

Rozmyte generowanie bezkolizyjnej trajektorii MRK z zastosowaniem laserowego skanera przestrzeni

Fuzzy logic plotting of the collision free trajectory of the wheeled mobile robot using the scanning laser range finder

MARCIN SZUSTER*

Przedstawiono hierarchiczny układ sterowania ruchem mobilnego robota kołowego (MRK) Pioneer 2-DX w nieznanym środowisku. Układ ten składa się z: warstwy generowania trajektorii z zastosowaniem układów z logiką rozmytą oraz warstwy realizacji ruchu. W warstwie generowania trajektorii wykorzystano sterowanie behawioralne typu „omijaj przeszkody”. Do detekcji przeszkód posłużył skaner laserowy przestrzeni Hokuyo.

SŁOWA KLUCZOWE: aproksymacyjne programowanie dynamiczne, generator trajektorii, sieci neuronowe, sterowanie nadążne, układy z logiką rozmytą

The article presents hierarchical control system of a wheeled mobile robot in the unknown environment. The system consists of two layers: trajectory generating layer using fuzzy logic systems, and tracking control layer. Behavioral control concept arranged for the “avoid obstacles” instruction is employed in trajectory generator, but for detection of obstacles the Hokuyo scanning laser range finder is applied.

KEYWORDS: approximate dynamic programming, trajectory generator, neural networks, tracking control, fuzzy logic systems

W ostatnich latach obserwuje się duży wzrost zainteresowania zastosowaniem autonomicznych mobilnych robotów kołowych (MRK) w zadaniach transportowych, patrolowych czy usługowych. Nadal jednak istotnymi problemami robotyki mobilnej są: generowanie trajektorii ruchu w czasie rzeczywistym z uwzględnieniem warunków środowiska oraz jej realizacja.

W literaturze opisano wiele rozwiązań dotyczących realizacji zadania generowania trajektorii metodami, które można podzielić na globalne i lokalne. W metodach globalnych trajektoria jest generowana na podstawie znajomości mapy otoczenia, natomiast w metodach lokalnych zakłada się, że mapa otoczenia nie jest znana, a planowanie trajektorii odbywa się na podstawie sygnałów z układu sensorycznego robota [2, 5]. Przykładem metody lokalnej jest sterowanie behawioralne, inspirowane światem zwierząt, w którym można wyróżnić takie elementarne zachowania, jak „omijaj przeszkody” (ang. *obstacle avoiding*, OA) czy „podążaj do celu” (ang. *goal seeking*, GS).

W algorytmach sterowania robotów chętnie wykorzystuje się nowoczesne metody sztucznej inteligencji, np.: algorytmy z logiką rozmytą [2, 5], sztuczne sieci neuronowe (SN) czy algorytmy aproksymacyjnego programowania dynamicznego (APD) [3].

W artykule przedstawiono zastosowanie hierarchicznego układu sterowania ruchem MRK, umożliwiającego generowanie i realizację bezkolizyjnej trajektorii.

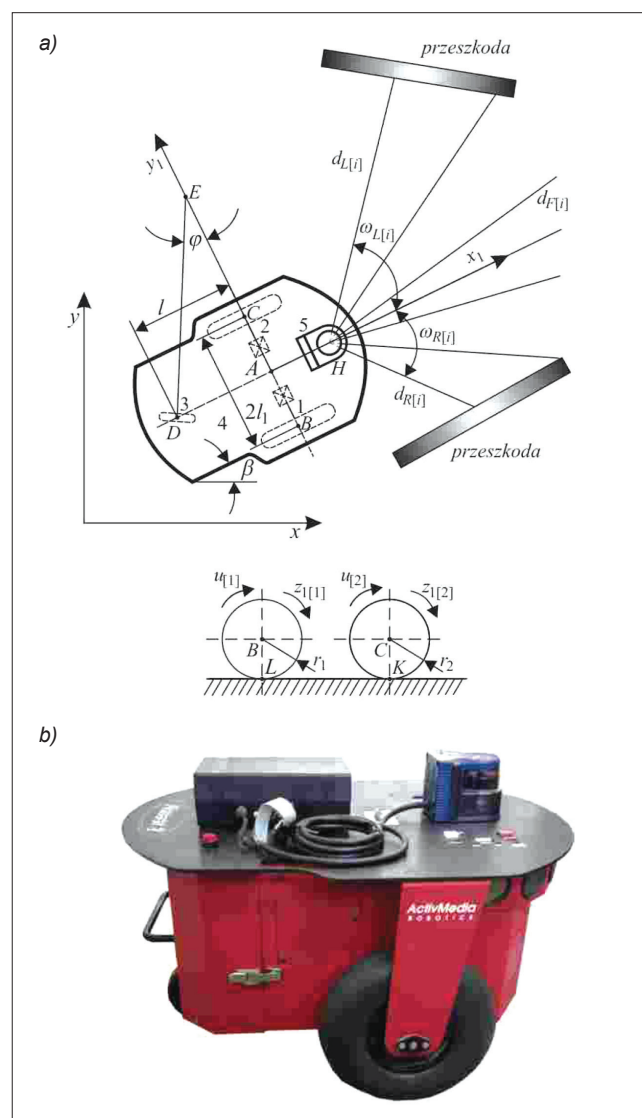
Mobilny robot kołowy

Obiektem sterowania jest MRK Pioneer 2-DX (rys. 1), poruszający się w płaszczyźnie xy .

Dynamiczne równania ruchu MRK wyprowadzono z zastosowaniem równań Maggiello [1] i zapisano w postaci:

$$M\ddot{\alpha} + C(\dot{\alpha})\dot{\alpha} + F(\dot{\alpha}) + \tau_d = u \quad (1)$$

gdzie: M – macierz bezwładności, $\dot{\alpha}$, $\ddot{\alpha}$ – wektory prędkości i przyspieszeń kątowych kół napędzających, $C(\dot{\alpha})\dot{\alpha}$ – wektor momentów pochodzących od sił odśrodkowych i Coriolisa, $F(\dot{\alpha})$ – wektor oporów ruchu, τ_d – wektor ograniczonych zakłóceń, u – wektor sygnałów sterowania.



Rys. 1. MRK będący przedmiotem badań: a) schemat MRK w nieznanym środowisku, b) wygląd MRK Pioneer 2-DX. **Najważniejsze elementy MRK:** 1 i 2 – koła napędzające, 3 – koło samonastawne, 4 – rama, 5 – skaner laserowy przestrzeni. **Oznaczenia:** l , l_1 – wymiary wynikające z geometrii MRK; $u_{[1]}$, $u_{[2]}$ – sygnały sterowania ruchem nadążnym; $z_{1[1]}$, $z_{1[2]}$ – dyskretne kąty obrotu kół napędzających, β – kąt obrotu ramy, $d_{L[i]}$, $d_{F[i]}$, $d_{R[i]}$ – odległości do przeszkód po lewej stronie ramy MRK, przed ramą oraz po jej prawej stronie; $\omega_{L[i]}$, $\omega_{F[i]}$, $\omega_{R[i]}$ – kąty odchylenia osi pomiarów od osi ramy MRK

* Dr inż. Marcin Szuster (mszuster@prz.edu.pl) – Politechnika Rzeszowska

Ze względu na fakt, że w warstwie realizacji ruchu układu sterowania wykorzystano dyskretne algorytmy, ciągle model dynamiki MRK zdyskretyzowano z zastosowaniem metody Eulera oraz nowego wektora stanu $z_{\{k\}} = [z_{1\{k\}}, z_{2\{k\}}]^T$, gdzie $z_{2\{k\}}$ odpowiada wektorowi \dot{x} . Otrzymano dyskretny opis dynamiki MRK:

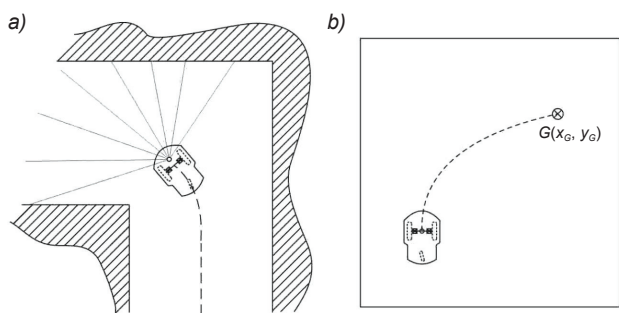
$$\begin{aligned} z_{1\{k+1\}} &= z_{1\{k\}} + z_{2\{k\}}h \\ z_{2\{k+1\}} &= z_{2\{k\}} - M^{-1}[C(z_{2\{k\}})z_{2\{k\}} + \\ &+ F(z_{2\{k\}}) + \tau_{d\{k\}} - u_{\{k\}}]h \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie: h – parametr dyskretyzacji czasu, k – indeks kroków iteracji.

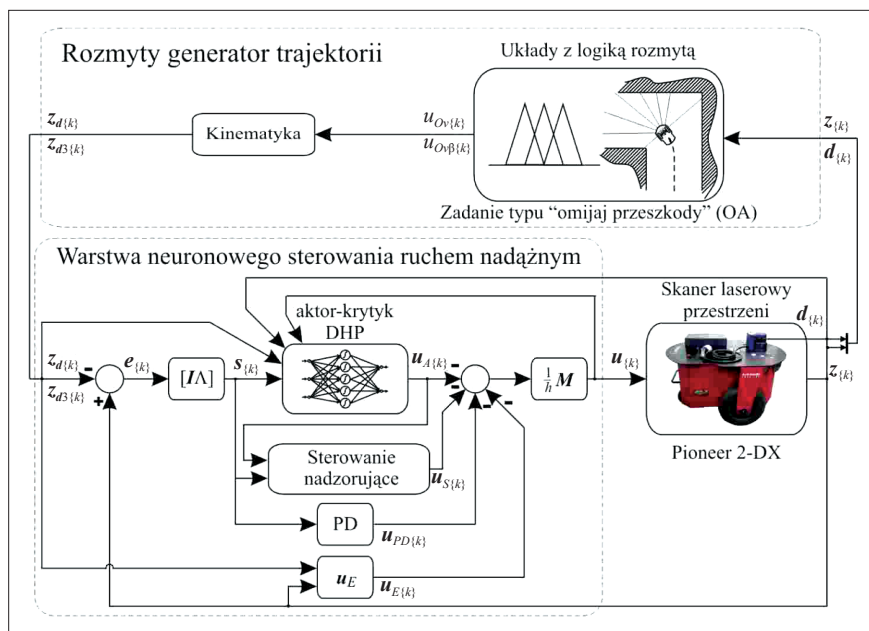
Hierarchiczny układ sterowania

Hierarchiczny układ sterowania ruchem MRK składa się z warstwy generowania trajektorii oraz warstwy realizacji ruchu. W warstwie generowania trajektorii zastosowano koncepcję sterowania behawioralnego w zadaniu typu OA (rys. 2a), w którym na podstawie sygnałów z układu sensorycznego generowana jest bezkolizyjna trajektoria, przy czym położenie końcowe nie jest sprecyzowane. W zadaniu typu GS (rys. 2b) generowana jest trajektoria od bieżącego położenia do celu, bez uwzględnienia położenia przeszkód.

Warstwa realizacji ruchu generuje sygnały sterowania układami napędowymi MRK, umożliwiające realizację trajektorii wygenerowanej przez warstwę wyższą układu sterowania. Schemat hierarchicznego układu sterowania przedstawiono na rys. 3.



Rys. 2. Schemat realizacji zadania typu: a) OA, b) GS



Rys. 3. Schemat hierarchicznego układu sterowania

■ **Rozmyty generator trajektorii.** Sterowanie behawioralne typu OA zrealizowano za pomocą dwóch układów z logiką rozmytą (ULR), w których wykorzystano model typu Takagi-Sugeno oraz trójkątne bądź trapezowe funkcje przynależności do zbiorów rozmytych przesłanek. Pierwszy układ ULR1 generuje sygnał sterowania zadaną prędkością MRK – $u_{Ov\{k\}}$ – na podstawie znormalizowanej odległości do przeszkód $d_{O\{k\}}^*$, natomiast drugi układ ULR2 generuje sygnał sterowania zadaną prędkością kątową obrotu ramy MRK – $\beta - u_{O\beta\{k\}}$ – na podstawie błędu:

$$e_{O\{k\}} = d_{R\{k\}}^* - d_{L\{k\}}^* \quad (3)$$

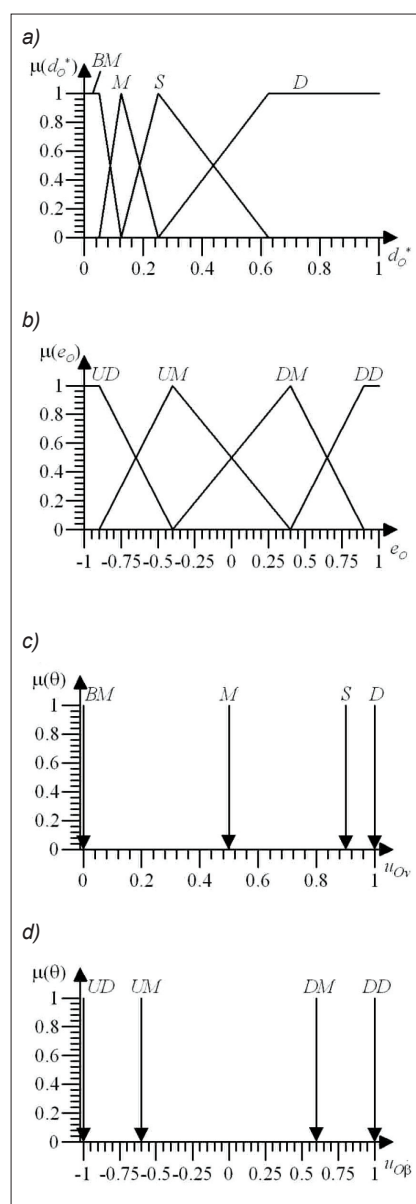
gdzie: $d_{R\{k\}}^*$, $d_{L\{k\}}^*$ – minimalne znormalizowane odległości do przeszkód po prawej i po lewej stronie MRK.

Sygnał sterowania $u_{O\beta\{k\}}$ jest generowany na podstawie bazy $m = 4$ reguł typu:

$$R_O^m: \text{JEŻELI } e_{O\{k\}} \text{ JEST } UM \text{ TO } u_{O\beta\{k\}} \text{ JEST } UM \quad (4)$$

gdzie zastosowano następujące etykiety lingwistyczne funkcji przynależności do zbiorów rozmytych, pokazanych na rys. 4: UD – ujemny duży, UM – ujemny mały, DM – dodatni mały, DD – dodatni duży, BM – bardzo mały, M – mały, S – średni, D – duży.

Rys. 4. Funkcje przynależności: a) przesłanek ULR1, b) konkluzji typu singleton, c) przesłanek ULR2, d) konkluzji



Sygnaly sterowania behawioralnego $u_{0v\{k\}}$ i $u_{0\dot{\beta}\{k\}}$ są przeliczane na wartości zadanych prędkości kątowych obrotu kół MRK, zgodnie z równaniem kinematyki:

$$\begin{bmatrix} z_{d2[1]\{k\}} \\ z_{d2[2]\{k\}} \end{bmatrix} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} v_A^* & l_1 \dot{\beta}^* \\ v_A^* & -l_1 \dot{\beta}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{0v\{k\}} \\ u_{0\dot{\beta}\{k\}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

gdzie: $r = r_{[1]} = r_{[2]}$, l_1 – wymiary wynikające z geometrii MRK (patrz rys. 1); v_A^* – maksymalna zadana prędkość punktu A; $\dot{\beta}^*$ – maksymalna zadana prędkość kątowa obrotu ramy.

■ **Warstwa sterowania ruchem nadeżnym.** W celu syntezy algorytmu sterowania ruchem nadeżnym zdefiniowano błędy nadeżania:

$$\begin{aligned} e_{1\{k\}} &= z_{1\{k\}} - z_{d1\{k\}} \\ e_{2\{k\}} &= z_{2\{k\}} - z_{d2\{k\}} \end{aligned} \quad (6)$$

gdzie $z_{d\{k\}} = [z_{d1\{k\}}, z_{d2\{k\}}]^T$ jest zadaną trajektorią.

Na podstawie (6) zdefiniowano uogólnione błędy nadeżania, minimalizowane przez algorytm realizacji ruchu:

$$s_{\{k\}} = e_{2\{k\}} + \Lambda e_{1\{k\}} \quad (7)$$

gdzie Λ oznacza diagonalną macierz projektową o stałych, dodatnich współczynnikach.

Układ sterowania ruchem nadeżnym MRK składa się z:

- algorytmu APD w konfiguracji dualnego heurystycznego programowania dynamicznego (DHP) [4], generującego sygnał sterowania $u_{A\{k\}}$,
- regulatora PD $u_{PD\{k\}}$,
- algorytmu sterowania nadzorującego $u_{S\{k\}}$,
- dodatkowego sygnału sterowania $u_{E\{k\}}$ o strukturze wynikającej z dyskretyzacji modelu MRK.

Całkowity sygnał sterowania wyrażono zależnością:

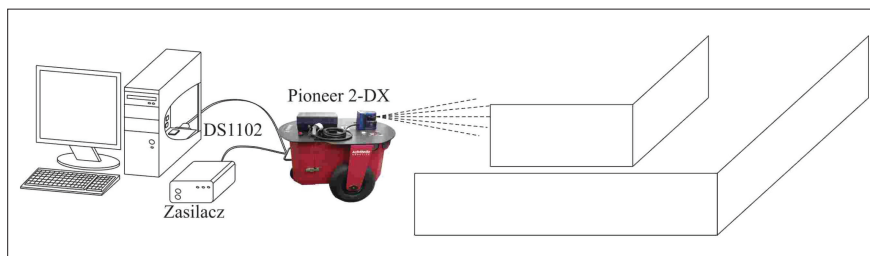
$$u_{\{k\}} = -\frac{1}{h} M [u_{A\{k\}} + u_{PD\{k\}} + u_{S\{k\}} + u_{E\{k\}}] \quad (8)$$

Sygnał sterowania nadzorującego wyprowadzono na podstawie teorii stabilności Lyapunova. Algorytm DHP składa się z dwóch struktur: **aktora** generującego suboptymalne prawo sterowania oraz **krytyka** oceniającego wygenerowane prawo sterowania i aproksymującego pochodną funkcji wartości [4]. Każda z tych struktur została zrealizowana w formie dwóch SN liniowych ze względu na wagi warstwy wyjściowej, o sigmoidalnych funkcjach aktywacji neuronów. Algorytm sterowania ruchem nadeżnym szczegółowo opisano w [3].

Stanowisko laboratoryjne

Stanowisko laboratoryjne, przedstawione schematycznie na rys. 5, składa się z:

- komputera PC z kartą kontrolno-pomiarową dSpace DS1102 oraz oprogramowaniem dSpace Control Desk i Matlab/Simulink,
- zasilacza,
- MRK Pioneer 2-DX.

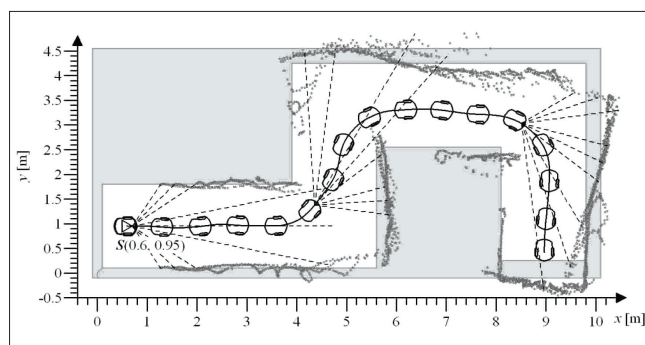


Rys. 5. Schemat stanowiska laboratoryjnego

System sensoryczny MRK został rozbudowany o skaner laserowy przestrzeni Hokuyo UBG-04LX-F01, który umożliwia detekcję przeszkód w odległości do 4 m. Zastosowany model skanera laserowego w każdym cyklu obrotu głowicy skanującej realizuje 682 pomiary odległości (z rozdzielczością 0,36°); kąt skanowania wynosi 240°. Pełny skan trwa 28 ms. Skaner laserowy komunikuje się z kartą dSpace poprzez interfejs RS-232.

Wyniki badań weryfikacyjnych

Badania weryfikacyjne algorytmu sterowania przeprowadzono na laboratoryjnym torze testowym, którego mapę przedstawiono na rys. 6. Szarymi kropkami zaznaczono położenie przeszkód wykrytych przez skaner laserowy. Tor ruchu punktu A ramy robota zaznaczono linią ciągłą, natomiast liniami przerywanymi zaznaczono osie wybranych pomiarów zrealizowanych w dyskretnych chwilach czasu ($t = 0$ s, $t = 14$ s, $t = 28$ s). Podczas eksperymentu algorytm sterowania był realizowany w czasie rzeczywistym ($h = 0,01$ s).



Rys. 6. Realizacja zadania typu OA

Na rys. 6 widać przesunięcie położenia przeszkód względem rzeczywistej mapy otoczenia. Położenie i orientację ramy MRK wyznaczano na podstawie sygnału z enkoderów inkrementalnych, a położenie przeszkód obliczano na podstawie położenia i orientacji ramy MRK oraz pomiarów odległości do przeszkód. Błędy występujące w poszczególnych torach pomiarowych powodują przesunięcie wyznaczonych lokalizacji przeszkód w stosunku do rzeczywistej mapy otoczenia. Jednakże pomimo występujących zakłóceń prezentowany układ sterowania poprawnie wygenerował i zrealizował bezkolizyjną trajektorię MRK.

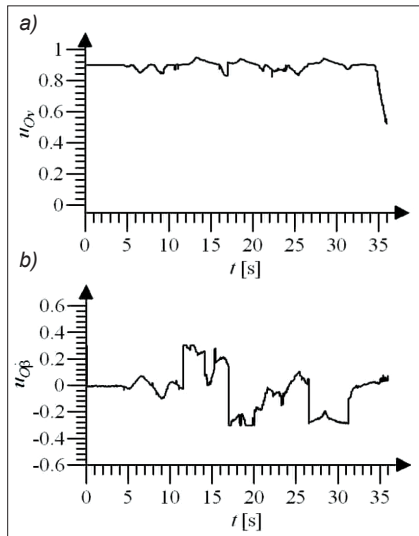
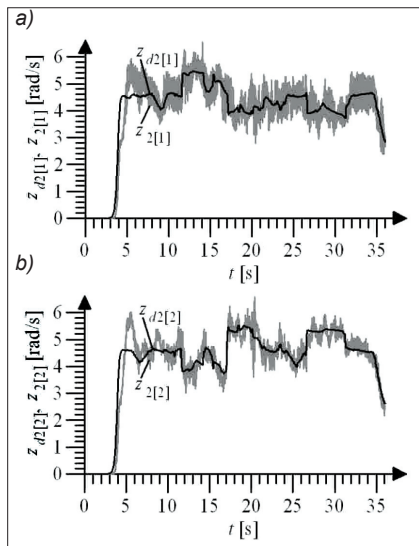
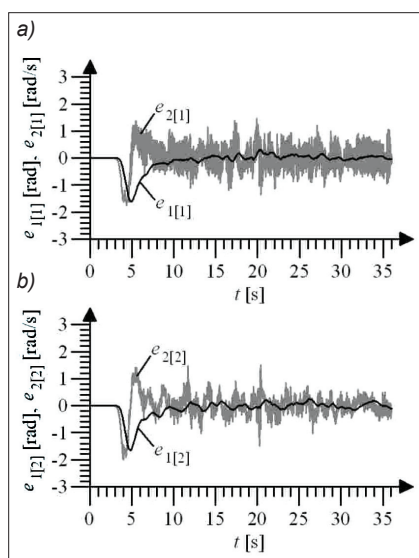
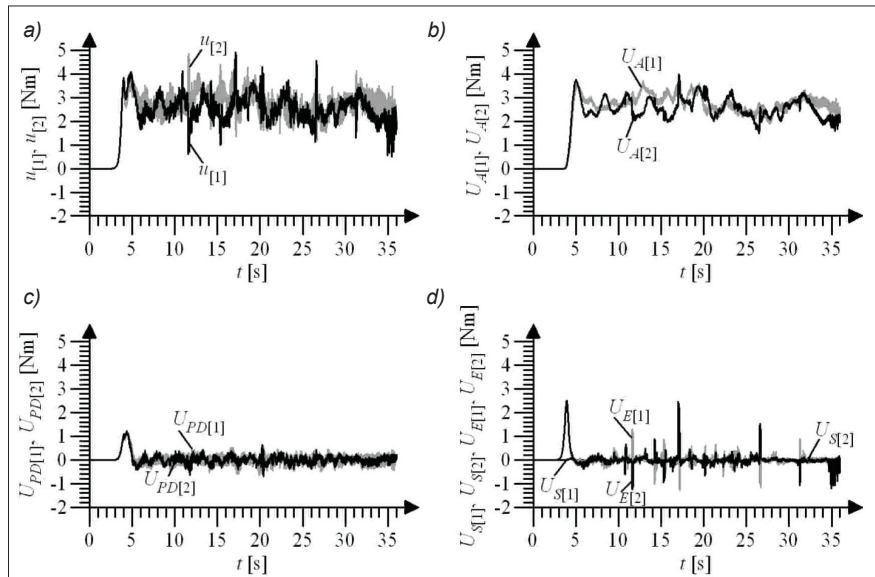
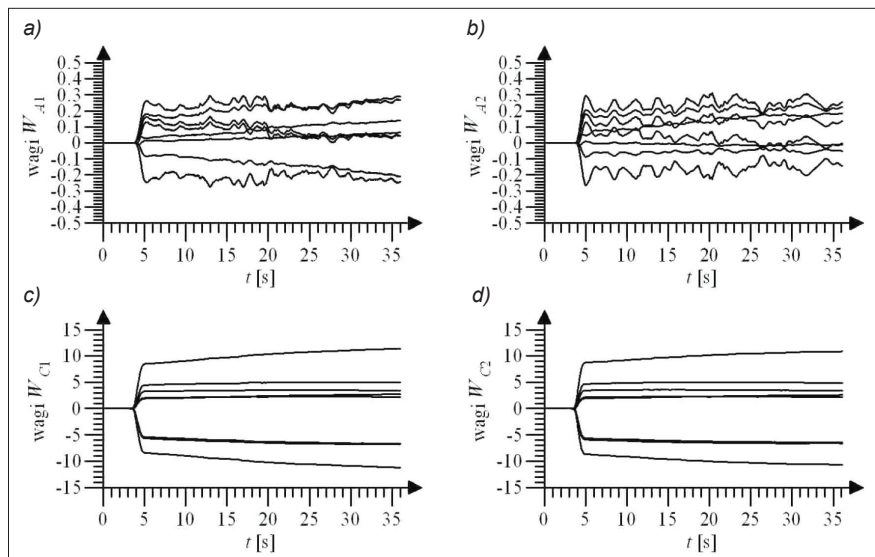
Sygnały sterowania warstwy generowania trajektorii u_{0v} i $u_{0\dot{\beta}}$ przedstawiono na rys. 7. W końcowej fazie ruchu MRK znajduje się w pobliżu przeszkód, a wartość sygnału sterowania maleje.

Na podstawie sygnałów sterowania u_{0v} i $u_{0\dot{\beta}}$ wygenerowano zadane prędkości kątowe kół $z_{d2[1]}$ i $z_{d2[2]}$ wraz ze zrealizowanymi prędkościami kątowymi (rys. 8).

Zadana trajektoria została zrealizowana z błędami nadeżania kół 1 i 2 (wg oznaczeń na rys. 1) przedstawionymi na rys. 9. Największe wartości tych błędów występują w początkowej fazie ruchu, co wynika z zastosowania zerowych wartości początkowych wag SN struktury DHP. Następnie wartości wag są odpowiednio adaptowane w celu zredukowania błędów nadeżania.

Przebiegi poszczególnych sygnałów sterowania warstwy realizacji ruchu przedstawiono na rys. 10. Można zauważyć dominujący udział sygnałów sterowania struktury DHP w sygnałach całkowitych.

Przebiegi wartości wag SN aktorów oraz krytyków przedstawiono na rys. 11. Jak już wspomniano, przyjęto zerowe wartości początkowe wag. W trakcie procesu adaptacji wartości wag pozostawały na ograniczonym poziomie.

Rys. 7. Sygnały sterowania: a) u_{Ov} , b) $u_{O\beta}$ Rys. 8. Wartości: a) prędkości zadanej $z_{d2[1]}$ i zrealizowanej $z_{2[1]}$ prędkości kątowej koła 1, b) prędkości zadanej $z_{d2[2]}$ i zrealizowanej $z_{2[2]}$ prędkości kątowej koła 2 (oznaczenia kół wg rys. 1)Rys. 9. Wartości błędów nadążania: a) koła 1 - $e_{1[1]}$, $e_{2[1]}$, b) koła 2 - $e_{1[2]}$, $e_{2[2]}$ (oznaczenia kół wg rys. 1)Rys. 10. Sygnały sterowania: a) $u_{1[1]}$, $u_{1[2]}$, b) SN aktora - $U_{A[1]}$, $U_{A[2]}$, $U_A = -1/h \times Mu_A$, c) regulatora PD - $U_{PD[1]}$, $U_{PD[2]}$, d) $U_{E[1]}$, $U_{E[2]}$ oraz sygnały sterowania nadzorującego - $U_{S[1]}$, $U_{S[2]}$ 

Rys. 11. Wartości wag SN: a) aktora 1, b) aktora 2, c) krytyka 1, d) krytyka 2

Podsumowanie

Zaprezentowano hierarchiczny układ sterowania ruchem MRK Pioneer 2-DX, składający się z dwóch warstw. Warstwa nadrzędna generuje bezkolizyjną trajektorię MRK na podstawie sygnałów z układu sensorycznego. W warstwie tej zastosowano algorytmy z logiką rozmytą do realizacji sterowania behawioralnego typu OA. Warstwa realizacji ruchu generuje sygnały sterowania silnikami, umożliwiające uzyskanie zadanych parametrów ruchu. W warstwie realizacji ruchu wykorzystano algorytmy ADP w konfiguracji DHP, w których zastosowano SN. Omówiony układ sterowania umożliwia generowanie i realizację bezkolizyjnych trajektorii ruchu MRK w nieznanym środowisku ze statycznymi przeszkodami.

LITERATURA

- Giergiel J., Żylski W. "Description of motion of a mobile robot by Maggie's equations". *Journal of Theoretical and Applied Mechanics* 43 (2005)3: pp. 511+521.
- Hendzel Z. "Fuzzy Reactive Control of Wheeled Mobile Robot". *Journal of Theoretical and Applied Mechanics* 42 (2004)3: pp. 503+517.
- Hendzel Z., Szuster M. "Discrete model-based adaptive critic designs in wheeled mobile robot control". *Lecture Notes in Artificial Intelligence* 6114 (2010): pp. 264+271.
- Powell W. "Approximate Dynamic Programming: Solving the Curses of Dimensionality". New Jersey, USA: Wiley, 2007.
- Szuster M., Hendzel Z., Burghardt A. "Fuzzy Sensor-Based Navigation with Neural Tracking Control of the Wheeled Mobile Robot". *Lecture Notes in Artificial Intelligence* 8468 (2014): pp. 302+313. ■