

Krzysztof SKRZYPCZYK
Politechnika Śląska

ADAPTACYJNE STEROWANIE RUCHEM SEMIAUTONOMICZNEGO WÓZKA INWALIDZKIEGO W OBECNOŚCI PIESZYCH

Streszczenie. W pracy przedstawiono problem syntezy prawa sterowania modułu wspomaganego nawigacji semiautonomicznego wózka inwalidzkiego w dynamicznym środowisku, w obecności pieszych. Osoba poruszająca się na wózku inwalidzkim może spotkać się ze zjawiskiem empatii ze strony osób, z którymi wchodzi w interakcje. W pracy pokazano wykorzystanie tego zjawiska do adaptacji stylu automatycznego sterowania ruchem wózka. Działanie proponowanego podejścia zweryfikowano za pomocą symulacji.

ADAPTIVE CONTROL OF A SMART WHEELCHAIR WITHIN POPULATED ENVIRONMENTS

Summary. This paper addresses the problem of synthesis of the control law for a smart wheelchair navigation assistant, intended to support the navigation in dynamic and populated areas. While concerning the wheelchair navigation and its environmental interactions, an issue arises which is related to the pedestrians' empathy towards a disabled person being carried by the wheelchair. In this work we propose to use this phenomena for designing adaptive, driving strategy of the intelligent wheelchair. The method performance was evaluated in a simulated environment.

1. Wprowadzenie

Współczesne technologie wywodzące się z dziedziny robotyki zapewniają wiele rozwiązań ułatwiających ludziom z niepełnosprawnościami samodzielne poruszanie się. Różne modele elektrycznie napędzanych i sterowanych wózków inwalidzkich są obecnie w powszechnym użyciu i wciąż trwają prace nad ich rozwojem [6]. Niestety okazuje się, że w przypadku ludzi z poważnymi niepełnosprawnościami, podobnie jak w przypadku ludzi starszych z zaburzonymi zdolnościami poznawczymi, takie udogodnienia okazują się niewystarczające. W sytuacji, gdy wózek porusza się w zatłoczonych przestrzeniach, nawet z pozoru proste zadanie, jak utrzymywanie prostoliniowego toru ruchu, stanowi problem dla osoby kierującej wózkiem. Dlatego wyposażenie wózków w dodatkowe, inteligentne rozwiązania stało się tak istotne i jest tematem wielu projektów badawczych [2][3][4]. Projektowanie i implementacja systemów automatycznego sterowania ruchem wózków inwalidzkich stanowi niemałe

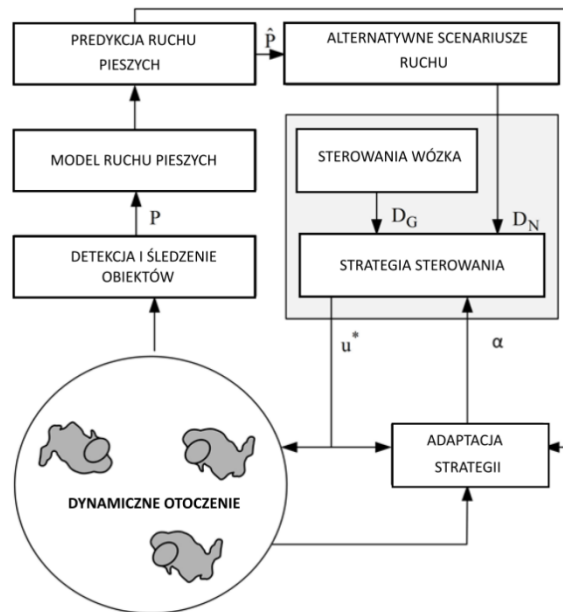
wyzwanie ze względu na dynamikę środowiska, w którym takie urządzenie funkcjonuje oraz na dodatkowe wymagania nakładane na charakter ruchu takiego urządzenia. Chodzi tu głównie o dwa aspekty: Społeczną akceptowalność charakteru ruchu generowanego przez układ sterowania wózkiem oraz komfort tego ruchu oceniany z perspektywy pasażera wózka. Dlatego zapewnienie sterowania ruchem wózka spełniającego powyższe wymagania, stanowi przedmiot wielu badań [2][4]. Analizując dokładniej proces zautomatyzowanej nawigacji wózka inwalidzkiego w obecności pieszych, można dostrzec pewne zjawisko, które w sprzyjających okolicznościach może być wykorzystane do poprawy jakości sterowania wózka. Otóż wśród ludzi wchodzących w bezpośrednią interakcję z osobą jadącą wózkiem inwalidzkim może pojawić się uczucie empatii. To z kolei może prowadzić do takiego zachowania uczestników ruchu, które ułatwi przejazd wózkiem przez współdzielony obszar (np. zwolnienie, ustąpienie miejsca itd.). W niniejszej pracy zaproponowano wykorzystanie tego zjawiska do adaptacji charakteru ruchu generowanego przez układ sterowania wózka. Na podstawie długoterminowej predykcji ruchu pieszych, w otoczeniu wózka wyznaczany jest poziom zaufania systemu do kolaboracyjnego zachowania uczestników procesu nawigacji. Realizowane to jest przez porównanie predykowanego zachowania (ruchu) pieszych z rzeczywistym, zarejestrowanym przez system w trakcie realizacji zaplanowanego przejazdu. Strategia nawigacji wyznaczana jest, jako rozwiązanie Hurwicza modelu gry przeciwko naturze [5], w którym współczynnik optymizmu powiązany został ze wspomnianym wcześniej współczynnikiem zaufania. Działanie systemu zostało zweryfikowane na drodze symulacyjnej.

2. Koncepcja systemu

Przedstawiona w tym rozdziale metodologia adaptacyjnego sterowania ruchem wózka w dynamicznym środowisku związana jest ze strukturą systemową przedstawioną na rysunku 1. Funkcjonowanie omawianego systemu sterowania można opisać w sposób następujący:

Podsystem sensoryczny dostarcza informacji o stanie otoczenia. Zakłada się, że informacja ta jest na tyle wartościowa, że umożliwia wykrycie i śledzenie pieszych oraz innych obiektów w sąsiedztwie wózka. Na podstawie tych danych tworzony jest model ruchu śledzonych obiektów a następnie na bazie tego modelu system dokonuje predykcji ich ruchu w określonym horyzoncie czasu. Predykcje te z kolei stanowią podstawę do wyznaczenia strategii sterowania – prędkości i kierunku jazdy wózka utrzymywanych przez okres równy horyzontowi predykcji. Zakłada się, że predykowany ruch pieszych może różnić się, nawet znacznie, od rzeczywistości. Aby uwzględnić tę możliwość w planowanej strategii, brane są pod uwagę różne, alternatywne stany otoczenia, które stanowią dane wejściowe modułu decyzyjnego. Rolą tego modułu jest ocena jakości zastosowanych sterowań zastosowanych w ramach rozważanych scenariuszy zmian otoczenia. Na podstawie tej oceny wyznaczana jest najlepsza strategia sterowania (w sensie zastosowanego kryterium Hurwicza). W trakcie realizacji tej strategii porównywana jest ze stanem faktycznym procesu i na tej podstawie modyfikowany jest współczynnik ufności, co skutkuje zmianą charakteru strategii ruchu wózka w przyszłości. Metoda adaptacji

przedstawiona zostanie bardziej szczegółowo w następnych rozdziałach opracowania.



Rys. 1. Koncepcja działania adaptacyjnego systemu wsparcia nawigacji semiautonomicznego wózka inwalidzkiego

3. Sformułowanie problemu

Na początku zdefiniujemy konfigurację pojazdu w dyskretnej chwili czasu n , jako wektor:

$$R(n) = [x_{R,n}, y_{R,n}, \theta_{R,n}]^T, \quad (1)$$

gdzie pierwszy i drugi element oznaczają położenie zdefiniowane w zewnętrznym układzie współrzędnych skojarzonym z przestrzenią, w której pojazd porusza się, natomiast trzeci element wektora to orientacja pojazdu. Zakładamy, iż pojazd wyposażony jest w układ sensoryczny umożliwiający detekcję oraz śledzenie N obiektów znajdujących się w jego zasięgu. Ponadto system wyposażony jest w bufor umożliwiający przechowywanie M przeszłych pomiarów położenia śledzonych obiektów opisanych zbiorem:

$$P_i = \{p_{i,k}\}, i = 1, 2, \dots, N, k = \langle n - M, n \rangle, \quad (2)$$

gdzie: $p_{i,k} = [x_{i,k}, y_{i,k}]^T$ jest wektorem zawierającym koordynaty położenia i -tego obiektu zarejestrowanego w k -tej chwili czasu. Bieżąca chwila czasu oznaczona jest indeksem n . Na podstawie danych (1) w systemie wyznaczana jest predykcja przyszłego

położenia obiektów, w chwili h w określonym horyzoncie czasu H , na podstawie zastosowanego m -tego modelu predykcji:

$$\hat{p}_{i,h}^m = \bar{p}_i^m(h), h = n+1, \dots, n+H \quad (3)$$

Metody wyznaczania modelu predykcji ruchu ruchomego obiektu zaprezentowane zostały w pracy [7].

4. Zadanie nawigacyjne

Założmy, iż celem syntezywanego układu sterowania jest utrzymywanie kierunku i prędkości ruchu pojazdu, wybranych przez operatora. Zdefiniujmy zatem ścieżkę, po której ma podążać pojazd, jako parę:

$$\Upsilon_0(n) = (l(n), \Delta w) , \quad (4)$$

gdzie: $l(n)$ oznacza półprostą wychodzącą z punktu zdefiniowanego przez położenie środka geometrycznego pojazdu pod kątem $\theta_R^*(n)$. Wartość Δw oznacza dopuszczalną odległość, na jaką pojazd może oddalić się od zadanej ścieżki. Elementarne zadanie nawigacyjne sformułowane zostanie, zatem w sposób następujący: W danej chwili czasu n , na podstawie predykcji otoczenia (3) wyznaczyć sterowanie:

$$u_R^*(n) = [\theta_R(n), v_R(n)]^T , \quad (5)$$

gdzie: elementy wektora (5) oznaczają kierunek i prędkość pojazdu. Sterowanie to, zastosowane w następujących po sobie $H-1$ chwilach czasu, ma zapewniać minimalne ryzyko kolizji oraz jak najdokładniejsze śledzenie ścieżki (4). Bardziej złożone zadania nawigacyjne mogą być rozpatrywane jako sekwencja elementarnych zadań nawigacyjnych. Ze względu na wymagania narzucone na społecznie akceptowalny styl ruchu wózka (dyskutowany we wprowadzeniu tego artykułu), dopuszczalne sterowania generowane przez system nawigacji również muszą spełniać dodatkowe ograniczenia:

$$|u_R^*(n) - u_R^*(n-1)| < u_{RT}, \quad (6)$$

gdzie wartość progowa u_{RT} oznacza maksymalną, dopuszczalną zmianę użytego sterowania w odniesieniu do wartości użytej poprzednio.

5. Uwzględnienie niepewności zachowania pieszych

Strategia sterowania ruchem wózka bazuje w dużej mierze na predykcji stanu otoczenia. Każda predykcja jest obciążona niepewnością i dlatego fakt ten powinien zostać uwzględniony w trakcie planowania ruchu wózka [1]. Niepewność ta może mieć różne źródła. Jednym z nich jest nieprzewidywalność zachowania pieszych. W trakcie kierowania wózkiem wśród ludzi dość powszechna jest sytuacja, w której jedna bądź

wiele osób zmienia gwałtownie sposób poruszania się (kierunek, prędkość) lub nagle zatrzymuje się. Rozpatrując to zjawisko z punktu widzenia osoby poruszającej się na wózku a także z perspektywy systemu sterowania wózkiem, zachowania pieszych można podzielić na trzy kategorie:

- zachowania zgodne z przewidywaniami (oznaczane dalej jako O)
- zachowania kooperacyjne (C)
- zachowania niekooperacyjne (N)

Pierwsza z wymienionych kategorii obejmuje sytuacje, w których obserwowani uczestnicy ruchu poruszają się w trakcie okresu predykcji zgodnie z oczekiwaniami systemu planowania. Do drugiej grupy zaliczamy zachowania niezgodne z oczekiwaniami, jednakże takie, które wynikają z chęci kooperacji powodowanej empatią skierowaną do osoby prowadzącej wózek. Objawia się to ustępowaniem drogi, zwalnianiem tempa marszu itd. Trzecia kategoria to również niespodziewane zachowania pieszych, lecz takie które utrudniają lub nawet zagrażają bezpieczeństwu osoby transportowanej na wózku. W niniejszym opracowaniu zaproponowano ujęcie niepewności związanej z wyżej przytoczonymi zjawiskami w ramach strategicznej gry przeciwko naturze.

Rozważmy problem wykonania manewru sterującego ruchem wózka w chwili n , przez układ wspomaganą nawigacji, przy założeniu niepewności związanej z określonym stanem otoczenia jako dwuosobową grę w postaci normalnej:

$$G(n) = (A, C) \quad (7)$$

gdzie: $A(n) = D_G(n) \times D_N(n)$ jest przestrzenią decyzyjną gry, natomiast C definiuje koszty związane z podjęciem określonej decyzji. Przestrzeń decyzyjna gry określa wszystkie kombinacje akcji systemu sterowania D_G oraz zbioru D_N definiującego możliwe do zaistnienia stany natury [10]. Niepewność związana zachowaniem pieszych reprezentowana jest właśnie przez stany procesu D_N . Z kolei każdy z wyróżnionych w nim stanów odpowiada jednemu z hipotetycznych scenariuszy zachowania pieszych. Szczegółowy proces modelowania procesu sterowania w postaci gry (7) przedstawiono w pracy [8].

6. Adaptacyjna strategia sterowania

Sterowanie wózkiem polega na przyjęciu w chwili n -tej strategii należącej do zbioru, $D_G(n)$ wynikającej z rozwiązania problemu (7) zgodnie z przyjętym kryterium. Do rozwiązania problemu zastosowano kryterium Hurwicza zdefiniowane jako problem minimalizacji:

$$i_0 = \min_{u_{R,k}} \left[\alpha \min_m C(u_{R,k}, m) + (1 - \alpha) \max_m C(u_{R,k}, m) \right] \quad (8)$$

Zastosowanie strategii wynikającej z rozwiązania problemu przez $H-I$ następujących po sobie okresów próbkowania, powinno prowadzić do realizacji celu nawigacyjnego przy minimalnym ryzyku kolizji, z uwzględnieniem niepewności predykcji (3).

Współczynnik $\alpha \in [0,1]$ jest miarą optymizmu decydenta. Koncepcja adaptacji sposobu sterowania polega na zmianie wartości tego współczynnika na podstawie oceny interakcji zachodzącej pomiędzy uczestnikami ruchu a systemem sterowania. Po zakończeniu realizacji części zadania nawigacyjnego w horyzoncie H , następuje ocena charakteru zachowania pieszych na podstawie zebranych danych sensorycznych. Zachowania te są klasyfikowane do jednej z trzech kategorii opisanych w sekcji 4. Na bazie tej klasyfikacji modyfikowany jest współczynnik α , wpływający na wybór strategii sterowania. Jego bieżąca wartość ustalana jest zgodnie z zależnością:

$$\alpha_n = \begin{cases} 1 - (1 - \alpha_{n-1})e^{-\gamma_C} & \text{w przypadku zachowania typu } C \\ \alpha_{n-1}e^{-\gamma_N} & \text{w przypadku zachowania typu } N \\ \alpha_{n-1} & \text{w przypadku zachowania typu } O \end{cases}$$

Każde pozytywne doświadczenie zwiększa współczynnik optymizmu. Jednocześnie doświadczenie negatywne zmniejsza go bardziej niż w przypadku doświadczenia pozytywnego, stąd $\gamma_N > \gamma_C$.

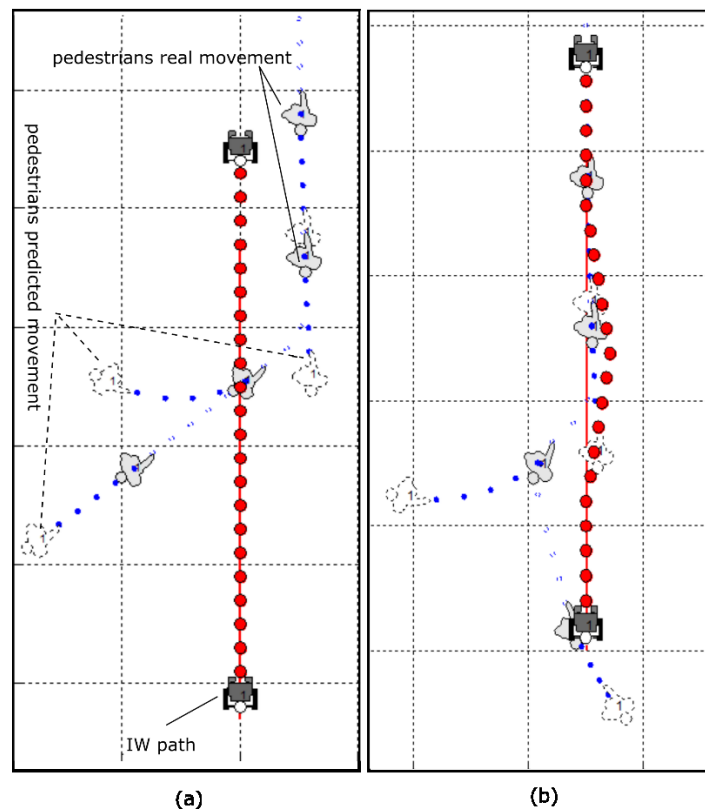
7. Wyniki symulacyjne

W celu wstępnej oceny działania przedstawionej metody adaptacji, przeprowadzono serię eksperymentów symulujących pracę systemu w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Opisane eksperymenty zaimplementowano i zasymulowano w środowisku MATLAB. W celu umożliwienia analizy właściwości metody, scenariusze interakcji wózek-przechodnie, ograniczono do sytuacji jeden na jeden.

Pierwszy z eksperymentów (rys. 2) zaaranżowany został w ten sposób, by pokazać dwa pierwsze z omawianych typów interakcji: kooperacyjną i niekooperacyjną. Wózek porusza się równoległe do toru ruchu pieszego (rys. 2a), w dostatecznie dużej odległości od niego. Stąd na podstawie predykcji ruchu pieszego, system planuje prostoliniową trajektorię ruchu. Jednakże po pewnym czasie pieszy dokonuje gwałtownej zmiany kierunku, przecinając tor ruchu wózka i prowadząc do zwiększenia ryzyka kolizji. Taka interakcja sklasyfikowana została przez system jako niekooperacyjna.

Z kolei rysunek 2b przedstawia sytuację w której pożądaný tor ruchu wózka wchodzi w kolizję z przewidywaną ścieżką ruchu pieszego. W tej sytuacji system planuje ścieżkę zwiększającą bezpieczeństwo przejazdu. W trakcie jej realizacji, zbliżając się do wózka, pieszy ustępuje drogi wózkowi zmieniając swój kierunek ruchu. Taka interakcja zostaje sklasyfikowana przez system jako kooperacyjna.

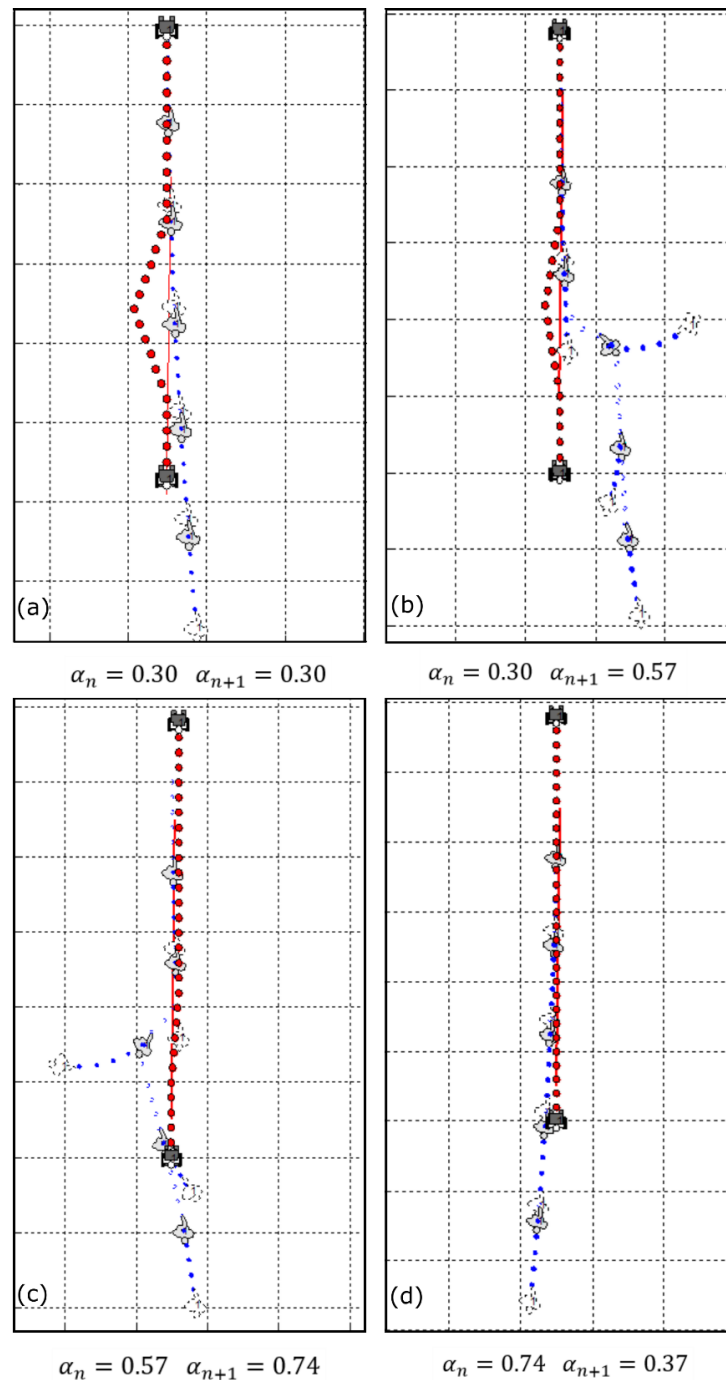
Kolejny eksperyment zaaranżowany został w ten sposób by pokazać zmiany wartości współczynnika optymizmu na przestrzeni czasu, jako doświadczenia przez system różnorodnego zachowania przechodniów. Nawigacja wózka rozpoczyna się z wartością współczynnika $\alpha_n=0.3$ charakteryzujący ostrożny sposób nawigacji (rys.3a).



Rys. 2. Eksperyment przedstawiający interakcje wózek-przechodzień o charakterze (a) niekooperacyjnym i (b) kooperacyjnym

Przechodzień porusza się zgodnie z predykcją, stąd jego zachowanie sklasyfikowane zostaje jako neutralne, co nie skutkuje zmianą wartości współczynnika optymizmu. W trakcie kolejnej konfrontacji wózek-przechodzień ma miejsce zmiana ścieżki ruchu przechodnia zwiększająca komfort nawigacji wózka (rys. 3b), stąd klasyfikacja tej sytuacji jako kooperacyjnej i zwiększenie współczynnika optymizmu do wartości $\alpha_n=0.57$. Większa wartość α_n sprawia, w kolejnej konfrontacji, że system planuje sterowanie niewiele zmieniające tor ruchu wózka. W trakcie realizacji zaplanowanej ścieżki, dochodzi do kolejnego kooperacyjnego zachowania przechodnia, ustępującego drogi wózkowi (rys. 3c), co skutkuje dalszym wzrostem współczynnika do wartości $\alpha_n=0.74$.

W ostatniej części eksperymentu (rys. 3d), na bazie zebranych doświadczeń, system nie planuje ominięcia przechodnia „licząc” na jego kooperacyjne zachowanie. W trakcie przejazdu okazuje się jednak, że przechodzień nie zmienia swojej ścieżki ruchu, co prowadzi do zwiększenia ryzyka kolizji. System klasyfikuje tę sytuację, jako niekooperacyjną i znacząco redukuje współczynnik optymizmu do wartości $\alpha_n = 0.37$.



Rys. 3. Eksperyment pokazujący dynamikę zmiany współczynnika optyimizmu

8. Podsumowanie

W pracy przedstawiono koncepcję adaptacyjnej metody wspomagania nawigacji semiautonomicznego wózka inwalidzkiego, w obecności przechodniów. Metoda wykorzystuje długoterminową predykcję ruchu pieszych do zaplanowania bezpiecznej i społecznie akceptowalnej trajektorii ruchu wózka. Sformułowanie problemu sterowania jako gry przeciwko naturze, pozwala na uwzględnienie do pewnego stopnia niepewności modelu predykcji i w ten sposób poprawia bezpieczeństwo zaplanowanej ścieżki przejazdu. W pracy przedstawiono również koncepcję adaptacji sterowania,

wynikającego z rozwiązania gry przeciwko naturze z użyciem kryterium Hurwicza. Współczynnik optymizmu, będący parametrem występującym w tym kryterium zmieniany jest na podstawie oceny interakcji pomiędzy wózkiem a przechodniami. Otrzymane wyniki mają charakter wstępny, aczkolwiek są obiecujące. Dlatego trwają dalsze prace nad rozwojem opisanego konceptu. Niniejsze opracowanie sporządzone zostało na podstawie opublikowanego wcześniej artykułu, stąd więcej szczegółów czytelnik znajdzie w pracy [8].

Praca finansowana z grantu Politechniki Śląskiej - subwencja na utrzymanie i rozwój potencjału badawczego 2022.

LITERATURA

1. Dutt, L.S.; Kurian, M.: Handling of Uncertainty – A Survey. International Journal of Scientific and Research Publications, Volume 3, Issue 1, January 2013 1 ISSN 2250-3153.
2. Feil-Seifer D., Mataric M.: People-Aware Navigation for Goal-Oriented Behavior Involving a Human Partner, Development and Learning (ICDL), 2011 IEEE International Conference on (Volume:2), 24-27 Aug. 2011, Germany.
3. Gao C., Sands M., and Spletzer J.R.: Towards Autonomous Wheelchair Systems in Urban Environments. In Proc. Of International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI), Hamburg, 2012, pp. 77-82.
4. Guzzi J., Giusti A., Gambardella L., Theraulaz G., Caro G.: Human-friendly Robot Navigation in Dynamic Environments. Proc. Of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Karlsruhe, Germany, May 2013, pp. 423-430.
5. Milnor, J., Games against nature, in: Thrall, R., Coombs, C., and Davis, R. (eds.), Decision Processes, Wiley, New York, 1954, pp. 49-59.
6. Simpson R. C.: Smart wheelchairs: A literature review. Journal of Rehabilitation Research and Development, 42:2005, pp. 423-436.
7. Skrzypczyk K.: Objects movement prediction for smart electric wheelchair human aware navigation, Proc. of 13th Annual Industrial Simulation Conference, June 1-3, 2015, UPV, Valencia, Spain, pp. 113- 117.
8. Skrzypczyk K.: Game against nature based control of an intelligent wheelchair with adaptation to pedestrians' behaviour, Proc. of 25th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR) Location: Międzyzdroje, POLAND, Aug 23-26, 2021, pp. 285-290.