

Mariusz PORDZIK

ZASTOSOWANIE STEROWANIA LINIOWEGO W LINIOWYCH MODELACH TEORII CAR-FOLLOWING

Streszczenie. W artykule przedstawiono model sterowania dla dwóch pojazdów znajdujących się pod automatyczną kontrolą. Zaproponowano własny model sterowania oparty na założeniach sterowania AHS (Automated Highway System), który został wykorzystany do zbudowania algorytmu sterowania. Utworzony model porównano z istniejącymi modelami car-following pod względem „śledzenia” przyspieszenia dla dwóch pojazdów.

APPLICATION OF LINEAR CONTROL IN LINEAR CAR-FOLLOWING MODELS

Summary. A model of control between two automated cars has been proposed in this paper. The proposed model based on AHS was tested and compared with available car-following models. Results of spacing, follow velocity and acceleration were illustrated in graphs.

1. WPROWADZENIE

Rosnąca liczba użytkowanych samochodów powoduje obniżenie prędkości jazdy, wzrost zanieczyszczenia środowiska naturalnego i wiele innych efektów negatywnych. W celu polepszenia warunków ruchu powstają programy badawcze, które koncentrują się na pojedynczych rozwiązaniach składających się na system inteligentnego transportu. W ramach tych programów DRIVE, PROMETHEUS – w Europie, VICS – w Japonii, czy wreszcie IVHS, PATH – w USA, realizuje się zagadnienia złożonych problemów transportu. W ramach takich programów można wyodrębnić grupę rozwiązań AHS (Automated Highway System), czyli systemy automatycznej autostrady [1]. Głównym założeniem takich systemów jest zastosowanie automatycznej kontroli odległości pomiędzy pojazdami jadącymi w kolumnie. Poza tym, że system taki jest bardziej bezpieczny niż istniejące to pozwala on także zmniejszać luki pomiędzy pojazdami przy jednoczesnym zwiększeniu średniej prędkości pojazdów i w związku z tym prowadzi do zwiększenia przepustowości drogi.

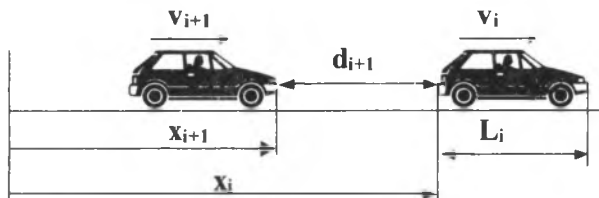
Jednym z najczęstszych zagrożeń jest najechanie pojazdu na pojazd poprzedzający. Dotychczasowe rozwiązania polegały na opisie zjawisk ruchu, który odbywa się w normalnych warunkach sterowania pojazdem, tzn. człowiek występuje w roli sterownika mającego wpływ na zmianę przyspieszania i hamowania pojazdu. Tego typu modele behawioralne po uwzględnieniu losowości pewnych faz ruchu doskonale opisują rzeczywisty ruch drogowy. Modele takie służą do symulacji ruchu pojazdów w różnych sytuacjach drogowych, np. takich jak korek drogowy, duży udział pojazdów ciężarowych w ruchu czy ruch pojazdu uprzywilejowanego.

Nowe rozwiązania pojawiające się w literaturze dotyczą zautomatyzowania ruchu na drodze. Obecnie dotyczy to dróg szybkiego ruchu AHS. Zakłada się, że pojazdy poruszają się bez udziału kierowcy. Istnieją także co najmniej dwa podejścia co do sposobu sterowania. Pierwsze podejście polega na tym, że sterowniki znajdujące się w pojeździe pobierają informacje z sygnalizatorów umieszczonych wzdłuż drogi. Taka metoda pozwala m.in. na paczkowanie pojazdów (konwój) i zwiększanie ich prędkości [2]. Drugi sposób polega na montowaniu na pojazdach czujników laserowych oceniających odległość od poprzednika. Metoda ta jest o wiele tańsza, ale pozwala jedynie na sterowanie odległością pomiędzy dwoma pojazdami. Sterowanie konwoju pojazdów jest w drugim przypadku możliwe, jednak wymagane są większe odległości pomiędzy pojazdami niż w przypadku pierwszym. Zaletą metody drugiej jest możliwość sterowania wzdłużnego i poprzecznego pojazdami jadącymi w kolumnie [3].

W niniejszym artykule przedstawiono problem automatycznego wzdłużnego poruszania się pojazdu następnika za pojazdem lidera. Pominięto opis sposobu przekazywania danych o ruchu lidera do pojazdu następnika. Założono, że dane takie pochodzą z laserowego czujnika pomiaru odległości umieszczonego na pojeździe następnika. Pojazd następnika porusza się automatycznie. Ponieważ przedmiotem pracy jest moduł modelowania numerycznego w takim układzie sterowania, pominięto opis budowy sterowników w pojeździe. Rozwiązaniem tego problemu zajmują się m.in. naukowcy Uniwersytetu w Berkeley [4].

2. SCHEMAT UKŁADU STEROWANIA

Najprostszymi z modeli car-following są modele liniowe. Modele takie można przekształcić w ten sposób, aby problem sterowania sprowadzić do problematyki sterowania optymalnego w systemach liniowych z kwadratowym wskaźnikiem jakości. Przez właściwe sformułowanie liniowo-kwadratowego problemu sterowania optymalnego można wyrazić prawie wszystkie standardowe wymagania stawiane liniowym układom sterowania [5].

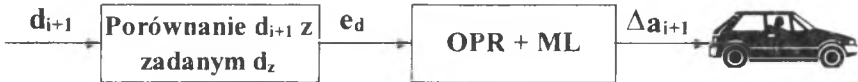


Rys. 1. Sytuacja ruchowa dwóch inteligentnych pojazdów
Fig. 1. Traffic model of two intelligent vehicle

W modelach car-following jako sterowanie występuje przyspieszenie. W tym przypadku będzie to przyspieszenie pojazdu następnika a_{i+1} zależne od przyspieszenia poprzednika a_i w większości modeli, a czasem zależne również od przyspieszenia lidera a_0 .

Na rys. 1 przedstawiono dwa pojazdy, z których pojazd $i+1$ -szy będzie nazywany następnikiem, a pojazd i -ty liderem. Pojazdy następnika i lidera poruszają się odpowiednio z prędkościami v_{i+1} i v_i oraz znajdują się odpowiednio w odległości x_{i+1} i x_i od umownego początku drogi. Czujnik pojazdu następnika odczytuje wartość d_{i+1} , którą można również obliczyć mając powyższe dane i długość pojazdu lidera L_i .

Ponieważ w naszym systemie sterowania zakładamy, że sygnałem wejściowym jest informacja o odległości d_{i+1} , regulacja musi polegać na wypracowaniu odpowiedniego przyrostu przyspieszenia pojazdu następnika, które pozwoli zachować zadaną wielkość odstepu d_{i+1} . Rys. 2 przedstawia blokowy schemat sterowania dla sytuacji pokazanej na rys. 1. Wartość odległości d_{i+1} porównywana jest z zadaną odległością d_z . Odległość d_z może być albo poprzednio obliczoną odległością d_{i+1} i stanowić blok zamykający sprzężenie zwrotne, lub może być to wartość z góry zadana (stała). Porównanie tych wartości pozwala obliczyć błąd, który dla pierwszej sytuacji będzie błędem pomiaru, a dla drugiej będzie to błąd położenia od stanu zadanego. Na podstawie takich danych jesteśmy w stanie obliczyć podstawowe parametry ruchu w danej chwili czasu (OPR) i zastosowanie tych wartości do obliczenia sterowania (w tym przypadku przyspieszenia pojazdu następnika) w wybranym modelu liniowym (ML). Różnica pomiędzy przyspieszeniem w danej chwili a przyspieszeniem potrzebnym do utrzymania stałej odległości d_z stanowi przyrost przyspieszenia Δa_{i+1} , które podawane jest do układu sterującego silnikiem pojazdu następnika.



Rys. 2. Blokowy schemat sterowania [6]

Fig. 2. Block control scheme [6]

Większość istniejących modeli liniowych podaje wyrażenie na przyspieszenie a_{i+1} wynikające bądź z różnicy prędkości, różnicy odległości, lub kombinacji obydwu wartości. Każda różnica jest przemnażana przy tym przez pewien parametr symbolizujący bądź opóźnienie wynikające z reakcji kierowcy (modele behawioralne), bądź opóźnienie wynikające z reakcji silnika na sygnał przyspieszenia lub zwolnienia (modele AHS). Dodatkowym problemem staje się więc dostosowanie tego równania do systemu regulacji, który bazuje na odległości d_{i+1} . O ile w tradycyjnym zapisie jest to dosyć trudne, o tyle stosując zapis macierzowy można przedstawić ogólną postać wszystkich modeli liniowych.

3. MODEL AHS

W celu wygodnego zapisu istniejących liniowych modeli car-following przedstawiono ogólny zapis systemu dynamicznego w postaci równania:

$$\dot{X} = AX + Bu \quad (1)$$

Ogólny zapis równania (1) dla n-pojazdów w konwoju (paczce) przedstawia równanie:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_0 \\ \dot{x}_0 \\ x_1 \\ \dot{x}_1 \\ x_2 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ \dot{x}_{n-1} \\ x_n \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_{11} & \lambda_{12} & -\lambda_{11} & -\lambda_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{21} & \lambda_{22} & -\lambda_{21} & -\lambda_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{n-1,1} & \lambda_{n-1,2} & -\lambda_{n-1,1} & -\lambda_{n-1,2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{n,1} & \lambda_{n,2} & -\lambda_{n,1} & -\lambda_{n,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ \dot{x}_0 \\ x_1 \\ \dot{x}_1 \\ x_2 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ \dot{x}_{n-1} \\ x_n \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ \beta_2 \\ 0 \\ \beta_3 \\ \vdots \\ 0 \\ \beta_{n-1} \\ 0 \\ \beta_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ \dot{x}_0 \\ x_1 \\ \dot{x}_1 \\ x_2 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ \dot{x}_{n-1} \\ x_n \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} \quad [x_0]$$

W dalszej części artykułu będziemy się zajmować uproszczonym modelem dla dwu pojazdów. Powyższe równanie zapiszemy wówczas w postaci:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_i \\ \dot{x}_i \\ x_{i+1} \\ \dot{x}_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \lambda_1 & \lambda_2 & -\lambda_1 & -\lambda_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ \dot{x}_i \\ x_{i+1} \\ \dot{x}_{i+1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ \beta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ \dot{x}_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

W tabelicy 1 przedstawiono niektóre liniowe modele car-following.

Tabela 1

Model	Sterowanie	Wartości λ_i , dla wzoru (3)
CH	$\ddot{x}_{i+1} = \lambda(\dot{x}_i - \dot{x}_{i+1})$	$\lambda_1 = 0, \lambda_2 = \lambda, \beta_2 = 0$
HR	$\ddot{x}_{i+1} = \lambda(x_i - x_{i+1})$	$\lambda_1 = \lambda, \lambda_2 = 0, \beta_2 = 0$
QG	$\ddot{x}_{i+1} = a(x_i - x_{i+1}) + b(\dot{x}_i - \dot{x}_{i+1})$	$\lambda_1 = a, \lambda_2 = b, \beta_2 = 0$
BU	$\ddot{x}_{i+1} = a(\dot{x}_i - \dot{x}_{i+1}) + b\dot{x}_i$	$\lambda_1 = 0, \lambda_2 = a, \beta_2 = b$
ZH	$\ddot{x}_{i+1} = a(x_i - x_{i+1}) + b\dot{x}_i$	$\lambda_1 = a, \lambda_2 = 0, \beta_2 = b$
BA	$\ddot{x}_{i+1} = \alpha[V(x_i - x_{i+1}) - \dot{x}_{i+1}]$	$\lambda_1 = \alpha V, \lambda_2 = 0, -\lambda_2 = \alpha, \beta = 0$

Źródło: na podstawie [1].

Te klasyczne modele car-following zostały zebrane m.in. w pracy [7]. Przyjmując pewien stan początkowy zapisany w postaci:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_i \\ \dot{x}_i \\ x_{i+1} \\ \dot{x}_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ \dot{x}_i \\ x_{i+1} \\ \dot{x}_{i+1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ \dot{x}_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

oraz przyjmując, że rzeczywista odległość S pomiędzy pojazdami lidera i następnika jest różna od pomierzonej odległości d_{i+1} , a ich różnica wynosi d_s (przy czym $d_s \rightarrow 0$):

$$S - (x_i - x_{i+1}) = d_s \quad (4)$$

można obliczyć, po odpowiednich przekształceniach zgodnie z LQR, optymalne sterowanie u w postaci [8]:

$$u = \sqrt{\frac{d_s D_{\max}}{2|S - d_s|}} (\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i) + \frac{D_{\max}}{|S - d_s|} (d_s - S) \quad (5)$$

gdzie:

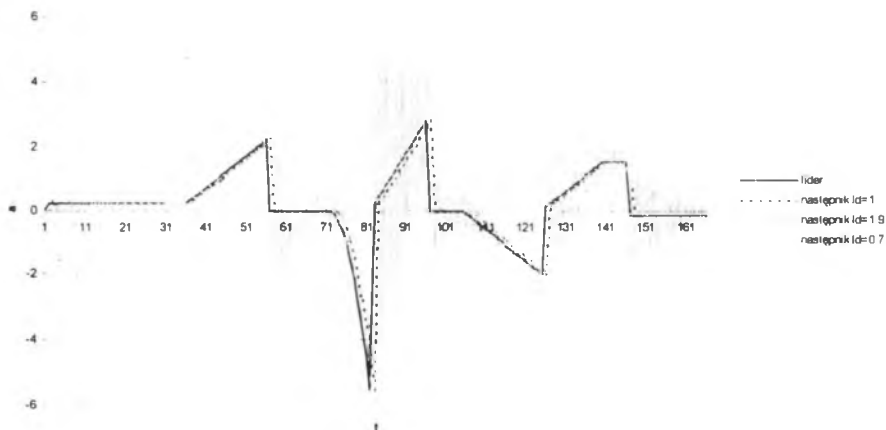
D_{\max} – maksymalne opóźnienie.

4. PORÓWNANIE MODELI

Na podstawie opisywanych liniowych modeli car-following zbudowano prosty algorytm wyznaczający dla pojazdu następnika parametry ruchu na podstawie danej o odległości d_{i+1} (patrz rys. 2) i przeprowadzono symulacje dla różnych wartości parametrów w każdym z modeli. Stanem początkowym jest bezruch obydwu pojazdów oraz ustalona odległość d_{i+1} . Wyniki przedstawiono dla odległości 50 m.

Sterowanie pojazdem następnika odbywa się w czasie rzeczywistym, więc najprostszym sposobem porównania modeli ruchu jest wykres odległości d_{i+1} . Odległość ta powinna się utrzymywać na tym samym, zadanym na początku, poziomie. W literaturze brak jest jednak takich porównań. Zastępuje się je „śledzeniem” przyspieszenia lidera przez pojazd następnika. Wykresy tych dwóch przyspieszeń powinny być w miarę jednakowe i niezbyt przesunięte względem siebie. W idealnym przypadku powinny się pokrywać. Jednak, jak wykażemy w systemach AHS, największe znaczenie ma zmiana wielkości luki d_{i+1} .

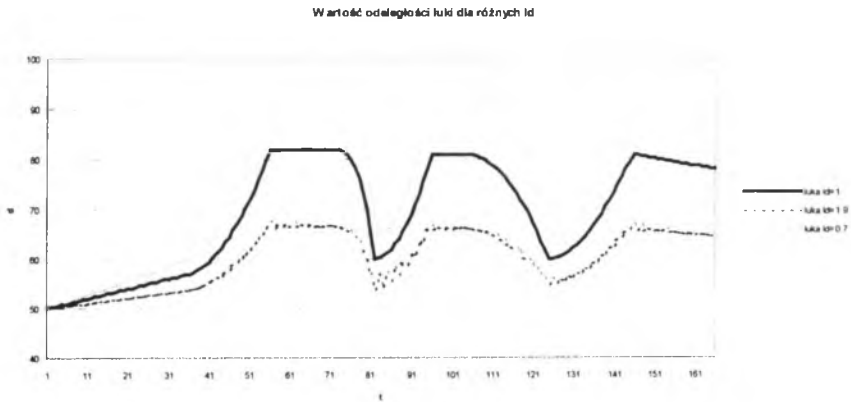
„Śledzenie” przyspieszenia lidera dla różnych λ



Rys. 3. Śledzenie przyspieszenia dla różnych λ

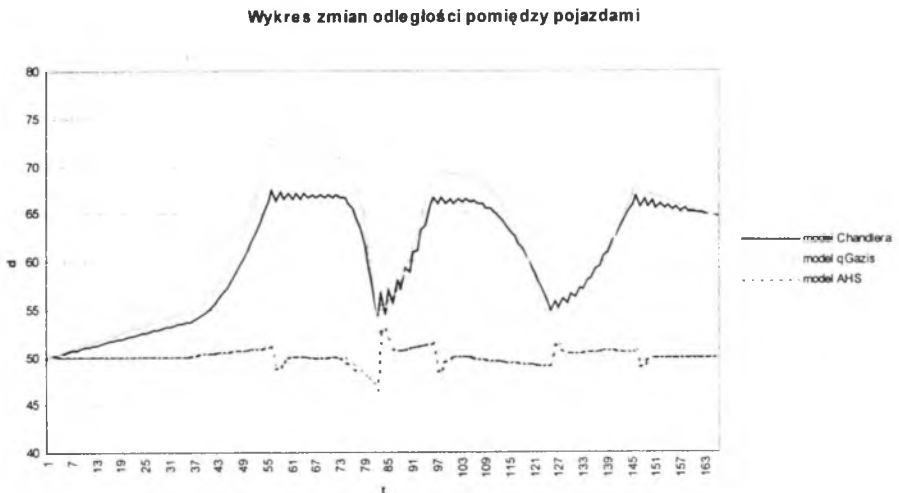
Fig. 3. Follow acceleration for different λ

Najpierw dla każdego modelu wyznaczono takie parametry ruchu, dla których „śledzenie” przyspieszenia lidera jest najlepsze, tzn. suma kwadratów różnicy pomiędzy przyspieszeniem lidera a przyspieszeniem następnika jest najmniejsza. Przykładowo, dla modelu $\ddot{x}_{i+1} = \lambda(\dot{x}_i - \dot{x}_{i+1})$ wykres przyspieszenia następnika w zależności od różnych wartości parametru λ pokazano na rysunku 3. Z wykresu tego wynika, że dla tego modelu bardzo trudno dobrać parametr λ , aby spełnione były jednocześnie dwa warunki: jak najdokładniejsze śledzenie przyspieszenia lidera i minimalna wartość odchylenia luki od wartości zadanej. Z wykresu luki dla odpowiedniego λ (rysunek 4) wynika więc, że sama różnica prędkości nie jest wystarczająca do ustalenia optymalnego sterowania w opisywanym przypadku.



Rys. 4. Odległość pomiędzy pojazdami dla różnych λ

Fig. 4. Distance between two cars for different λ

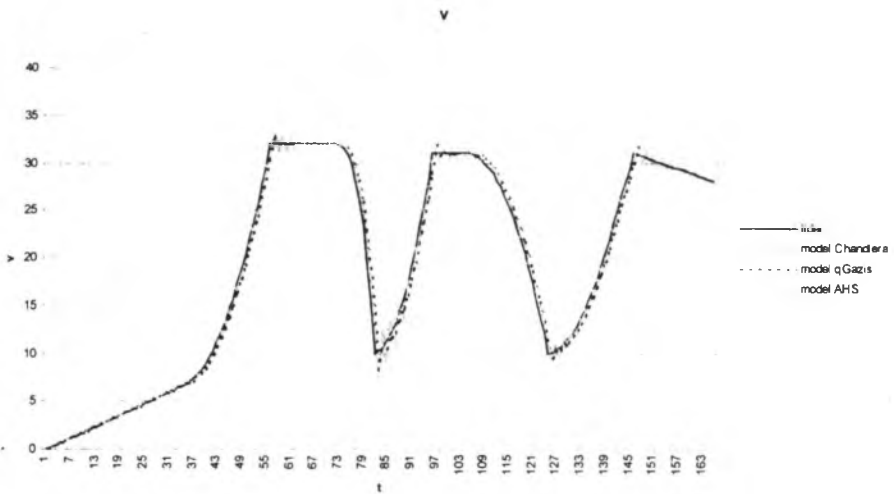


Rys. 5. Odległość pomiędzy pojazdami dla różnych modeli

Fig. 5. Distance between two cars for different models

W celu rozróżnienia wpływu poszczególnych parametrów ruchu powstały modele, np. takie jak model Bando dany równaniem $\ddot{x}_{i+1} = \alpha[V(x_i - x_{i+1}) - \dot{x}_{i+1}]$. Modele takie mają na celu łagodną zmianę przyspieszenia i hamowania. Uzyskuje się wtedy łagodny przebieg przyspieszenia pojazdu następnika. Podobne rezultaty zaproponowano w pracy [9].

Podobną analizę przeprowadzono dla pozostałych modeli liniowych. Jak wynika z rysunku 5, model ogólny dany równaniem (2) wykazuje najlepsze własności zachowania zadanej odległości przy jednoczesnym zachowaniu możliwie najlepszego śledzenia przyspieszenia lidera. Dla każdego z modeli wybrano wykres, dla którego błąd zmiany luki od wartości zadanej był najmniejszy przy zachowaniu prawidłowego śledzenia przyspieszenia lidera. Dla luk z rys. 5 przedstawiono odpowiednie wykresy prędkości na rysunku 6. Wykres prędkości pokazano jednocześnie, aby pokazać, że testy odbyły się dla dużych prędkości (jedno z założeń AHS).



Rys. 6. Porównanie śledzenia prędkości dla liniowych modeli car-following
Fig. 6. Comparison follow velocity for linear car-following models

Porównanie przedstawionych liniowych modeli car-following pokazuje, jak trudno pogodzić łagodne przyspieszanie i hamowanie automatycznego pojazdu przy jednoczesnym zachowaniu zadanej odległości pomiędzy nimi. Najlepsze właściwości w tym względzie wykazuje ogólny model (2). Jego zapis pozwala także na łatwość analizy. Zastosowanie tego modelu daje wyniki „śledzenia” przyspieszenia lidera porównywalne z nieliniowymi modelami przedstawionymi w pracach [10], [11], [12], lecz wykazuje lepszą właściwość przy sterowaniu luką. Pozwala to przypuszczać, że model ten będzie można łatwo zaadaptować dla konwoju (paczki) pojazdów oraz późniejszych badania stabilności takich układów.

Dobór parametrów w macierzach A i B może być jeszcze bardziej dokładny, jeśli model (3) będziemy mogli zidentyfikować na podstawie rzeczywistych pomiarów.

Literatura

1. Pordzik M., Socha L.: Porównanie modeli ruchu pojazdów typu car-following, Międzynarodowa Konferencja Naukowa Transport XXI wieku, str. 213-220, Warszawa 2001.
2. Varaiya P.: Smart cars on smart roads: Problem of control, IEEE Transaction on Automatic Control, vol. 38, no. 2, pp. 195-207, Feb. 1993.
3. Fritz A.: Lateral and Longitudinal Control of a Vehicle Convoy, Vehicle System Dynamics, October 30, 2000, in print.
4. <http://www.path.berkeley.edu/~varaiya>.
5. Górecki H., Fuksa S., Korytowski A., Mitkowski W.: Sterowanie optymalne w systemach liniowych z kwadratowym wskaźnikiem jakości, PWN, Warszawa 1983.
6. Schiehlen W., Fritz A.: Nonlinear Cruise Control Concepts for Vehicles in Convoy, Vehicle System Dynamics Supplement, vol. 33, pp. 256-269, 1999.
7. Zhang X., Jarret D. F.: Stability analysis of the classical car-following model", Transp. Res.-B, vol. 31, no. 6., pp.441-462, 1997.
8. Chang T.H., Lai I.S.: Analysis of characteristics of mixed traffic flow of autopilot vehicles and manual vehicles, Transportation Research C, vol. 5, no. 6, pp. 333-348, 1997.
9. Pordzik M., Socha L.: Modele sterowania pojazdami na trzypasmowej autostradzie, Zeszyty Naukowe Pol. Śl., Seria: Transport, z. 41, nr kol. 1491, str. 103-112, 2000.
10. Ioannou P., Xu Z.: Throttle and brake control systems for automatic vehicle following, IVHS Journal, vol. 1, no. 4, pp. 345-377, 1994
11. Hanebutte U., Doss E., Ewing T., Tentner A.: Simulation of vehicle traffic on an Automated Highway System, Mathl. Comput. Modeling, vol. 27, no. 9-11, pp. 129-141, 1998.
12. Chang K.S., Hedrick J.K., Zhang W.B., Varaiya P., Tomizuka M., Shladover S.E.: Automated Highway System experiments in the PATH program, WHS Journal, vol. 1, no. 1, pp. 63-87, 1993.

Recenzent: Dr hab. Marian Turzański

Abstract

A linear model of control between two automated cars has been proposed in this paper. The proposed model based on AHS (Automated Highway Systems). It was used for simulation study and comparison analysis with literature models. By suitable choice of parameters of the proposed model satisfactory results of spacing, follow velocities and accelerations were presented in graphs.

Praca wykonana w ramach pracy własnej BW 429/RM10/2001