

UKŁAD WSPOMAGANIA OPERATORA W ZDALNYM STEROWANIU POJAZDU LĄDOWEGO¹

Andrzej TYPIAK

Instytut Budowy Maszyn, Wydział Mechaniczny
Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, Polska
tel. (22) 683 93 88, e-mail typiak@wme.wat.edu.pl

Streszczenie: Zdalne sterowanie pojazdami w nieznanym lub słabo rozpoznanym terenie wymaga stosowania rozbudowanych systemów rozpoznania otoczenia i szerokopasmowego łącza transmisyjnego. W referacie opisano zdalne sterowanie pojazdem lądowym z zastosowaniem układu wspomagania operatora i metody sił wirtualnych. Następnie przedstawiono algorytm wyznaczania bezkolizyjnego toru jazdy i rezultaty badań symulacyjnych.

Słowa kluczowe: zdalne sterowanie, układ omijania przeszkód, metoda sił wirtualnych

Summary: Using remote controlled vehicles in unknown or not all recognize terrain it requires application of extended systems recognize surroundings' and with band transmission link. Solution of remote controlled ground vehicle with operator aid system and virtual field force method is described. Next, algorithm of calculate without collision route and results of simulation research are presented.

Key words: remote control, avoid obstacle system, virtual field force method.

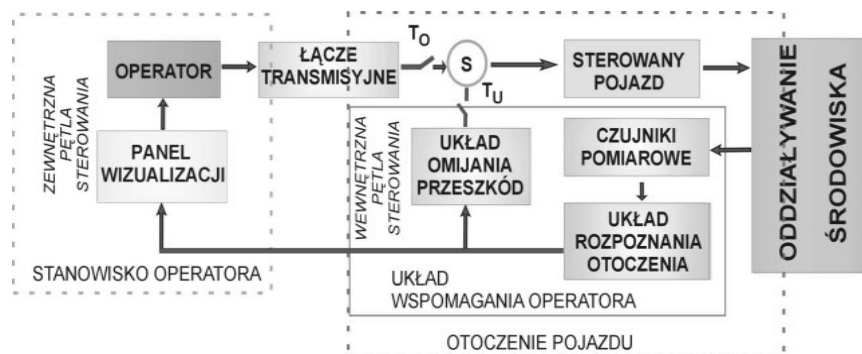
1. WPROWADZENIE

W przypadku braku możliwości zapewnienia dogodnej obserwacji pojazdu albo występowania przerw w transmisji zobrazowania jego otoczenia sterowanie staje się znacznie utrudnione lub nawet niemożliwe. Ponadto w otoczeniu sterowanego obiektu mogą pojawić

¹ Praca naukowa finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych w latach 2004 – 2007 jako projekt badawczy

się przeszkody nie zauważone lub zauważone zbyt późno przez operatora. Dlatego zaproponowano rozbudowę systemu zdalnego sterowania (rys. 1). Proponowane rozwiązanie pozwala na wprowadzenie sterowania rozdzielonego dzięki zastosowaniu dodatkowego elementu sterującego – wspomagającego operatora – przeznaczonego do ciągłego nadzoru otoczenia pojazdu i modyfikującego polecenia operatora tak by sterowany pojazd przemieszczał się po torze bezkolizyjnym [1, 4].

Podstawą opracowania układu omijania przeszkód było założenie, że sygnały sterujące pojazdem są sumą dwóch wektorów: wektora poleceń operatora T_O i wektora omijania przeszkody T_U , generowanego przez układ wspomaganie operatora (rys. 1). W przypadku braku przeszkód $T_U = 0$ pojazd sterowany jest poleceniami operatora. Gdy zbliża się on do przeszkody i operator nie zmienia kierunku jazdy, stopniowo zwiększa się wartość sygnałów sterujących generowanych przez układ wspomaganie operatora i rozpoczyna się manewr jej omijania. Zadanie to powinno być realizowane płynnie bez zatrzymywania pojazdu. Sterowanie pojazdem przez operatora realizowane jest w zewnętrznej pętli sprzężenia zwrotnego, natomiast sterowanie ominięciem przeszkody realizowane jest przez układ wspomaganie operatora w pętli wewnętrznej. Prawidłowa realizacja tego zadania wymaga by system sterowania miał architekturę sterowania równoległego. Rozwiązanie to zapewnia, że sygnały sterujące nie są przełączane przełącznikowo lecz są płynnie włączane i zakres kontroli stopniowo przesuwa się zarówno od operatora do układu wspomaganie (w przypadku pojawiania się przeszkody) jak i odwrotnie [4].



Rys. 1. Schemat układu zdalnego sterowania pojazdem z układem omijania przeszkód

2. METODY BEZKOLIZYJNEGO STEROWANIA POJAZDEM BEZZAŁOGOWYM

Zastosowanie układu wspomaganie operatora w zdalnym sterowaniu jazdą pojazdu w układzie z wizyjną pętlą sprzężenia zwrotnego wymaga zastosowania działającego w czasie rzeczywistym algorytmu omijania przeszkody. Przeprowadzona analiza stosowanych w robotyce metod omijania przeszkód pod kątem zastosowania ich w układzie zdalnego

sterowania pojazdami wykazała, że istnieją podstawy do podjęcia prób adaptacji ich do sterowania pojazdami bezzałogowymi. Jedną z najwcześniej stosowanych jest metoda detekcji krawędzi. W metodzie tej określane jest położenie dwóch najbardziej oddalonych pionowych krawędzi omijanej przeszkody i skierowanie pojazdu dookoła jednej z nich. Jej wadą jest wymagane zatrzymanie pojazdu (lub zmniejszenie jego prędkości) w celu dokonania dokładniejszych pomiarów przeszkody i określenia kierunku jej omijania.

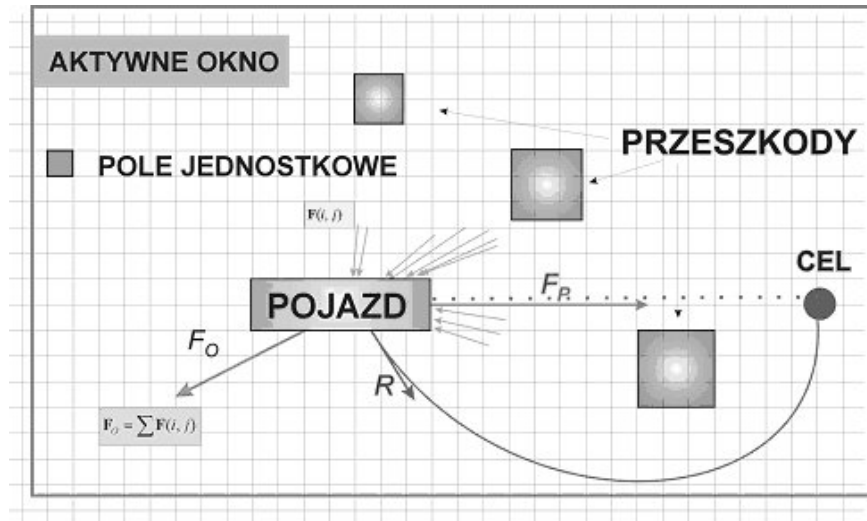
Metodą alternatywną do wyżej opisanej jest metoda omijania przeszkód, zwana metodą sił wirtualnych zaproponowana przez O. Khatiba [1,2]. Przyjął on założenie, że wszystkie obiekty w otoczeniu pojazdu generują siły wirtualne. Cel do którego zmierza sterowany obiekt generuje siłę przyciągającą natomiast występujące na jego trasie przeszkody generują siły odpychające. Istota tej metody przedstawiona jest na rys. 2. Położenie sterowanego obiektu i celu do którego zmierza naniesione jest na mapę na którą naniesiona jest siatka dzieląca cały obszar na pola jednostkowe. Pojazd porusza się po torze wyznaczonym przez operatora do celu, który generuje siłę przyciągającą F_P proporcjonalną do prędkości pojazdu. Obszar na mapie będący w zasięgu czujników zainstalowanych na pojeździe oznaczony jest jako okno aktywne. Dane z czujników rejestrowane podczas przemieszczania się pojazdu zapisywane są w dwuwymiarowej tablicy, tworząc probabilistyczną mapę występowania przeszkody w danym oknie jednostkowym p_{ij} .

Okno jednostkowe w którym zarejestrowano przeszkodę generuje wirtualną siłę odpychającą proporcjonalną do p_{ij} i odwrotnie proporcjonalną do odległości pomiędzy oknem a pojazdem. Następnie wszystkie wektory sił F_{ij} z aktywnych pól jednostkowych są sumowane i tworzą wektor siły odpychającej F_O . Jeżeli na pojazd oddziałuje siła F_O to pojazd nie porusza się po założonym przez operatora torze lecz jego tor wyznaczony jest przez wektor \mathbf{R} będący sumą F_P i F_O .

Jeżeli w polu jednostkowym zostanie zlokalizowana przeszkoda to pole to jest polem aktywnym i generuje siłę oddziałyującą na pojazd

$$\mathbf{F}(i, j) = \frac{F_{st} p_{ij}}{d_{ij}^2} \left[\frac{x_i - x_0}{d(i, j)} \mathbf{e}_x + \frac{y_j - y_0}{d(i, j)} \mathbf{e}_y \right] \quad (1)$$

gdzie: F_{st} – siła oddziaływania na pojazd przez przeszkodę o powierzchni pola jednostkowego; p_{ij} – prawdopodobieństwo występowania przeszkody w danym oknie jednostkowym; d_{ij} – odległość pojazdu od przeszkody; x_0, y_0 – aktualne współrzędne pojazdu; x_i, y_i – współrzędne okna z przeszkodą.



Rys. 2. Wyznaczanie bezkolizyjnego toru jazdy metodą sił wirtualnych

Suma wszystkich wektorów $\mathbf{F}(i, j)$ z komórek jednostkowych w których zlokalizowano przeszkody tworzy wektor siły odpychającej

$$\mathbf{F}_O = \sum \mathbf{F}(i, j) \quad (2)$$

W czasie przemieszczania się pojazdu oprócz siły odpychającej \mathbf{F}_O działa na niego siła przyciągająca \mathbf{F}_P zależna od odległości pojazdu od celu

$$\mathbf{F}_P = F_{CP} \left[\frac{x_C - x_0}{d_C} \mathbf{e}_x + \frac{y_C - y_0}{d_C} \mathbf{e}_y \right] \quad (3)$$

gdzie: F_{CP} – stała wartość (siła generowana przez cel); d_C – odległość między pojazdem a celem; x_C, y_C – współrzędne celu.

Wektorowa suma sił \mathbf{F}_O i \mathbf{F}_P daje wektor siły wypadkowej oddziałującej na pojazd

$$\mathbf{R} = \mathbf{F}_O + \mathbf{F}_P \quad (4)$$

Funkcja sterująca pojazdem wyznaczona jest na podstawie

$$\mathbf{U} = K_S [\delta - \theta] \quad (5)$$

gdzie: K_S – wartość stała; δ - zwrot wektora \mathbf{R} ; θ – aktualny kierunek jazdy.

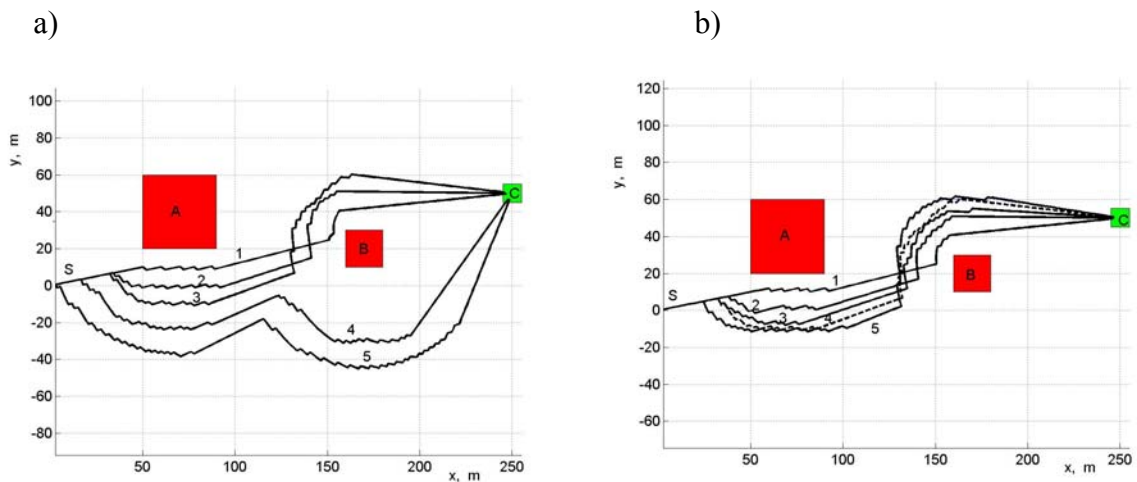
3. BADANIA SYMULACYJNE OMIJANIA PRZESZKÓD METODĄ SIŁ WIRTUALNYCH

W celu przeprowadzenia badań modelowych sterowania pojazdem z układem wspomagania operatora w oparciu o algorytm wyznaczania bezkolizyjnego toru jazdy, opracowano w środowisku Matlab program symulacyjny. Umożliwia on wyznaczanie bezkolizyjnego toru pojazdu dla zadanych konfiguracji przeszkód terenowych przy zmiennych wartościach sił oddziaływujących na pojazd oraz zmiennym zasięgu czujników pomiarowych.

Przyjęto założenie, że pojazd przemieszcza się po obszarze o wymiarach 250 m x 200 m. W programie wartość współrzędnej x zmieniała się od 0 do 250 m, natomiast współrzędnej y od - 100 m do 100 m. Pojazd w momencie rozpoczynania jazdy ustawiony był punkcie S, równoległe do osi x i poruszał się do punktu C leżącego w środku kwadratu o wymiarach 8 m x 8 m, ze stałą prędkością liniową. W programie zamodelowano dwie różnej wielkości przeszkody: przeszkoda A o wymiarach 40 m x 40 m i przeszkoda B o wymiarach 20 m x 20 m.

W opisanym w [5] pojeździe badawczym, do określania położenia przeszkód terenowych wykorzystywany jest dalmierz laserowy z układem skanowania terenu, w którym użytkownik ustawia następujące parametry skanowania: kąt, zasięg i rozdzielczość. Dane z dalmierza otrzymywane są w postaci $\{\alpha_i, d_i\}$, gdzie: α_i – aktualny kąt pomiaru, d_i – odległość przeszkody od dalmierza. W opracowanym programie symulacyjnym przyjęto, że skanowanie przestrzeni jest w zakresie 180^0 przed pojazdem z rozdzielczością $0,25^0$, natomiast zasięg dalmierza był zmieniany w czasie badań symulacyjnych od 10 m do 120 m.

Badania podzielono na dwie części, w których ustalano różne konfiguracje przeszkód terenowych. W pierwszej części przyjęto, że jako pierwsza ustawiona była przeszkoda A - współrzędne środka (70 m, 40 m) - a następnie przeszkoda B - współrzędne środka (170 m, 20 m). Pojazd rozpoczyna jazdę z punktu S (0, 0) i zmierza do punktu C (250 m, 50 m). Przyjmując taki sposób rozmieszczenia przeszkód terenowych rozpatrywano przypadek, w którym przeszkody stykają się z prostą przechodzącą przez punkty S i C i jako pierwsza oddziałuje na pojazd (zaburzając prostoliniowy tor jego jazdy) duża przeszkoda (A) powodująca znaczące odchylenie od założonego toru jazdy. Wskutek takiego oddziaływania zmieniał się azymut przeszkody B względem pojazdu w chwili gdy była przez niego postrzegana. Wyznaczone tory jazdy pojazdu dla zmiennej wartości zasięgu dalmierza przy stałej wartości współczynnika $F_{st}=1000$ N przedstawiono na rys. 3a.



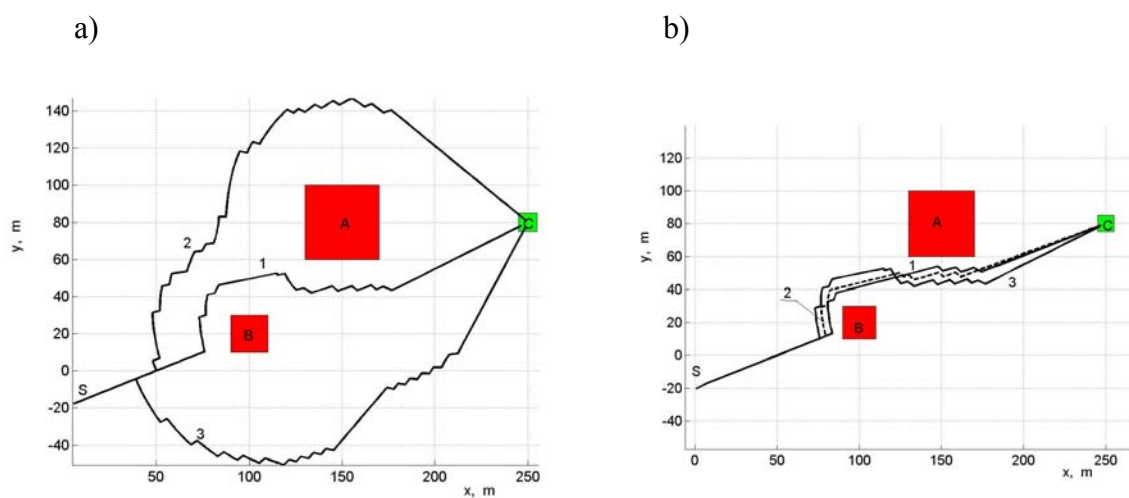
Rys. 3. Wyniki otrzymane podczas I-go etapu badań modelowych wyznaczania toru jazdy pojazdu z uwzględnieniem oddziaływania przeszkód terenowych: a – przy zmiennej wartości zasięgu dalmierza laserowego odpowiednio 1 – 10 m, 2 – 20 m, 3 – 30 m, 4 – 40 m, 5 – 80 m; b – przy zmiennej wartości siły F_{st} odpowiednio: 1 – 100 N, 2 – 300 N, 3 – 600 N, 4 – 1000 N, 5 – 10000 N

Otrzymane wyniki badań wykazują, że wzrost zasięgu dalmierza (decydujący o wcześniejszym „postrzeganiu” przeszkody) powoduje wcześniejsze rozpoczęcie manewru jej omijania i wzrost promienia toru jazdy pojazdu. Jest to pozytywne oddziaływanie powodujące wyznaczenie bardziej bezkolizyjnego toru jazdy, nabierające znaczenia w przypadku zwiększenia jego prędkości, lecz jednocześnie wzrasta długość trasy i zwiększa się czas jej przejazdu. Na rys. 3b przedstawiono wyznaczone tory pojazdu dla zmiennych wartości siły F_{st} przy stałej wartości zasięgu dalmierza laserowego (30 m). Wzrost siły oddziaływania omijanej przeszkody powodował wzrost promienia jej omijania i podobnie jak poprzednio miał wpływ na czas rozpoczęcia manewru omijania lecz jego wpływ na tor pojazdu jest zdecydowanie mniejszy. Dziesięciokrotny wzrost siły F_{st} (przebiegi 1 i 4 rys. 3b) powoduje podobną zmianę toru pojazdu jak trzykrotny wzrost zasięgu dalmierza (przebiegi 1 i 3 rys.3a).

Kolejny etap badań prowadzony był dla następującej konfiguracji przeszkód terenowych oraz startu i celu. Pojazd startował z punktu S (0 m, -20 m) i zmierzał do punktu C (250 m, 80 m). Środek przeszkody A miał współrzędne (150 m, 80 m) a przeszkody B (100 m, 20 m). W tym przypadku tylko przeszkoda B leżała na początkowym torze jazdy pojazdu. Jednak pojazd nie zbliżał się prostopadłe do przeszkody lecz pod kątem ok. 38° do jednej z jej bocznych ścian. Powodowało to, że wraz ze wzrostem zasięgu dalmierza zmieniał się

kierunek omijania przeszkody. Zmiana kierunku omijania przeszkody B miała decydujący wpływ na wielkość oddziaływania przeszkody A na dalszy tor jazdy pojazdu.

Wyznaczone tory jazdy pojazdu dla zmiennej wartości zasięgu dalmierza przy stałej wartości współczynnika $F_{st} = 1000$ N przedstawiono na rys. 4a. Natomiast na rys. 4b przedstawiono wyznaczone tory jazdy pojazdu dla zmiennych wartości siły F_{st} przy stałej wartości zasięgu dalmierza laserowego (80 m). Wzrost siły oddziaływania omijanej przeszkody na pojazd powodował wzrost promienia jej omijania i pomimo, że wpływał też na położenie punktu rozpoczęcia manewru omijania to - podobnie jak w poprzednim etapie badań - jego wpływ na przebieg toru pojazdu jest zdecydowanie mniejszy wpływ zasięgu dalmierza.



Rys. 4. Wyniki II-go etapu badań modelowych wyznaczania toru jazdy pojazdu z uwzględnieniem oddziaływania przeszkód terenowych: a – przy zmiennej wartości zasięgu dalmierza laserowego odpowiednio 1 – 15 m, 2 – 50 m, 3 – 120 m; b – przy zmiennej wartości siły F_{st} odpowiednio 1 – 100 N, 2 – 1000 N, 3 – 10000 N

5. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania modelowe zastosowania metody sił wirtualnych do omijania przeszkód terenowych wykazały, że umożliwia ona wyznaczanie bezkolizyjnego toru zdalnie sterowanego pojazdu. Jednak wyznaczone tą metodą tory jazdy pojazdu nie są optymalne ze względu na długość wyznaczonej trasy i nie uwzględniają konfiguracji przeszkód terenowych. Wyniki badań wskazują, tak zaprojektowany układ sterowania kieruje pojazd w kierunku terenu bez przeszkód, pomimo, że pomiędzy przeszkodami można wytyczyć bezkolizyjne

korytarze o szerokości umożliwiającej bezpieczny przejazd z założoną prędkością jazdy. Opisane w literaturze [1,2] zastosowania dotyczyły wyznaczania tras robotów znajdujących się wewnątrz pomieszczeń, przemieszczających się w terenie ograniczonym ścianami lub innymi stałymi zabudowami. Dlatego bezpośrednio adaptowanie omawianej metody do maszyn lub pojazdów prowadzi do sytuacji, że zwiększanie zasięgu czujników pomiarowych, czyli powiększanie wiedzy otoczeniu pojazdu nie powoduje jakościowego wzrostu parametrów wyznaczonego toru lecz ilościowy (wzrost jego długości).

Analiza wyników badań symulacyjnych wykazała, że w celu wyznaczania bezkolizyjnych torów jazdy pojazdu po trasie o najkrótszym czasie przejazdu należy powiązać metodę sił wirtualnych z algorytmami optymalizacyjnymi. Umożliwi to wyznaczanie torów bezkolizyjnych po trasach ekonomicznie uzasadnionych. Do dalszych prac badawczych planuje się wykorzystać kinetodynamiczną metodę planowania toru jazdy oraz planowanie trasy z wykorzystaniem algorytmów genetycznych [3,6,7].

Literatura

1. Borenstein J., Koren Y.: Tele-autonomous Guidance for Mobile Robots. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Special Issue on Unmanned Systems and Vehicles, Vol. 20, No. 6, Nov/Dec 1990.
2. Dulęba I.: Metody i algorytmy planowania ruchu robotów mobilnych i manipulacyjnych. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT Warszawa 2001.
3. Hussain T., Montana D., Vidaver G.: Evolution-Based Deliberative Planning for Cooperating Unmanned Ground Vehicles in Dynamic Environment. Department of Distributed Systems and Logistics, BBN Technologies Cambridge MA, USA.
4. Konopka S., Kuczmarski F., Typiak A.: Wykorzystanie systemów wizyjnych do zdalnego, bezkolizyjnego sterowania maszyn inżynierskich i pojazdów. SYSTEMS Journal of Transdisciplinary Systems Science. Volume 8/2003.
5. Konopka S., Kuczmarski F., Typiak A.: Lokalizowanie przeszkód w otoczeniu zdalnie sterowanej maszyny inżynierskiej. Transport Przemysłowy, Nr 4/2004.
6. Seungho L., Adams T. M.: A path planning algorithm for automated construction equipment. 16th IAARC/IFAC/IEEE International Symposium on Automation and Robotics in Construction. Madrid, Spain 1999.
7. Śpiewak M., Tubielewicz M., Tubielewicz K.: Zastosowanie algorytmów wyboru drogi w programie służącym do planowania ruchu robotów. VII Szkoła komputerowego wspomaganie projektowania, wytwarzania i eksploatacji. Jurata 2003.