, stosowany w fazie eksperymentalnych badań właściwości trakcyjnych napędów lub w fazie rozwijania algorytmów sterowania. W trybie sterowania lokalnego użytkownik ma do wyboru jeden z trzech regulatorów zaimplementowanych w sterowniku:

- regulator przemieszczenia
- regulator prędkości
- regulator różnicy prędkości

Każdy z obu napędów ma niezależne układy regulacyjne. Mogą one mieć tylko wspólną wartość zadaną w przypadku regulatora różnicy prędkości. Regulator przemieszczenia jest regulatorem pozycjonującym. Wymaga wprowadzenia dwóch wartości zadanych: drogi kątowej oraz prędkości i kierunku ruchu. Po przebyciu zadanej drogi kątowej przez wał silnika napędu następuje automatyczne zatrzymanie napędu, chyba, że w trakcie trwania ruchu zostanie wygenerowana następna wartość zadana przemieszczenia kątowego. Wówczas przemieszczenie wynikowe będzie sumą obu wartości zadanych, a proces wyhamowania

4. ZASTOSOWANIA

Dydaktyczne- wykorzystanie przez uczelnie wyższe o robotycznych lub informatycznych kierunkach kształcenia,

Naukowe- wykorzystanie do opracowania nowych metod nawigacji autonomicznej, badania układów sensorycznych i algorytmów sterowania,

Inspekcyjne- praca w miejscach trudno dostępnych (przewody wentylacyjne kanały itp.), lub niebezpiecznych,

Specjalne- wykorzystanie przez Policję, Wojsko, Straż Pożarną do pracy w terenie niebezpiecznym dla człowieka, współpraca z robotami inspekcyjno - saperskimi.

Rozrywkowo-hobbistyczne wykorzystanie przez osoby prywatne (hobbistów), zainteresowane tematyką robotyki mobilnej.

Popularno naukowe – sterowanie przez Internet robotem mobilnym w czasie trwania programów młodzieżowych, popularno-naukowych lub edukacyjnych.

5. PARAMETRY TECHNICZNE ROBOTÓW

Tabl. 2. Parametry techniczne robotów

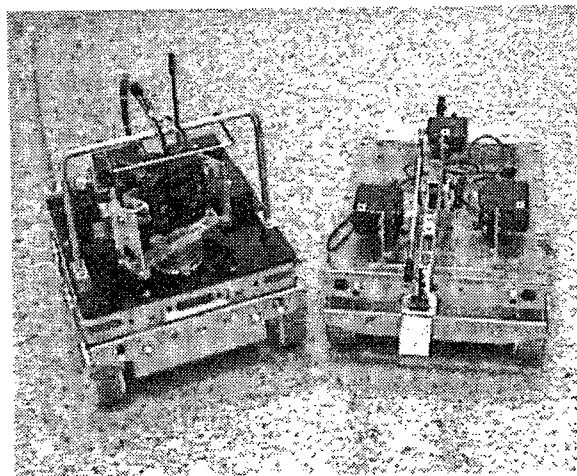
WYMIARY:	
DŁUGOŚĆ	225 mm
SZEROKOŚĆ	174 mm
WYSOKOŚĆ	165 mm
MASA:	1,5 kg
NAPEŁD:	
RODZAJ	Gąsienicowy
SILNIKI	DC 12V
PRZEŁOŻENIE	75 : 1 (200 : 1)
PRĘDKOŚĆ OBROTOWA	81 obr/min (33 obr/min)
MAKSYMALNY MOMENT OBROTOWY	0,5 Nm (1 Nm)
MASYMALNA PRĘDKOŚĆ LINIOWA ROBOTA	0,17 ^{m/s} (0,07 ^{m/s})
UKŁAD STEROWANIA:	Mikroprocesorowy układ sterowania w robocie podporządkowany nadrzędnemu komputerowi klasy PC
WYPOSAŻENIE DODATKOWE:	Kamera CCD ze wspomaganiami podczerwieni zainstalowana na Zdalnie sterowanym statywie

6. PODSUMOWANIE

Stosunkowo niewielka cena konstrukcji, małe gabaryty, duża zwrotność i wytrzymałość, a zarazem duże możliwości adaptacji są podstawowymi wyróżnikami konstrukcyjnymi robotów IARTUS R1 i R2 (rys.5).

Prace badawcze z ich wykorzystaniem mogą zaowocować stworzeniem nowych systemów sterowania, opracowaniem wyrafinowanych algorytmów sterowania, które pozwolą robotom mobilnym samodzielnie rozwiązywać problemy związane z ich poruszaniem się w dynamicznie zmieniającym się środowisku. Doświadczenia zdobyte podczas prac z miniaturowymi robotami mobilnymi mogą w przyszłości zostać przeniesione na duże roboty mobilne, co wydatnie może zmniejszyć koszty związane z prowadzeniem prac projektowych i badawczych przy budowie tego typu urządzeń. Mogą umożliwić one budowę

nowoczesnych i w pełni autonomicznych robotów inspekcyjno – zwiadowczych, specjalistycznych wózków inwalidzkich o dużym stopniu automatyzacji. Miniaturyzacja takich robotów może być przydatna przy inspekcjach trudnodostępnych miejsc takich jak rurociągi czy kanały wentylacyjne.



Rys.5. Miniaturowe Roboty Iartus R1 i Iartus R2

Ze względu na zagrożenia, na jakie narażeni są saperzy, uzasadnione jest użycie miniaturowych robotów mobilnych w Policji i Wojsku. Roboty takie mogą sprawnie docierać do miejsc, do których nie zawsze może dotrzeć człowiek nie narażając zdrowia czy życia.

LITERATURA

- [1] Chojecki R. : Miniaturowy robot mobilny Virtus PAR 9 (2001), s. 5-7
- [2] Bartyś M. : Energooszczędny układ sterowania napędu mini robota mobilnego, PAR 10 (2001), s 12-15