

**Krzysztof KOZŁOWSKI, Piotr DUTKIEWICZ, Tomasz JEDWABNY,
Damian DOBROCZYŃSKI, Grzegorz NIWCZYK, Jarosław MAJCHRZAK**

POLITECHNIKA POZNAŃSKA

KATEDRA AUTOMATYKI, ROBOTYKI I INFORMATYKI

Miniaturowy robot mobilny dla celów badawczych i dydaktycznych

Prof. dr hab. Krzysztof KOZŁOWSKI

profesor Politechniki Poznańskiej zatrudniony w Katedrze Automatyki, Robotyki i Informatyki. Stypendysta Fulbrighta (1993 r.) w Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology. Jest członkiem Senior Member IEEE oraz członkiem European Mechanical Society, Gesellschaft für Angewandte Mathematik und Mechanik oraz Poznańskiego Towarzystwa Przyjaciół Nauk. Jego zainteresowania koncentrują się wokół dynamiki oraz sterowania robotów, planowania trajektorii oraz programowania robotów i różnych aspektów związanych ze sprzężeniem sensorycznym w robotyce.



Dr inż. Piotr DUTKIEWICZ

adiunkt zatrudniony w katedrze Automatyki, Robotyki i Informatyki Politechniki Poznańskiej. Jest członkiem Poznańskiego Towarzystwa Przyjaciół Nauk. Jego zainteresowania koncentrują się wokół identyfikacji układów mechanicznych, układów sterowania robotów z ogniwami sztywnymi i elastycznymi oraz wykorzystania sensorów w robotyce.



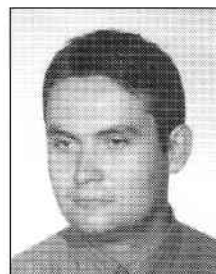
Mgr inż. Tomasz JEDWABNY

absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej, obecnie pracownik Katedry Automatyki, Robotyki i Informatyki Politechniki Poznańskiej. Jego zainteresowania to architektura i oprogramowanie sterowników, wykorzystanie sensoryki w robotyce, w szczególności w robotyce mobilnej, badanie jakości informacji sensorycznej uzyskanej z pomiarów rzeczywistych.



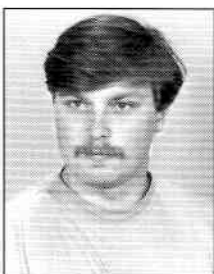
Mgr inż. Damian DOBROCZYŃSKI

asystent w katedrze Automatyki, Robotyki i Informatyki na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej. Członek PTPN. Studia skończył w 1993 r. Zajmuje się oprogramowaniem systemów sterowania robotów mobilnych. Interesuje się systemami czasu rzeczywistego oraz inżynierią oprogramowania.



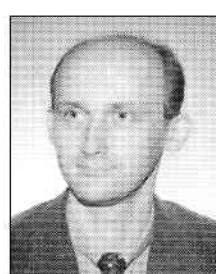
Mgr inż. Grzegorz NIWCZYK

absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej, aktualnie zatrudniony w Katedrze Automatyki, Robotyki i Informatyki Politechniki Poznańskiej. Jego zainteresowania koncentrują się wokół zagadnień związanych z systemami sensorycznymi oraz algorytmami planowania trajektorii. Zajmuje się również detekcją i lokalizacją kolizji w przestrzeni roboczej robotów.



Mgr inż. Jarosław MAJCHRZAK

absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej, obecnie pracownik Katedry Automatyki, Robotyki i Informatyki Politechniki Poznańskiej. Jego zainteresowania to wykorzystanie sensoryki w robotyce mobilnej, tworzenie modeli otoczenia na podstawie danych z systemów sensorycznych dla potrzeb sterowania robotami mobilnymi oraz badanie jakości informacji sensorycznej uzyskanej z pomiarów rzeczywistych.



Streszczenie

Przedstawiono opis konstrukcji i oprogramowania miniaturowego robota mobilnego. Opisano też krótko sposób planowania zadań i sterowanie grupą robotów mobilnych współpracujących ze sobą w nieprzyjaznym środowisku. Zespół robotów ma ściśle określone cele, które sformułowane są w postaci strategii. Program planujący ruchy poszczególnych robotów mobilnych czerpie również informacje z systemu wizyjnego. Zadaniem systemu wizyjnego jest rozpoznanie i określenie położenia oraz orientacji robotów drużyny własnej, drużyny przeciwnika oraz piłki.

Słowa kluczowe: robot mobilny, system wizyjny, sprzężenie wizyjne, planowanie trajektorii, sterowanie.

Abstract

In this paper, construction and software of a mobile micro-robot are presented. Task planning and control techniques for a group of mobile robots are briefly outlined. They co-operate in an unfriendly environment. The robot team has precisely defined tasks, formulated as a strategy. The vision system delivers data for the trajectory planning program of particular mobile robots. This system is responsible for recognition and computation of position and orientation of all team members, all opponent team members, and of the ball.

Keywords: mobile robot, frame grabber, vision feedback, trajectories planning, control

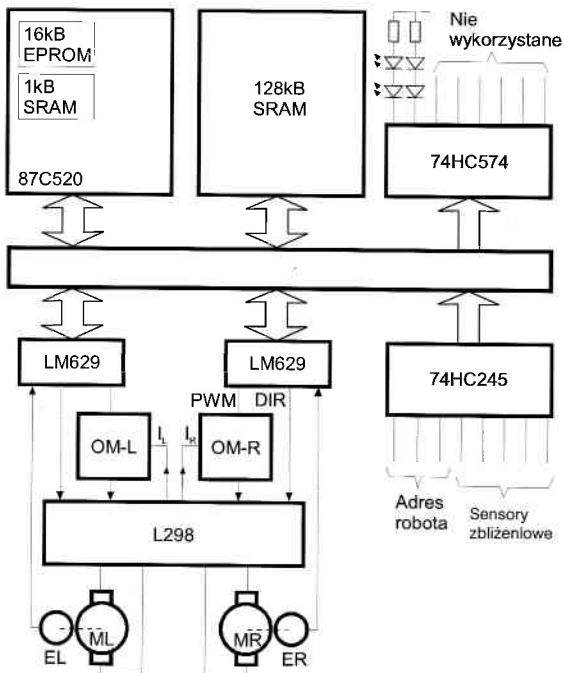
WPROWADZENIE

Praca została wykonana w trakcie realizacji grantu badawczego pt. „Planowanie zadań i sterowanie w czasie rzeczywistym systemem wielu robotów mobilnych w nieznanym środowisku” (8T11A020140). Obiektem sterowania jest grupa trzech lub pięciu miniaturowych robotów mobilnych, które razem tworzą drużynę grającą w piłkę nożną z analogiczną grupą robotów przeciwnika. Praca obejmuje konstrukcję miniaturowych robotów wraz z oprogramowaniem pokładowym oraz zewnętrzne oprogramowanie sterujące.

OPIS ROBOTA

Konstrukcja mechaniczna robota oparta została na azurowej ramie z duraluminium, do której bezpośrednio zamocowane zostały silniki napędowe kół wraz z przekładniami oraz obwód drukowany sterownika robota. Zarówno w czasie postoju, jak i w czasie ruchu robot opiera się o podłoże w trzech punktach; na kołach napędowych umieszczonych osiowo oraz na jednym

z dodatkowych elementów ślizgowych umieszczonych w przedniej i tylnej części ramy robota. Pakiet akumulatorów zasilających umieszczono bezpośrednio nad silnikami napędowymi. W sterowniku robota zastosowano mikrokomputer jednocukładowy DS87C520 z wewnętrzną pamięcią programu (16 kB EPROM) i wewnętrzną pamięcią danych (1kB SRAM). Układ jest taktowany zegarem 33 MHz. Dodatkowo zastosowano zewnętrzną pamięć typu SRAM o rozmiarze 128 kB. Może ona być wykorzystana jako dodatkowa pamięć programu (63 kB) i dodatkowa pamięć danych (63 kB) lub tylko jako pamięć danych (dwa banki o rozmiarze po 63 kB każdy). Przestrzeń adresowa urządzeń we/wy wynosi 1 kB. W przestrzeni tej znajdują się sterowniki obu osi robota, ośmiobitowy port wejściowy oraz ośmiobitowy port wyjściowy. Port wejściowy przeznaczony jest do odczytu danych z sensorów zbliżeniowych umieszczonych na pokładzie robotów (max 5 sensorów) oraz do wprowadzania indywidualnego adresu poszczególnych robotów (adres 3 bitowy). Przez port wyjściowy sterowane są diody LED przeznaczone do wspomagania zewnętrznego systemu określania położenia i orientacji robota (2 bity). Do sterowania silnikami napędowymi osi robota (rys.1) wykorzystano układy LM629 współpracu-



Rys. 1. Schemat ideowy sterownika robota

jące z mostkowymi wzmacniaczami mocy L298 i przetwornikami obrotowo-impulsowymi umieszczonymi na przekładni pomiędzy silnikami a kołami napędowymi robota (150 imp./obrót).

Sygnaly z ww. przetworników zostały dodatkowo wykorzystane do określania położenia i orientacji robota. Silniki napędowe sterowane są sygnałem typu PWM (Pulse Width Modulation). Ze względu na możliwość wystąpienia poślizgu kół, a co za tym idzie pojawienie się błędów zliczania położenia i orientacji robota zastosowano blok ograniczenia momentu napędowego (BOM). Do łączności pomiędzy robotem a komputerem nadrzędnym wykorzystano radiowe łącze szeregowe RS232. Ponieważ mikrokomputer jednocukładowy DS87C520 ma dwa niezależne porty do łączności szeregowej, istnieje możliwość zasto-

sowania dodatkowego modułu współpracującego ze sterownikiem pokładowym robota z wykorzystaniem ww. łącza szeregowego. Jako źródło zasilania robota wykorzystany został pakiet 8 akumulatorów NiMH o pojemności 860 mAh. Do zasilania sterownika (napięcie 5V) wykorzystano zasilacz impulsowy PWM typu STEP-DOWN o dużej sprawności.

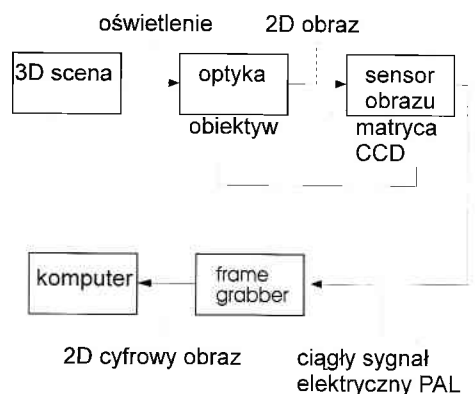
Oprogramowanie pokładowe robota

W wewnętrznej pamięci ROM sterownika zawarty został interpreter poleceń dla robota oraz moduł zliczania położenia i orientacji robota na podstawie obrotów kół napędowych. Interpreter poleceń rozróżnia następujące polecenia:

- zmianę prędkości poszczególnych kół,
- przejazd na zadaną odległość z określoną prędkością,
- jazda po łuku o zadanym promieniu,
- dojazd do zadanej pozycji,
- sterowanie diodami LED (współpraca z zewnętrznym systemem określania położenia i orientacji robota),
- odczyt pozycji i orientacji robota zliczonej przez sterownik,
- zapis pozycji i orientacji robota,
- odczyt słowa statusowego robota,
- zarządzanie kolejną instrukcją sterującą: (możliwość przesłania do robota sekwencji poleceń do wykonania jedno po drugim,
- przejście do trybu ładowania zewnętrznej pamięci programu.

SPRZĘŻENIE WIZYJNE

Obliczenie rzeczywistego położenia i orientacji robota mobilnego na podstawie obrotów kół napędowych jest możliwe tylko wówczas, gdy koła robota nie ślizgają się i mają ciągły kontakt z powierzchnią boiska. Ta idealna sytuacja nie ma jednak miejsca przy zastosowaniu robota mobilnego do gry w piłkę, ponieważ narażony on jest na uderzenia przez roboty przeciwnika. Sam zaś musi popychać lub uderzać piłkę, co przy dużych przyspieszeniach może owocować utratą kontaktu z powierzchnią boiska. Również zderzenie z bandą boiska powoduje, że pomiar z kół jest nieprzydatny do określania położenia robota. Jedynym sposobem, który pozwala na jednoznaczne i precyzyjne określenie rzeczywistego położenia robota, jest wyposażenie drużyny małych robotów w dodatkowy zewnętrzny system pozycjonowania. W tym konkretnym przypadku zastosowano system wizyjny, do którego zadań należy identyfikacja oraz śledzenie wyróżnionych na scenie obiektów. Struktura sprzętowa takiego systemu wizyjnego przedstawiona jest na rys. 2.



Rys. 2. Struktura sprzętowa systemu wizyjnego

Na trójwymiarową scenę skierowana jest kamera przemysłowa (kolorowa kamera CCD firmy PANASONIC). Obiektowy, w który wyposażona jest kamera, rzutuje obraz na matrycę CCD (przetwornik 1/3", 450 linii TV). Wyjście kamery pracujące w standardzie PAL podaje w efekcie elektryczny sygnał ciągły o odpowiednich parametrach zgodnych z tym standardem. Sygnał ten doprowadzony jest do specjalizowanej karty „frame grabber” typu Media Camp 7 Plus koreańskiej firmy Dooing Electronics współpracującej z komputerem klasy IBM PC. Obraz w postaci cyfrowej może być zapamiętany z rozdzielczością 640:480, 320:240, 240:180, 160:120. Szybkość zapamiętywanych obrazów dochodzić może do 30 ramek/sekundę. Dwa wejścia karty umożliwiają podłączenie kamer pracujących w standardzie PAL lub NTSC. Dane mogą być zapamiętywane w formacie YUV lub RGB (24 bity).

Zadaniem systemu wizyjnego jest podanie, w jakim miejscu boiska znajdują się roboty własne i przeciwnika oraz gdzie w danej chwili znajduje się piłka. Jak wcześniej wspomniano, informacja ta potrzebna jest w każdej chwili. Ze zrozumiałych względów (ograniczona szybkość akwizycji, czas potrzebny na przetworzenie obrazu) szybkość pozyskiwania tej informacji jest ograniczona. Kresem górnym jest sprzętowo ograniczenie narzucone przez standard PAL (25 razy na sekundę). Na obecnym etapie zaimplementowane algorytmy przetwarzania obrazu oraz rozpoznania obiektów pozwoliły nam na uzyskanie wyniku 20 razy na sekundę. Wynik ten dotyczy identyfikacji oraz śledzenia siedmiu obiektów na scenie z bardzo dużym prawdopodobieństwem podania właściwej informacji (właściwy obiekt, właściwe położenie) z błędem adekwatnym do rozdzielczości tzn. ± 1 piksel. Na obecnym etapie trwają prace nad optymalizacją numeryczną zaimplementowanych algorytmów, co powinno podwyższyć szybkość przetwarzania informacji wizyjnej nawet do 25 ramek na sekundę. Tak dużą szybkość sprzężenia wizyjnego można uzyskać stosując wielokryterialną analizę punktów obrazu dla zminimalizowanych pod względem wielkości fragmentów obrazu. Wielkości użytych fragmentów obrazu pozwalają na prawidłowe wyznaczenie przyjętych kryteriów. Każdy z robotów wyposażony jest w koszulkę w dwóch kolorach: jeden to kolor drużyny, drugi zaś to kolor służący do identyfikacji konkretnego robota. Piłka do gry jest (określona przepisami FIRA) koloru pomarańczowego. Rozpoznanie obiektu oparto na analizie kolorów w obecności silnych zakłóceń. W trakcie prowadzonych badań okazało się, że nierównomierność oświetlenia silnie wpływa na kolor obiektu powodując nie tylko zmianę nasycenia koloru, ale również wprowadza zakłócenia „czystości” koloru. Duże zakłócenia powoduje też materiał, z którego mogą być wykonane koszulki robotów. Gładki materiał przyczynia się do powstania lustrzanych odbić silnej wiązki światła białego służącego do oświetlenia sceny (natężenie oświetlenia regulowane są odpowiednimi przepisami). Mając powyższe na uwadze zdecydowano się na definiowanie kolorów przez uczenie systemu wizyjnego. Odpowiedni algorytm pozwala zapamiętać informację o charakterze statystycznym, która dotyczy tego, jak „wygląda” wskazany kolor w różnych miejscach boiska. Później, w czasie gry, system wizyjny korzysta z nabytej wiedzy i w miarę dokładnie potrafi przydzielać poszczególne punkty obrazu do danego koloru. Wykryte punkty określonego koloru poddane są następnie grupowaniu w tzw. obszary spójne. W celu określenia spójności obszarów można posługiwać się rekursywnym lub sekwencyjnym algorytmem grupowania punktów. Algorytmy te są proste i powszechnie znane, dlatego nie będą tutaj zamieszczone. Położenie właściwego obiektu obliczone jest jako środek ciężkości x_c , y_c figury geometrycznej, który obliczony jest z zależności:

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m jB[i,j]}{S}, \quad (1)$$

$$y_c = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m iB[i,j]}{S},$$

gdzie $B[i,j]$ jest obszarem danej figury, zaś S jest polem figury obliczonym ze wzoru:

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m B[i,j]. \quad (2)$$

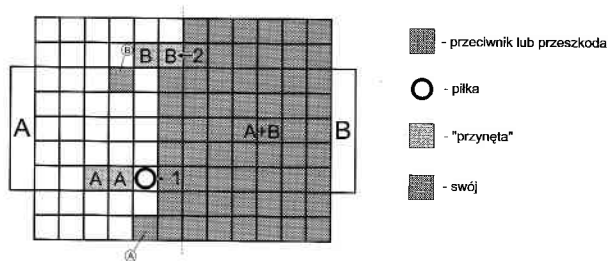
Tak skonstruowany algorytm dla figur o jednolitym kolorze i znacznej ilości punktów działa bardzo skutecznie. Roboty służące do gry w piłkę nożną wyposażone są w koszulki o bardzo małych wymiarach. Skutkuje to tym, że w obecności silnych zakłóceń (oświetlenie, sposób odtwarzania kolorów standardu PAL itd.) taki sposób obliczania położenia obiektu nie daje zadowalających rezultatów. W związku z tym, zastosowano następną kryterium, które pozwala odpowiedzieć na pytanie: „czy wskazany obszar jest poszukiwanym obiektem?”. Kryterium to bada rozkład koloru, a raczej rozkład zakłóceń na powierzchni obiektu. Techniki filtracji obrazu, mające na celu usunięcie zakłóceń, są zbyt kosztowne obliczeniowo. Stosowanie ich dla tej klasy sprzętu nie ma najmniejszego sensu. Dlatego zdecydowano się wykorzystać same zakłócenia do wspomaganie analizy obrazu. W tym celu bada się rodzaj oraz rozkład powierzchniowy zakłóceń w danym obiekcie. System wizyjny w czasie rozruchu „uczy się”, jakie są to zakłócenia, by następnie już w czasie gry wykorzystać tę wiedzę przez odpowiednio skonstruowane kryteria. Tak wzbogacony system wizyjny staje się bardzo odporny na zakłócenia, a jego odpowiedź jest pewna tzn. prawdopodobieństwo wykrycia obiektu jest bliskie 99%. Jako ciekawostkę można przytoczyć kilka faktów z prób mających na celu określenie przydatności poszczególnych poziomów decyzyjnych. Na początku nawet małe różnice oświetlenia powodowały duże błędy w identyfikacji obiektów. Po zastosowaniu analizy zakłóceń zmniejszenie natężenia oświetlenia z 1200 lx do 50 lx wpływały na jakość śledzenia obiektów. Oko ludzkie oglądające w tym samym czasie obraz na ekranie TV z kamery praktycznie nie jest w stanie odróżnić obiektu od tła. System wizyjny zaś ze szczątkowej informacji (wspomaganej analizą rozkładu zakłóceń) potrafi wyciągnąć właściwe wnioski.

REALIZACJA STRATEGII GRY

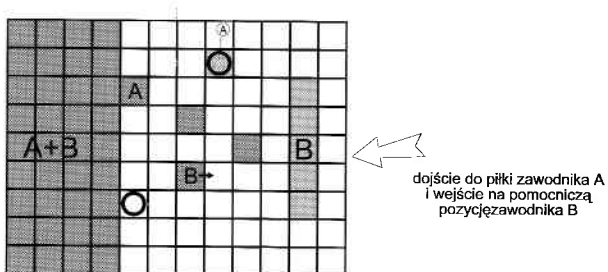
Konstrukcja strategii gry wymaga pewnych założeń. Przyjęto, że gra toczy się na płaszczyźnie podzielonej na $M \times N$ rastrów. Wymiar rastra dobrano tak, że może się w nim zmieścić zawodnik. Jeżeli pozycja i orientacja obiektu powoduje, że jego obrys przecina granice rastra, to wtedy taki obiekt zajmuje więcej niż jedną komórkę płaszczyzny. Na tak dobranej tablicy można z łatwością zastosować jeden z algorytmów APF (Artificial Potential Fields) do znalezienia trajektorii zawodnika. Taka trajektoria jest listą rastrów pola gry, które powinien osiągnąć zawodnik w drodze do celu. Ze względu na specyfikę układu sensorycznego i dynamiczny charakter środowiska przyjęto, że tylko pierwsze elementy z listy obliczonej trajektorii brane są pod uwagę przy sterowaniu zawodnika. System obliczeniowy ma za zadanie

przeanalizować sytuację na polu gry (pozycje swoich zawodników i przeciwników, kierunki ich ruchu, pozycje i ruch piłki, aktualny tryb gry) i na podstawie ww. danych „pokolorować” pole gry, tzn. wypełnić wartościami niektóre z rastrów. Wartości te bezpośrednio decydują o rozkładzie sztucznego pola potencjału, czyli obranej następnie trajektorii. I tak np. jeżeli zawodnik znajduje się w trybie dochodzenia do piłki, rastry mieszczące przeszkody (pozostali zawodnicy) będą miały nadane wartości „odpychające”, a raster zajęty przez piłkę - wartość przyciągającą. Jest to jedna z najprostszyc możliwości „pokolorowania” pola gry. Gdy np. chcemy wybrać tryb współdziałania zawodników, to raster zajęty przez partnera z zespołu powinien obrać wartość „lekką przyciągającą”. Innym przykładem jest moment przechwycenia piłki - raster zajęty przez piłkę jest w tym momencie „kolorowany” neutralnie (przyjmuje się, że piłka jest popychana przez zawodnika), a wartości „przyciągające” nadane są rasterowi obszary pola bramkowego. Z powyższych przykładów widać, że system strategii tłumaczy swe decyzje na pewną postać sztucznego pola potencjałów, co z kolei powoduje konkretny ruch robotów. W przyjętym rozwiązaniu nie zajmujemy się problemem zakleszczania (lokalnych minimów), gdyż rozsądne jest przyjęcie założenia, że nawet, gdy się one pojawiają w jakimś momencie, to duża dynamika gry powoduje wyjście z tej kłopotliwej sytuacji. Na rys. 3 i 4 przedstawiono kilka przykładów „kolorowania” pola gry.

Proces decyzyjny rozbity jest na dwa etapy. W pierwszym następuje analiza zespołowa sytuacji, tzn. podejmowane są decyzje najslusniejsze z punktu widzenia zespołu graczy. Można powiedzieć, że cały zespół objawia w danej sytuacji odpowiednie zachowanie. Zachowanie „zespolowe” wpływa na zachowanie pojedynczych zawodników, choć w każdym momencie gry zawodnicy działają z dość dużą autonomią stosownie do przyjętej dla siebie roli (bramkarz, obrońca, napastnik, pomocnik). Aktualnie tylko gracz na pozycji bramkarza ma na stałe przypisaną rolę - bramkarza właśnie, natomiast role napastnika, obrońcy i pomoc-



Rys. 3. „Kolorowanie” pola gry dla obrony



Rys. 4. „Kolorowanie” pola gry dla ataku

nika są przypisywane w sposób dynamiczny, w zależności od aktualnie przyjętego zachowania „zespolowego”.

Każda z lokalnych map graczy jest podstawą obliczenia ścieżki ruchu. Ścieżka obliczana jest począwszy od aktualnej pozycji zawodnika, a skończywszy na obszarze o najniższym potencjale. Uzyskana w ten sposób ścieżka uwzględnia wszystkie decyzje podjęte przez zespół jak i pojedynczych graczy. Zawiera zazwyczaj o wiele za dużą liczbę punktów jak na potrzeby regulatora ruchu gracza. Dlatego też zdecydowano się brać kilka pierwszych punktów ścieżki do realizacji ruchu zawodnika „wygładzając” jednocześnie powstały w ten sposób fragment, aby zlikwidować skutki rasteryzacji najbliższego otoczenia gracza.

Podstawowym zadaniem robota piłkarza jest dotarcie do wyznaczonego celu, opisanego w układzie współrzędnych pola gry oraz z zadaną orientacją. W systemie sterowania zastosowano metody, które są częścią algorytmu poszukiwania celu. Metody te przetwarzają polecenie dojazdu do celu na niezbędne do wykonania podzadania, aby polecenie to zrealizować. Dekompozycja polecenia polega zasadniczo na dwóch metodach:

- 1) pierwszej opartej na przemieszczaniu się robota po łukach (fragmentach okręgów) z zadaną orientacją końcową,
- 2) drugiej opartej na przemieszczaniu się po prostych i korygowaniu kierunku przemieszczania w punkcie chwilowego zatrzymania.

Przemieszczanie się po łukach odbywa się na podstawie orientacji początkowej robota i odległości do wyznaczonego celu. Na tej podstawie określa się bieżący promień, po którym porusza się środek robota. Promień ten jest podstawową daną do wyznaczania różnicy prędkości kół robota. W przypadku znacznej odległości robota od celu długość łuku może być niewielka, natomiast promień okręgu duży. Wtedy robot porusza się po ścieżce zbliżonej do prostej. W przypadku gdy cel jest blisko środka robota, robot może zawracać i cofać się, a także obracać się wokół chwilowego środka obrotu, gdy wyznaczony cel znajduje się w bezpośrednim otoczeniu robota.

Przemieszczanie po prostych z aktualnego punktu położenia robota do wyznaczonego celu nie wymaga różnicowania prędkości kół robota. Konieczność zmiany kierunku jazdy jest realizowana w czasie zatrzymania robota i odbywa się tylko przez obrót robota wokół środka robota.

UWAGI KOŃCOWE

Przedstawiony w pracy system współpracujących robotów mobilnych wraz z oprogramowaniem w całości został opracowany i wykonany w Katedrze Automatyki, Robotyki i Informatyki Politechniki Poznańskiej.

LITERATURA

- [1] H.S. SHIM, M.J. JUNG, H.S. KIM, CHOI and J.H. KIM: Development of Vision-Basic Soccer Robots for Multi-agent Co-operative Systems. Micro-Robot World Cup Soccer Tournament Proceedings, 1997, p. 29-34.
- [2] J.H. JOHNSON, M.J. BOOTH: Robot football: emergent behaviour in nonlinear discrete systems, Micro-Robot World Cup Soccer Tournament Proceedings, 1997, p.87-99.
- [3] R. SARGENT, C. WITTY, B. BAILEY, A. WRIGHT: Use of fast vision tracking for cooperating robots in the MIROSOT. Micro-Robot World Cup Soccer Tournament Proceedings, 1996, p.155-157.