

Izabela ŻUKOWSKA, Teodora DIMITROVA-GREKOW, Valery SALAUYOU

POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA,
ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok

Metoda zdalnego zarządzania robotami mobilnymi

Mgr inż. Izabela ŻUKOWSKA

Ukończyła studia na Wydziale Informatyki Politechniki Białostockiej na kierunku Informatyka w specjalności Grafika i Multimedia, Białystok w 2011r. Pracuje jako programista .NET. Jej zainteresowania naukowe to robotyka, eksploracja danych oraz grafika komputerowa.



e-mail: zukowska.iza@gmail.com

Dr hab. inż. Valery SALAUYOU

Ukończył studia na Wydziale Informatyki w Narodowym Uniwersytecie Technicznym w Minsku w 1982r., obronił pracę doktorską w 1987r., a 2003r. zakończył habilitację. Jest profesorem na Wydziale Informatyki przy Politechnice Białostockiej. Jego zainteresowania naukowe to synteza układów programowalnych, modele automatów skończonych i ich implementacja.



e-mail: walsol@pb.edu.pl

Dr inż. Teodora DIMITROVA - GREKOW

Ukończyła studia na Wydziale Elektroniki Politechniki Sofijskiej, Bułgaria w 1991r., obroniła pracę doktorską na Uniwersytecie Technicznym w Wiedniu w 1997r. Jest adiunktem na Wydziale Informatyki przy Politechnice Białostockiej. Jej zainteresowania naukowe to synteza układów programowalnych, robotyka, mechatronika, analiza i przetwarzanie sygnałów.



e-mail: t.grekow@pb.edu.pl

1. Wstęp

Robotyka oraz technologie internetowe to dwie pręźnie rozwijające się dziedziny naukowe. Kwestią czasu było wykorzystanie ich wspólnego potencjału do stworzenia rozbudowanych systemów o szerokim spektrum możliwości [1]. Rozwiązania technologiczne pozwalające na zdalne sterowanie robotami są w dzisiejszych czasach coraz popularniejsze [2]. Systemy tego typu pozwalające na kontrolowanie pracy robotów na odległość znalazły zastosowanie w zadaniach, których człowiek nie byłby w stanie wykonać samodzielnie, czy też w sytuacjach stwarzających zagrożenie życia [3].

W dziedzinie robotyki można zaobserwować znaczny postęp w kierunku sterowania robotami na odległość. Powstające układy coraz częściej są wyposażone w technologie Bluetooth czy Wi-Fi, dzięki czemu możliwa jest realizacja zdalnego sterowania za pomocą np. klawiatury, pilota lub poprzez Internet.

Takie rozwiązania są niezwykle korzystne w momencie gdy robot ma dotrzeć i zbadać miejsca trudno dostępne lub niebezpieczne dla człowieka. W tego typu sytuacjach operator steruje zdalnie robotem, który z kolei przesyła informacje zwrotne o otoczeniu i na ich podstawie operator decyduje o wykonaniu przez robota konkretnych działań [4].

Rozwiązania takich systemów mają rozmaite zastosowania: od kontroli medycznego robota OTOROB, wykorzystywanego przez ortopedów do zdalnego poruszania się i diagnozowania pacjentów w warunkach szpitalnych [5] aż do globalnych koncepcji jak w przypadku azjatyckiego projektu "Internet Based Crossover Robot Remote Control Competition for International Student Cooperation Training between UEC and α" [6].

Artykuł ten przedstawia badania efektywności zarządzania układami mobilnymi przez Internet oraz testowanie skuteczności algorytmu śledzenia robota sterowanego zdalnie [7]. Eksperymenty zostały przeprowadzone na zrealizowanym w tym celu systemie - serwis internetowy oferujący przeprowadzanie gry pomiędzy dwoma, zdalnie sterowanymi robotami. W celu wykonania powyższych założeń wykorzystany został statystyczny algorytm śledzenia punktu oparty o rozszerzony filtr Kalmana (ang. *Extended Kalman Filter EKF*) [8].

Na podstawie przeprowadzonych testów można dojść do wniosku, że koncepcja zdalnego zarządzania mobilnymi układami oferuje szerokie możliwości. Skuteczność algorytmu śledzenia dla zdalnie kontrolowanych robotów po wykonaniu algorytmu rozszerzonego filtra Kalmana jest bardzo duża przy niskich prędkościach robotów.

System badawczy opierał się na wykorzystaniu robotów przeznaczonych głównie do celów edukacyjnych LEGO Mindstorms NXT. Możliwością rozwoju systemu może być zastosowanie bardziej zaawansowanych technologii internetowych [9] jak również testowanie koncepcji na bardziej zaawansowanych robotach.

Streszczenie

Artykuł przedstawia badania efektywności zarządzania układami mobilnymi przez Internet oraz testowanie skuteczności algorytmu śledzenia robota sterowanego zdalnie. Eksperymenty zostały przeprowadzone na zrealizowanym do tego celu systemie - serwis internetowy oferujący przeprowadzanie gry pomiędzy dwoma, zdalnie sterowanymi robotami. Do wykonania powyższych założeń wykorzystany został statystyczny algorytm śledzenia punktu oparty o rozszerzony filtr Kalmana. Przeprowadzono szereg testów.

Słowa kluczowe: roboty mobilne, sterowanie przez Internet, śledzenie obiektów, roboty edukacyjne, rozszerzony filtr Kalmana.

A remote controlled system based on education robots

Abstract

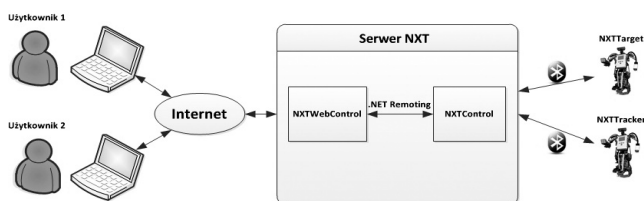
The paper presents an analysis of the effectiveness of mobile system management via the Internet [1] and testing of the effectiveness of the tracking algorithm robot controlled remotely [2, 3]. A object tracking algorithm based on the Extended Kalman Filter is implemented into a game for two robots (Fig. 1). The project proves the efficiency of the robot control and the EKF accuracy by observing and analyzing the work of the internet service, which allows two remote-controlled robots to take a part in the game [8]. Similar examples are in medicine [5] as well as international research and education [6]. All of them use advanced robotics technologies [4, 7, 9]. The robot used in the experiments is an educational robot Mindstorms NXT and in this paper we prove that it also gives many possibilities to achieve interesting results in robot remote-control and human-robot interaction (Fig. 2). In the case of tests for the reaction time of the robot on request, one can draw positive conclusions. In situations where no response is required from the server, the response time of the systems to commands from the remote computers is instant. The effectiveness of the tracking algorithm for the remote-controlled robot was tested by conducting a series of tests. They showed a proportional dependency between the velocity of the robots and the coordinate errors (Figs. 3 and 4). A possible direction of development of the system may be the use of more advanced Internet technologies, which could accelerate communication between a client and a server.

Keywords: mobile robots, remote Internet control, object tracking, educational robots, extended Kalman filter.

2. Architektura systemu

Schemat zrealizowanego systemu przedstawiony został na rys. 1. Głównym jego składnikiem jest serwer – *Serwer NXT*, który zawiera dwa moduły: *NXTControl* oraz *NXTWebControl*. Do serwera bezpośrednio podłączone zostały roboty *NXTTarget* oraz *NXTTracker*. Komunikacja robotów z komputerem odbywa się za pomocą technologii Bluetooth. Ponadto każdy robot wyposażony jest w dalmierz ultradźwiękowy a robot *NXTTracker* posiada również kamerę.

Moduł *NXTControl* odpowiada za bezpośrednią komunikację z robotami, która opiera się na wysyłaniu do nich poleceń oraz pobieraniu informacji pochodzących z sensorów. Realizuje on również proces śledzenia robota *NXTTarget* przez robota *NXTTracker*. Z kolei moduł *NXTWebControl* odpowiada za interakcję z użytkownikiem poprzez obsługę serwisu „*Lego NXT Game*”. Oba moduły komunikują się między sobą za pomocą technologii .NET Remoting.



Rys. 1. Architektura zrealizowanego systemu
Fig. 1. Implemented architecture

3. Realizacja procesu śledzenia za pomocą rozszerzonego filtru Kalmana

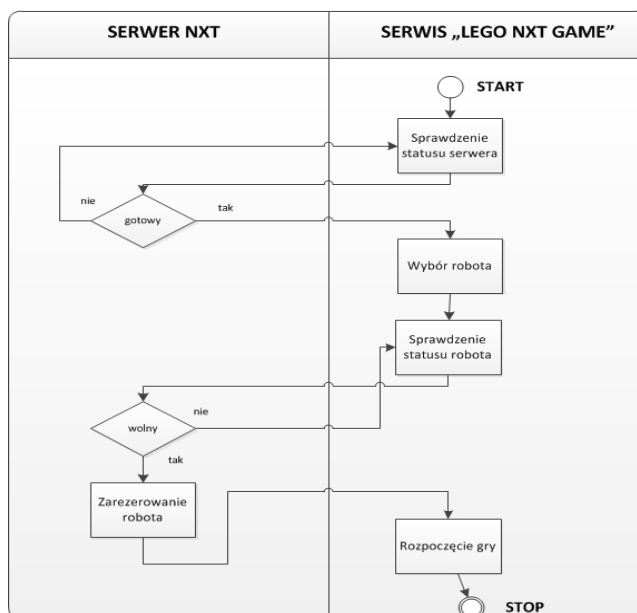
Realizacja śledzenia robota składa się z dwóch głównych etapów: detekcji obiektu oraz estymacji jego położenia za pomocą algorytmu rozszerzonego filtru Kalmana. Proces ten opiera się na danych pochodzących z kamery umieszczonej na robocie śledzącym (*NXT Tracker*). Źródło obrazu stanowi kamera telefonu komórkowego z zainstalowanym oprogramowaniem *SmartCam*.

Detekcja obiektu realizowana jest na podstawie jego koloru. Robot uciekający (*NXT Target*) wyposażony został w zielony znacznik, który pozwala na jego łatwe wykrycie na płaszczyźnie obrazu. Każda ramka poddawana jest filtrowaniu pod kątem obecności obiektów o wcześniej zdefiniowanym kolorze. Po przefiltrowaniu obrazu, odbywa się lokalizacja wszystkich obiektów spełniających określone wymagania. Wykryty obiekt reprezentowany jest za pomocą prostokąta, który kompletnie otacza jego kształty. Jego środkowy punkt jest przedmiotem przeprowadzenia algorytmu śledzenia.

Estymacja położenia obiektu opiera się na implementacji algorytmu rozszerzonego filtru Kalmana. Przebieg algorytmu śledzenia:

1. Wyznaczenie punktu środkowego obiektu o współrzędnych x i y : wykonuje się to po pomyślnym zakończeniu etapu detekcji.
2. Wyznaczenie odległości d oraz kąta θ względem punktu początkowego $O_{RG}(0,0)$.
3. Obliczenie stanu oraz wyjścia procesu (odpowiednie wektory).
4. Linearyzacja systemu (obliczenie macierzy Jakobiego).
5. Obliczenie prognozowanego stanu procesu oraz macierzy kowariancji błęd.
6. Obliczenie przyrostu Kalmana, aktualizacja stanu oraz macierzy kowariancji błęd.
7. Aktualizacja stanu oraz macierzy kowariancji błęd procesu - są one zapamiętywane i wykorzystywane w kolejnym obliczeniu.
8. Sterowanie ruchem robota *NXTTracker* odbywa się na podstawie parametrów stanu procesu, uzyskanych jako wynik działania algorytmu rozszerzonego filtru Kalmana. Jeżeli wartości charakteryzujące położenie robota *NXTTarget* nie przekraczają założonego progu tolerancji – robot śledzący porusza się po linii prostej. Natomiast w przypadku, gdy wartości przekraczają założony próg – robot śledzący wykonuje skręt w odpowiednią stronę.

Zaprezentowany na rys. 2 diagram przedstawia proces komunikacji pomiędzy *SerwerNXT*, a serwisem „*Lego NXT Game*”: po uruchomieniu strony ma miejsce sprawdzenie statusu serwera. W przypadku, gdy serwer jest gotowy użytkownik może dokonać wyboru robota. Następnie sprawdzany jest status robota. Jeżeli robot jest wolny, serwer rezerwuje go dla użytkownika, który może rozpocząć grę. W przypadku otrzymania odpowiedzi, że dany robot jest zajęty, użytkownik musi poczekać na jego zwolnienie. Natomiast otrzymanie odpowiedzi o zajętości serwera oznacza, że w danym momencie serwer nie jest gotowy na przeprowadzenie gry.



Rys. 2. Komunikacja pomiędzy serwisami
Fig. 2. Service communication

4. Testowanie systemu

Do przeprowadzenia testów użyte zostały dwa roboty z serii Lego Mindstorms NXT, każdy zaopatrzone w dalmierz ultradźwiękowy, a jeden posiada również kamerę. W momencie startu oba roboty były usytuowane jeden za drugim w odległości 25 cm od siebie. Jako kamera wykorzystany został telefon komórkowy *Nokia E71* z zainstalowanym oprogramowaniem *SmartCam*. Wszystkie komponenty systemu wykonane i przetestowane zostały przy pomocy środowiska Microsoft Visual Studio 2010 Professional. Moduł systemu *Serwer NXT* umieszczony został na komputerze Samsung RF711 z systemem operacyjnym Windows 7 Home Premium 64Bit, z wbudowanym serwerem IIS. System przetestowany został w lokalnej sieci komputerowej. Przeprowadzone testy odbyły się w pomieszczeniu o powierzchni 9 m² (3x3 m), śliskiej nawierzchni, przy naturalnym oświetleniu.

4.1. Efektywności zarządzania mobilnymi układami przez Internet

Badania czasu oczekiwania użytkownika na odpowiedź serwera *NXT* oraz czasu reakcji robota na żądanie użytkownika wykazały, że czas komunikacji na linii klient – serwer (średnio 23 sekundy) jest kilkadziesiąt razy większy w porównaniu z czasem komunikacji robot-serwer (średnio 700 milisekund). Czyli reakcja robota na polecenie użytkownika była rzędu kilkuset milisekund.

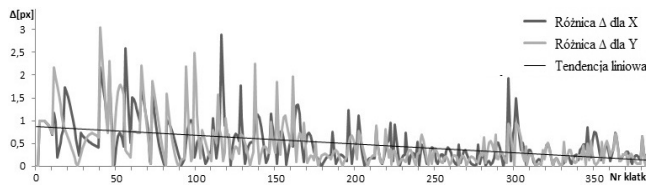
4.2. Skuteczności algorytmu śledzenia robota zdalnie sterowanego

Badania te pozwalają ocenić skuteczność implementacji rozszerzonego filtru Kalmana, który na wejściu ma strumień danych

pochodzących z kamery telefonu. Testowane zostało zachowanie statyczne i dynamiczne systemu. Założeniem w testach statycznych jest nieruchomość układu obserwowanego. Z kolei w badaniu dynamicznym, oba układy są w ruchu, co może spowodować pogorszenie wyników. Porównane zostaną współrzędne X i Y śledzonego układu, z współrzędnymi X_K i Y_K wyliczonymi przez EKF. Porównanie odbyło się dla różnych prędkości robotów (względne mocy silników). W eksperymentach biorą udział dwa roboty: R_1 oraz R_2 .

Statyczna obserwacja poruszającego się obiektu

R_1 jest sterowany zdalnie, R_2 wyposażony jest w kamerę, za pomocą której odbywa się proces śledzenia. Test przeprowadzony został dla ruchu po linii prostej oraz dla skręcającego o 90 stopni robota przy różnych względnych mocach silnika (dla R_1). W obu przypadkach otrzymane współrzędne pokazały dewiacje rzędu kilku procent. Powodem tego mogą być szum obrazu, zmiany oświetlenia oraz charakter nawierzchni. Wykresy przykładowego śledzenia przedstawiono na rys. 3.



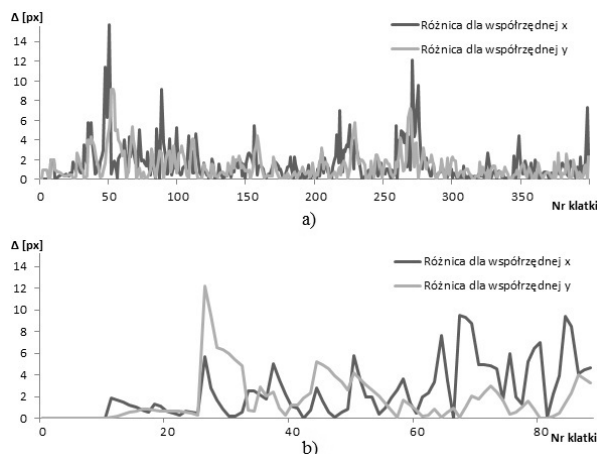
Rys. 3. Bezwzględne błędy estymacji współrzędnych obiektu
Fig. 3. Absolute errors of estimation of the object coordinates

Na podstawie wykresu można wywnioskować, że im mniejsza moc silników R_1 , tym mniejsze są różnice Δ dla obu współrzędnych. Ustalono, że dopuszczalna minimalna względna mocy silnika wynosi 10%. Dla wszystkich testów zaobserwowano, że wraz ze wzrostem przebytej odległości, błędy współrzędnych wyjściowych są coraz mniejsze, co pokazuje linia tendencji liniowej na rys. 3.

Dynamiczna obserwacja obiektu

W odróżnieniu do poprzedniego eksperymentu, R_2 sterowanym komputerem śledzi/podąża za R_1 (sterowany zdalnie przez użytkownika). Test przeprowadzony został dla różnych względnych mocy silników R_1 .

Wykresy na rys. 4 przedstawiają wyniki działania algorytmu EKF dla współrzędnych środkowego punktu przy dwóch różnych względnych mocach silników robotów.



Rys. 4. Wykresy błędów bezwzględnych estymacji współrzędnych obiektu przy względnej mocy silników robotów a) 10%; b) 50%

Fig. 4. Absolute errors of estimation of the object coordinates at the relative power of motors a) 10%; b) 50%

Na podstawie wykresów wyraźnie widać kilkakrotny wzrost różnic dla obu estymowanych wartości w porównaniu do badań statycznych. Zachowana została zależność między ich wielkością a prędkością poruszania się robotów.

5. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można dojść do wniosku, że przedstawiona koncepcja oferuje szerokie możliwości zdalnego zarządzania mobilnymi układami. Testy sprawdzające efektywność sterowania przez Internet wykazały powolną komunikację w relacji klient – serwer. Natomiast w przypadku testów badających czas reakcji robota na żądanie użytkownika otrzymano zadowalające wyniki: gdy nie wymagana jest odpowiedź serwera, czas reakcji układów na polecenia pochodzące z zdalnych komputerów jest kilkadziesiąt razy mniejszy niż czas komunikacji z serwerem.

Skuteczność algorytmu śledzenia zdalnie kontrolowanych robotów zbadana została poprzez przeprowadzenie szeregu testów. Wykazały one, że mniejsze błędy wartości współrzędnych uzyskano po wykonaniu algorytmu rozszerzonego filtra Kalmana dla mniejszych wartości względnej mocy silników robotów. W trakcie testów można było zaobserwować błędy spowodowane różnymi czynnikami zewnętrznymi. Zmiany oświetlenia, szum obrazu kamery zmniejszały skuteczność zastosowanego algorytmu detekcji. Rodzaj nawierzchni, po której poruszał się robot miał również wpływ na działanie wspomnianych metod.

Kierunkiem rozwoju systemu może być zastosowanie bardziej zaawansowanych technologii internetowych, które mogłyby przyspieszyć komunikację na linii klient-serwer. Można również wykorzystać inne algorytmy detekcji oraz śledzenia obiektu, które pozwoliłyby zwiększyć skuteczność procesu podążania za celem oraz zmniejszyć niekorzystny wpływ czynników zewnętrznych. Zrealizowany system opiera się na wykorzystaniu robotów przeznaczonych głównie do celów edukacyjnych. Ewentualnym kierunkiem rozwoju może być również wykorzystanie bardziej rozbudowanych zrobotyzowanych systemów.

6. Literatura

- [1] Sanfeliu A., Hagita N. and Saffiotti A.: Network robot systems, Robotics and Autonomous Systems. Elsevier, nr.56 (2008) p.793–797.
- [2] Atzori L., Iera A. and Morabito G.: The Internet of Things: A survey, Computer Networks. Elsevier, nr.54 (2010) p.2787–2805.
- [3] Chou Y.C., Ko D. and Cheng H. H.: An embeddable mobile agent platform supporting runtime code mobility, interaction and coordination of mobile agents and host systems, Information and Software Technology. Elsevier, nr.52 (2010) p.185–196.
- [4] Chen Y. and Hualiang Hu H.: Internet of intelligent things and robot as a service, Simulation Modelling Practice and Theory. Elsevier, nr.34 (2013) p.159–171.
- [5] Mariappan M., Ramu V., Ganesan T., Khoo B. and Vellian K.: A Remote Navigation Methodology for a Four Wheel Rectangular Configured Holonomic Mobile Telemedicine Robot, Inter. Proc. of Chemical, Biological and Environmental Engineering. Nr 11 (2010), p.60–64.
- [6] Xu C., Ming A., Kanamori C., Aoyama H., Li H., Xub L., Li X., Benjanarasuth T., Nundrakwang S., Purahong B. and Wongd C.C.: Internet based crossover robot remote control competition among Asian countries, Mechatronics. Elsevier, nr.23 (2013) p.933–941.
- [7] Gascueña J.M. and Fernández-Caballero A.: Agent-oriented modeling and development of a person-following mobile robot, Expert Systems with Applications, Elsevier, nr.38 (2011) p.4280–4290.
- [8] Dimitrova-Grekow T., Rogowski M.: Implementacja algorytmu śledzenia przy użyciu kamery oraz mobilnego robota edukacyjnego, Pomiary Automatyka Kontrola nr.8 (2013) s 818–821.
- [9] D’Orazio T. and Leo M.: A review of vision-based systems for soccer video analysis, Pattern Recognition. Elsevier, nr.43 (2010) p.2911–2926.