

Predykcyjny system wspomagania nawigacji wózka inwalidzkiego w obecności pieszych z adaptacją bazującą na zjawisku empatii

Streszczenie. W pracy przedstawiono problem syntezy prawa sterowania modułu wspomagania 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 interakcję. W pracy pokazano wykorzystanie tego zjawiska do adaptacji stylu automatycznego sterowania ruchem wózka. Działanie proponowanego podejścia zweryfikowano za pomocą symulacji.

Abstract. The paper presents the problem of designing a navigation strategy for a semiautonomous wheelchair cruise control system, intended to help driving the wheelchair in populated, dynamical environments. The method discussed in this paper utilizes long-term, model-based environmental prediction for planning the motion of the wheelchair. Resulting navigation strategy is both human aware and acceptable for the person driving the vehicle. The adaptation mechanism was implemented and verified using simulation. (**Predictive cruise control of a smart wheelchair among pedestrians with adaptation based on empathy phenomenon**)

Słowa kluczowe: sterowanie predykcyjne, uwzględnienie niepewności, sterowanie adaptacyjne, gry przeciwko naturze
Keywords: predictive control, uncertainty handling, adaptive control, games against nature

Wprowadzenie

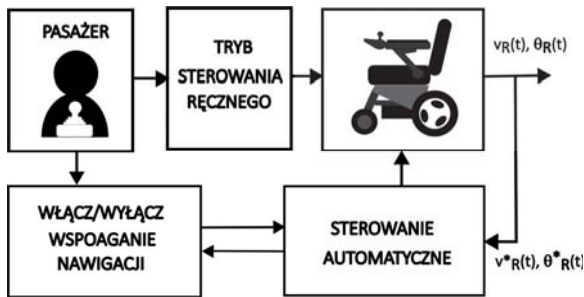
Współczesne technologie wywodzące się z dziedziny robotyki zapewniają wiele rozwiązań ułatwiających ludziom z niepełnosprawnościami samodzielne poruszanie się. Różne modele elektrycznie napędzanych i sterowanych wózków inwalidzkich są obecnie w powszechnym użyciu i wciąż trwają prace nad ich rozwojem [1, 2, 3, 4]. 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 [5]. W sytuacji, gdy wózek porusza się w zatłoczonych przestrzeniach nawet z pozoru łatwe zadanie, takie 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 [6, 7, 8]. Wózek wyposażony w systemy wspomagania nawigacji, czy też systemy nawigacji autonomicznej nazywany jest w literaturze wózkiem autonomicznym lub inteligentnym (ang. smart wheelchair, intelligent wheelchair). W dalszej części pracy tego typu rozwiązanie techniczne nazywane będzie semiautonomicznym wózkiem inwalidzkim i zamiennie oznaczane skrótem "SW" lub terminem "wózek". 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 [9, 10, 11, 12]. 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 wózkiem. Otóż wśród ludzi wchodzących w bezpośrednią interakcję z użytkownikiem wózka inwalidzkiego mogą pojawiać się pozytywne emocje powodowane zjawiskiem 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 systemowi do kolaboracyjnego zachowania uczestników procesu nawigacji. Realizowane to jest przez porównanie prognozowanego zachowania (ruchu) pieszych z rzeczywistym, zarejestrowanym przez system w trakcie realizacji zaplanowanego przejazdu. Strategia nawigacji wyznaczana jest, jako rozwiązanie Hurwicza modelu gry przeciwko naturze [13], w którym współczynnik optymizmu powiązany został ze wspomnianym wcześniej współczynnikiem zaufania. Działanie systemu zostało zweryfikowane na drodze symulacyjnej. Przykładowe eksperymenty symulacyjne zamieszczono i omówiono w przedostatniej sekcji opracowania.

System wspomagania nawigacji wózka inwalidzkiego

Chociaż kluczowym tematem poruszonym w niniejszej pracy, jest bazująca na predykcji, adaptacyjna metoda planowania ruchu SW, to jest ona traktowana, jako część koncepcji systemu wspomagania nawigacji wózka, opisywanej w [14]. Zadaniem tego systemu jest zapewnienie pacjentowi pomocy w utrzymaniu wybranego kursu, podczas prowadzenia wózka. Ideę wspomagania nawigacji SW przedstawiono na rysunku 1. SW jest sterowany ręcznie przez użytkownika za pomocą pulpitu sterowniczego poprzez zmianę prędkości i kierunku ruchu pojazdu. W razie potrzeby użytkownik prowadzący SW może włączyć system wspomagania (podobnie jak to ma miejsce w przypadku tempomatów spotykanych obecnie w samochodach). W tym trybie pracy SW porusza się w trybie autonomicznym z prędkością i w kierunku zadany w momencie włączenia systemu wspomagania. W przypadku wykrycia pieszego (lub jakiegokolwiek obiektu) przez system sensoryczny SW, system podejmuje próbę uniknięcia kolizji, a następnie wraca na kurs podstawowy i kontynuuje jazdę.

Jak wspomniano w części wstępnej pracy, nawigacja autonomiczna z uwzględnieniem czynnika ludzkiego musi spełniać szereg warunków. Te, które są najważniejsze z punktu widzenia użytkownika wózka to bezpieczeństwo i komfort. Zakłada się, że manewry SW będą płynne i wolne od gwałtownych zmian parametrów ruchu. W przypadku braku możliwości spełnienia tych wymagań następuje wyłączenie automatycznego trybu wspomagania nawigacji. Podobnie dzieje się, gdy użytkownik wózka sam zareaguje

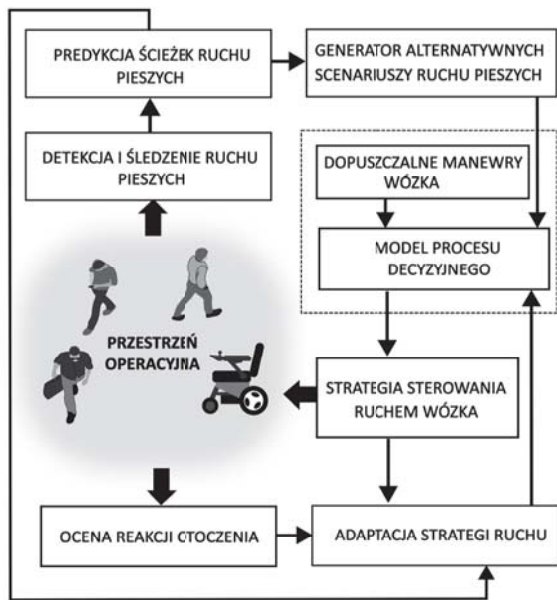


Rys. 1. Koncepcja działania adaptacyjnego systemu wspomaganie nawigacji SW

na niespodziewane zdarzenie lub zmieni parametry jazdy za pomocą panelu sterowania.

Opis koncepcji sterowania automatycznego

Przedstawiona w dalszej części pracy koncepcja adaptacyjnego sterowania ruchem wózka w dynamicznym środowisku związana jest ze strukturą funkcjonalną przedstawioną na rysunku 2. 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 w przestrzeni operacyjnej poruszającego się SW. 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.



Rys. 2. Struktura funkcjonalna predykcyjnego systemu automatycznej nawigacji wózka inwalidzkiego

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 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 optywizmu, co skutkuje zmianą charakteru strategii ruchu wózka w przyszłości. Metoda adaptacji przedstawiona zostanie bardziej szczegółowo w następujących rozdziałach opracowania.

Sformułowanie problemu

Większość produkowanych obecnie elektrycznych wózków inwalidzkich bazuje na platformie z napędem różnicowym [2]. Taka struktura kinematyczna charakteryzuje się bardzo dobrymi właściwościami manewrowymi. W niniejszej pracy przyjęliśmy zatem, że platforma napędowa SW oparta jest na takim rozwiązaniu. Następnie założymy, że konfiguracja wózka w chwili n -tej dyskretnego czasu zdefiniowana jest jako wektor:

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

gdzie pierwsze dwa elementy wektora oznaczają położenie środka geometrycznego SW, natomiast trzeci element wektora to jego orientacja. Zakładamy, iż pojazd wyposażony jest w układ sensoryczny umożliwiający detekcję oraz śledzenie N pieszych (lub innych obiektów) znajdujących się w jego zasięgu. Ponadto system wyposażony jest w bufor umożliwiający przechowywanie M przeszłych pomiarów położenia śledzonych obiektów opisanych zbiorem:

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

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 wariantu modelu predykcji:

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

Metody wyznaczania modelu predykcji ruchu ruchomego obiektu zaprezentowane zostały w pracy [15].

W ogólności każdy problem nawigacji może być rozpatrywany jako ciąg elementarnych zadań nawigacyjnych. Każde z takich zadań polega na zaplanowaniu trasy przejazdu z punktu definiującego aktualną lokalizację wózka do punktu docelowego (ang. point-to-point task). W niniejszej pracy problem jest zdefiniowany w inny sposób. Z punktu widzenia użytkownika wózka znacznie wygodniejszym sposobem definiowania celu nawigacji jest wyznaczenie wybranego kierunku ruchu, a nie punktu docelowego. Przyjmijmy zatem, że celem syntezywanego układu sterowania jest utrzymywanie kierunku i prędkości ruchu SW, wybranych przez użytkownika wózka. Zdefiniujemy zatem ścieżkę, po której ma podążać SW jako parę:

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

gdzie $l(n)$ oznacza półprostą wychodzącą z punktu zdefiniowanego przez położenie środka geometrycznego SW $(x_{W,n}, y_{W,n})$ nachylonej pod kątem $\theta_{W,n}^*$. Wartość Δw oznacza dopuszczalną odległość, na jaką SW może oddalić się od zadanej ścieżki. W ten sposób ścieżka $\Upsilon_0(n)$ definiuje pas ruchu, o zadanej szerokości wewnątrz którego

powinien poruszać się SW. Natomiast rozwiązanie globalnego zadania nawigacyjnego jest rozumiane jako sekwencja ścieżek (4) (z których każda określona jest w horyzoncie czasu H) pozwalająca na osiągnięcie założonej destynacji. Elementarne zadanie nawigacyjne sformułowane zostanie, zatem w sposób następujący: W danej chwili czasu n , na podstawie predykcji otoczenia (3) wyznaczyć sterowanie:

$$(5) \quad u_W^*(n) = [v_W(n), \theta_W(n)]^T,$$

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

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

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

Uwzględnienie niepewności zachowania pieszych

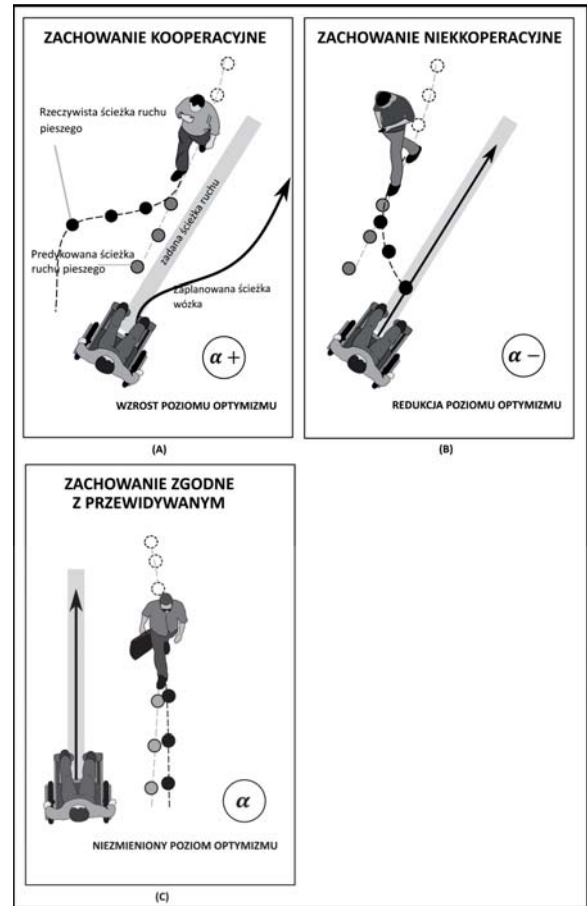
Strategia sterowania ruchem SW bazuje w dużej mierze na predykcji stanu otoczenia. Każda predykcja jest obciążona niepewnością i dlatego fakt ten powinien zostać uwzględniony w trakcie planowania ruchu wózka [16]. Niepewność ta może mieć różne źródła. Jednym z nich jest nieprzewidywalność zachowania pieszych. W trakcie kierowania wózkiem wśród ludzi sytuacja, w której jedna bądź wiele osób zmienia gwałtownie sposób poruszania się (kierunek, prędkość) lub nagle zatrzymuje się, jest dosyć powszechna. Rozpatrując to zjawisko z punktu widzenia użytkownika wózka, 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/irracjonalne (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 (modelem predykcji), jednakże takie, które wynikają z chęci kooperacji powodowanej empatią skierowaną do użytkownika wózka. Objawia się to ustępowaniem drogi, zwalnianiem tempa marszu itd. Trzecia kategoria to również niespodziewane zachowania pieszych, lecz takie które utrudniają lub nawet zagrażają bezpieczeństwu użytkownika wózka. 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:

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



Rys. 3. Interpretacja kategorii zachowań pieszych klasyfikowanych przez system

gdzie $D(n) = D_G \times D_N$ 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 [13]. Niepewność związana zachowaniem pieszych reprezentowana jest właśnie przez stany natury. Z kolei każdy z wyróżnionych w nim stanów odpowiada jednemu z hipotetycznych scenariuszy zachowania pieszych. Zdefiniujmy najpierw dyskretny zbiór sterowań wózka, którymi będzie można oddziaływać na jego kierunek i prędkość ruchu, zwany dalej przestrzenią sterowań:

$$(8) \quad D_G = \left\{ u_{W,k} = [v_{W,k}, \theta_{W,k}]^T \right\} = V_W \times \Theta_W,$$

gdzie

$$(9) \quad \begin{aligned} V_W &= \{v_{W,i}\}, i = 1, \dots, \overline{V}_W, \\ \Theta_W &= \{\theta_{W,j}\}, j = 1, \dots, \overline{\Theta}_W. \end{aligned}$$

Zbiór V_W zawiera wybrane z zakresu zmienności, dyskretne wartości prędkości postępowej natomiast Θ_W wybrane wartości orientacji, które może przyjąć SW. Wybierając sterowanie ze zbioru (8) oddziałujemy na ruch wózka.

Niepewność rozpatrywana w niniejszej pracy dotyczy adekwatności wyznaczonego modelu ruchu pieszych, w oparciu, o który wyliczana jest predykcja stanu otoczenia. Można, zatem uwzględnić niepewność zakładając pewną liczbę scenariuszy rozwoju wypadków. W tym przypadku rozważać będziemy kilka alternatywnych zestawów parametrów mod-

elu ruchu, odzwierciedlających możliwe, inne trajektorie ruchu pieszych. Zatem zbiór możliwych stanów natury zdefiniowany będzie, jako zbiór indeksów identyfikujących rozpatrywane modele predykcji otoczenia (3):

$$(10) \quad D_N = \{m\}, \quad m \in [1, K].$$

Modelowanie funkcji kosztów

Przyjmijmy dwukomponentową postać funkcji kosztów:

$$(11) \quad C(u_{W,k}, m) = \beta_r C_{risk}^m + \beta_p C_{pdev},$$

gdzie C_{risk}^m oznacza ocenę ryzyka nawigacji zgodnie z przyjętą strategią $u_{W,k}$ przy założeniu m-tego wariantu predykcji. Drugi z komponentów funkcji opisuje koszt odejścia od założonej ścieżki ruchu (4).

Ocena ryzyka kolizji, w predykowanym horyzoncie czasowym H przeprowadzana jest na podstawie następującego wskaźnika:

$$(12) \quad C_{risk}^m(u_{R,k}) = \frac{1}{\sum_{h=n+1}^H \min_{i=1 \dots N} |\hat{p}_{W,h}(u_{W,k}) - \hat{p}_{i,h}^m|_{L=2}}.$$

Wartość wskaźnika wyznaczana jest na podstawie agregacji predykowanych odległości pomiędzy poruszającym się pojazdem a śledzonym obiektem na podstawie m-tego modelu predykcji. Udział tej oceny w funkcji kosztów (11) balansowany jest za pomocą parametru β_p , którego wartość dobierana jest doświadczalnie.

Ponieważ SW z założenia ma poruszać się wewnątrz zdefiniowanego w (4) pasa ruchu, do oceny drugiej składowej, modelowanej funkcji kosztów zaproponowany został dwukomponentowy wskaźnik kosztu śledzenia zadanej ścieżki:

$$(13) \quad C_{pdev}(u_{W,k}) = C_{dist} + C_{ang}.$$

Pierwszy z komponentów (13) określa koszt związany z odejściem wózka od osi zadanego pasa ruchu i jest zdefiniowany zależnością:

$$(14) \quad C_{dist}(u_{W,k}) = w_d \sum_{h=n+1}^{n+H} \hat{d}(\hat{p}_{W,h}, l(n)),$$

gdzie $\hat{d}(\hat{p}_{W,h}, l(n))$ jest predykowaną odległością wózka od osi pasa ruchu obliczaną w chwili czasu h zgodnie z zależnością:

$$(15) \quad \hat{d}(\hat{p}_{W,h}, l(n)) = \begin{cases} \hat{d}(\hat{p}_{W,h}, l(n)) & \text{dla } \hat{d}(\hat{p}_{W,h}, l(n)) \geq \Delta w \\ 0 & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases}$$

Współczynnik wagowy w_d dobierany jest eksperymentalnie w sposób umożliwiający zbalansowanie wpływu poszczególnych priorytetów sterowania. Drugi ze składników (13) związany jest z kosztem zmiany kierunku ruchu wózka w odniesieniu do wartości zadanej (4):

$$(16) \quad C_{ang}(u_{W,k}) = w_a |\theta_{W,k} - \theta_{W,n}^*|.$$

Podobnie jak w (14) wpływ tego aspektu sterowania regulowany jest za pomocą współczynnika wagowego w_a , którego wartość dobierana jest także na drodze heurystycznej.

Adaptacyjna strategia sterowania

Sterowanie wózkiem polega na przyjęciu w n-tej chwili strategii należącej do zbioru (8) wynikającej z rozwiązania problemu (7) zgodnie z przyjętym kryterium. Do rozwiązania problemu zastosowano kryterium Hurwicza zdefiniowane jako problem minimalizacji:

$$(17) \quad i_0 = \min_{u_{W,k}} [\alpha \min_m C(u_{W,k}, m) + (1 - \alpha) \max_m C(u_{W,k}, m)].$$

Zastosowane strategii wynikającej z rozwiązania problemu przez $H - 1$ następujących po sobie okresów próbkowania powinno prowadzić do realizacji celu nawigacyjnego przy minimalnym ryzyku kolizji, z uwzględnieniem niepewności predykcji (3). Współczynnik α jest miarą optymizmu decydenta. Koncepcja adaptacji sposobu sterowania polega na zmianie wartości tego współczynnika na podstawie oceny interakcji zachodzących 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 klasyfikowane są na trzy kategorie opisane w sekcji 4. Na bazie tej klasyfikacji modyfikowany jest współczynnik α , wpływający na wybór strategii sterowania. Jego bieżąca wartość ustalana jest zgodnie z zależnością:

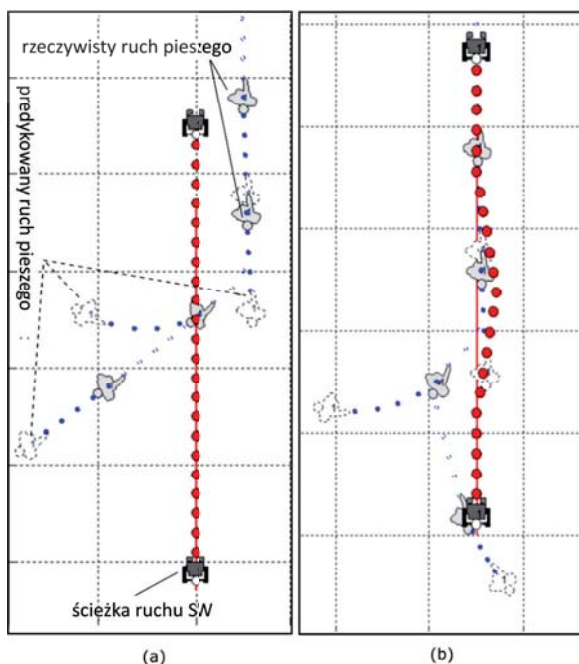
$$(18) \quad \alpha_n = \begin{cases} 1 - (1 - \alpha_{n-1})e^{-\gamma c} & \text{dla } C \\ \alpha_{n-1}e^{-\gamma n} & \text{dla } N \\ \alpha_{n-1} & \text{dla } O \end{cases}$$

Należy zwrócić uwagę na fakt, iż negatywne doświadczenie powoduje znacznie większą utratę zaufania do kooperacyjnego zachowania otoczenia, niż ma to miejsce w przypadku doświadczenia pozytywnego. Stąd wartości współczynników γ spełniają relację $\gamma_C < \gamma_N$.

Ekspertymy 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-pieszy, ograniczono do sytuacji jeden na jeden. Pierwszy z eksperymentów (rysunek 4) zaaranżowany został w ten sposób, by pokazać dwa z omawianych typów interakcji: Niekooperacyjny i kooperacyjny.

SW porusza się równoległe do toru ruchu pieszego (rysunek 4.a), 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 4.b przedstawia sytuację o charakterze przeciwnym. 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



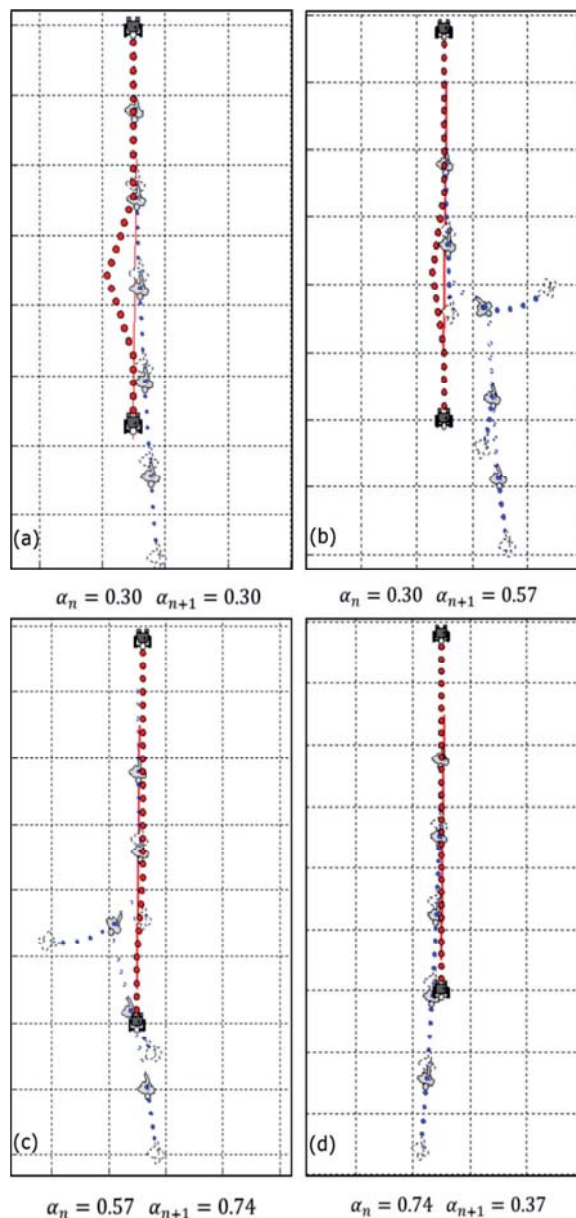
Rys. 4. Eksperyment pokazujący wystąpienie interakcji pieszy-wózek o charakterze niekooperacyjnym (a) i kooperacyjnym (b)

do wózka, pieszy ustępuje mu drogi 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 w czasie, jako doświadczenia przez system różnorodnego zachowania przechodniów. Nawigacja wózka rozpoczyna się z wartością współczynnika $\alpha_n = 0.3$. Taka wartość współczynnika charakteryzuje ostrożny sposób nawigacji (rysunek 5.a). Przechodzień porusza się zgodnie z predykacją, 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 zwiększającą komfort nawigacji wózka (rysunek 5.b), stąd klasyfikacja tej sytuacji jako kooperacyjnej i zwiększenie współczynnika optymizmu do wartości $\alpha_n = 0.57$. Większa wartość α_n sprawia, w kolejnej konfrontacji, system planuje sterowanie niewiele zmieniające tor ruchu wózka. W trakcie realizacji zaplanowanej ścieżki, dochodzi do kolejnego kooperacyjnego zachowania przechodnia, ustępującego drogi, wózkowi (rysunek 5.c), co skutkuje dalszym wzrostem współczynnika do wartości $\alpha_n = 0.74$. W ostatniej części eksperymentu (rysunek 5.d) na bazie zebranych doświadczeń system nie planuje omińnięcia 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 $\alpha_n = 0.37$.

Podsumowanie

W pracy przedstawiono koncepcję adaptacyjnej metody wspomaganie nawigacji semiautonomicznego wózka inwalidzkiego, w obecności przechodniów. Metoda wykorzystuje długoterminową predykację 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 poprawę bezpieczeństwa 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 zmieniający jest na podstawie oceny interakcji pomiędzy wózkiem a przechodniami. Otrzymane wyniki mają charakter wstępny, aczkolwiek są obiecujące. Dlatego trwają dalsze prace nad rozwojem opisanej tu koncepcji.



Rys. 5. Eksperyment pokazujący dynamikę zmiany współczynnika optymizmu

Praca finansowana z grantu Politechniki Śląskiej - subwencja na utrzymanie i rozwój potencjału badawczego 2023.

Autorzy: Dr hab. inż. Krzysztof Skrzypczyk, Katedra Automatyki i Robotyki, Wydział Automatyki Elektroniki i Informatyki, Politechnika Śląska, ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice, Poland, email: krzysztof.skrzypczyk@polsl.pl,

LITERATURA

- [1] Białko M., Popławski M.: Architektura systemu rozmytego przeznaczona do sterowania elektrycznym wózkiem inwalidzkim, *Przegląd Elektrotechniczny* nr 11, 178-180, 2009

- [2] Ding D., Cooper R. A.: Electric-Powered Wheelchairs: A review of current technology and insight into future directions. *IEEE Control Systems Magazine*, Volume: 25, Issue: 2, April 2005, pp. 22-34.
- [3] Kuo C.H.: *Mobility Assistive Robots for Disabled Patients*, Yoshihiko Takahashi (Ed.), ISBN: 978-953-7619-00-8, InTech, 37-54, 2008.
- [4] Makowski T., Gibas M., Chojkowski K.: Projekt i budowa wózka inwalidzkiego o napędzie gąsienicowym wraz z systemem autopoziomowania siedziska, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 9, 269-272, 2022
- [5] Fehr L., Langbein E., Skaar S.: Adequacy of power wheelchair control interfaces for persons with severe disabilities: A clinical survey, *Journal of Rehabilitation Research and Development*, Vol. 37 No. 3, May/June 2000, pp. 353-360.
- [6] Desai S., Mantha S. S., Phalle V.M.: Advances in Smart Wheelchair Technology, *Proc. of International Conference on Nascent Technologies in the Engineering Field (ICNTE-2017)*, 2017, pp. 1-7.
- [7] 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.
- [8] Simpson R. C.: Smart wheelchairs: A literature review, *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 42:2005, pp. 423-436.
- [9] 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.
- [10] Lam C.P., Chou C.T, C.F. Chang, and Fu L.C.: Human-centered robot navigation – Toward a harmoniously coexisting multi-human and multi-robot environment, in *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2010, pp. 1813–1818.
- [11] Möller R. Et. al.: A survey on human-aware robot navigation, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 145, 2021, pp. 1-31
- [12] Moussaid M., Helbing D., Theraulaz G.: How simple rules determine pedestrian behavior and crowd disasters. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, vol 108, no. 17, pp. 6884-6888, 2011.
- [13] Milnor, J.: Games against nature, in: Thrall, R., Coombs, C., and Davis, R. (eds.), *Decision Processes*, Wiley, New York, 1954, pp. 49-59.
- [14] Skrzypczyk, K., Mellado, M.: Vehicle navigation in populated areas using predictive control with environmental uncertainty handling, *Archives of Control Sciences: Technical Sciences*, vol. 27 no. 2, pp. 351-359, 2017.
- [15] 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.
- [16] Dutt, L.S.; Kurian, M.: Handling of Uncertainty – A Survey, *International Journal of Scientific and Research Publications*, Vol. 3, Issue 1, January 2013 1 ISSN 2250-3153.