

Kluczowe elementy jazdy autonomicznej na przykładzie elektrycznego pojazdu demonstracyjnego EVE

Paweł Skruch, Marek Długosz, Antoni Cieśla

1. Wstęp

Na przestrzeni ponad 100 lat rozwoju motoryzacji w konstrukcji samochodów zmieniło się prawie wszystko. Pojawiły się nowe rozwiązania mechaniczne, nowe materiały konstrukcyjne, nowe silniki oraz paliwa, ale sposób sterowania samochodem w postaci człowieka – kierowcy pozostał praktycznie niezmieniony. Z jednej strony człowiek jako system sterowania sprawdza się bardzo dobrze, z drugiej jednak strony, jak pokazują statystyki [4, 5, 23], jest to najbardziej zawodny element samochodu. W trakcie prowadzenia pojazdu kierowca musi wykonywać około 20 do 30 skoordynowanych operacji w każdej minucie jazdy [5]. Każdy system, który wspomaga kierowcę w prowadzeniu samochodu, np. system ostrzegania przed kolizją z przodu pojazdu [6, 20, 25], adaptacyjny tempomat [22], system ostrzegania przed zjechaniem z pasa jezdni [17], zmniejsza obciążenia kierowcy i prawdopodobieństwo popełnienia przez niego błędu. Pojazdy autonomiczne, często zwane też pojazdami automatycznymi lub pojazdami bez kierowcy, będą wyposażane w wszystkie tego typu systemy. Dodatkowo, wszystkie operacje związane z prowadzeniem pojazdu, które obecnie wykonuje kierowca, będą wykonywane przez dedykowany system sterowania. Komputer sterujący w przeciwieństwie do człowieka nie męczy się i jeśli tylko uda się opracować prawidłowe algorytmy sterowania, wyeliminować z nich wszystkie błędy to zasadnym wydaje się stwierdzenie, że dzięki wprowadzeniu i upowszechnieniu pojazdów autonomicznych liczba wypadków drogowych ulegnie znaczącej redukcji, a może nawet uda się je wyeliminować całkowicie [5, 7, 16, 23]. Inne korzyści z wykorzystania pojazdów autonomicznych to także usprawnienie transportu oraz zwiększenie przepustowości obecnych dróg. Rewolucyjną zmianą może okazać się także sposób w jaki zaczniemy korzystać z samochodów autonomicznych. Szacuje się, że zwykły użytkownik samochodu korzysta z niego przez około 5% czasu jego posiadania. Wykorzystując pojazdy autonomiczne możliwe będzie oferowanie usługi transportowej na życzenie użytkownika. Autonomiczny samochód przyjedzie na wezwanie klienta, zrealizuje dla niego usługę, a następnie będzie mógł być wykorzystany przez następną osobę [12, 23].

2. Pojazd autonomiczny

Według klasyfikacji wprowadzonej przez The United States, the National Highway Traffic Safety Administration [24] o pojeździe możemy powiedzieć, że jest autonomiczny jeśli osiągnął on 4. poziom autonomiczności, czyli w pełni realizuje zada-

Streszczenie: W pracy przedstawiono kluczowe elementy składające się na system automatycznego sterowania pojazdem autonomicznym, który może być traktowany jako rodzaj wyspecjalizowanego robota mającego do wykonania zadanie podróży z punktu A do punktu B. Do kluczowych elementów jazdy autonomicznej należy zaliczyć: czujniki i systemy percepcji otoczenia, platformy sterowania i obliczeniowe, architekturę elektryczno-elektroniczną pojazdu, systemy łączności, doświadczenie użytkowników, wsparcie infrastruktury oraz systemy bezpieczeństwa i ochrony. Elementy jazdy autonomicznej zostały zilustrowane na przykładzie demonstracyjnego pojazdu elektrycznego EVE.

ESSENTIAL ELEMENTS OF AUTONOMOUS DRIVING BASED ON DEMO ELECTRIC CAR EVE

Abstract: *The paper presents essential elements of the control system for autonomous vehicles, which can be considered as a sort of specialized robot having a task to go from point A to point B. The key elements of autonomous driving include: sensors and perception systems, computing platforms and control systems, electrical-electronic architecture, connectivity to other vehicles and elements of infrastructure, user experience, off board support and services, functional safety and security. The key elements are illustrated on demo electric car EVE.*

nie, bez udziału kierowcy, podróży z punktu A do punktu B. Alternatywną klasyfikację poziomu autonomiczności pojazdu stosuje organizacja SAE [3], gdzie najwyższy poziom autonomiczności pojazdu to 5. Na chwilę obecną w wielu ośrodkach naukowych i różnych firmach prowadzone są intensywne prace nad konstrukcją takich pojazdów. Najbardziej znane są rozwiązania firmy Google, która realizując projekt Google Self-Driving Car Project [8, 10] skonstruowała i przetestowała praktycznie (na drogach publicznych!) kilka samochodów autonomicznych.

Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica w Krakowie, a w szczególności Katedra Automatyki i Inżynierii Biomedycznej, od jakiegoś czasu również prowadzi prace naukowo-badawcze w tym kierunku. Impulsem do rozpoczęcia badań



Rys. 1. Elektryczny pojazd EVE przekazany AGH przez firmę Delphi

w tym obszarze było nawiązanie współpracy z firmą Delphi, w ramach której powstało „Laboratorium pojazdów autonomicznych AGH-Delphi”. Dodatkowo firma Delphi użyczyła testowy pojazd elektryczny o nazwie EVE, na bazie którego prowadzone są prace mające na celu skonstruowanie pojazdu autonomicznego na poziomie 4 (rys. 1). Pojazd EVE jest pojazdem z napędem elektrycznym na tylną oś, zasilany jest z trzech akumulatorów, skręcanie przednich kół realizowane jest przez system *steering-by-wire*, tj. pozycja kierownicy ustalona na podstawie potencjometru poprzez układ kontroli steruje silnikiem elektrycznym, który skręca przednie koła o odpowiedni kąt. Sterowanie hamulcami, pedałem przyspieszenia odbywa się także elektronicznie. Dzięki temu w prosty sposób można sterować pojazdem z poziomu komputera podłączając odpowiednie sygnały wejścia/wyjścia. W przypadku opisywanego w artykule pojazdu elektrycznego sygnałami wejścia/wyjścia są sygnały analogowe o poziome napięcie 0–5 V oraz dane przesyłane po magistrali CAN oraz LIN (np. prędkość pojazdu lub stan naładowania akumulatorów).

3. Elementy jazdy autonomicznej

Pojazd autonomiczny może być traktowany jako rodzaj wyspecjalizowanego robota, który ma do wykonania zadanie podróży z punktu A do punktu B. Poniżej przedstawione zostały kluczowe elementy składające się na system automatycznego sterowania pojazdem.

3.1. Czujniki i percepcja otoczenia

Do bezpiecznego zrealizowania zadania sterowania przez pojazd autonomiczny niezbędne jest wyposażenie go w odpowiednie czujniki, które umożliwią mu prawidłową percepcję (interpretację) otoczenia. Do określenia pozycji geograficznej pojazdu używa się czujników GPS. Na podstawie danych o pozycji z takiego czujnika można określić czy pojazd dotarł do zadanego punktu trasy. Niestety najczęściej deklarowana przez producentów dokładność pomiaru na poziomie 5–15 m jest nie do przyjęcia, aby na jej podstawie generować bezpośrednio sygnał sterowania (przy prędkości 100 km/h pojazd przemieszcza się około 27,7 m/s!). W przyszłości będzie można wykorzystać

czujniki systemu Galileo, w którym zakładana dokładność ma wynosić nawet 10 cm. Oprócz systemów satelitarnych wyznaczania pozycji wykorzystywane będą systemy naziemne, np. sieci Vehicle To Infrastructure (V2I), które wspomogą system nawigacji satelitarnej. Kolejnym typem czujników wykorzystywanych w pojazdach autonomicznych są czujniki odległości. Tutaj można wymienić czujniki radarowe, laserowe lub ultradźwiękowe. Ich podstawowym zadaniem jest dostarczenie informacji o odległości od innych obiektów. Ponieważ pojazd autonomiczny realizuje swoje zadanie w otoczeniu innych obiektów, takich jak np. inne samochody, piesi, przeszkody, w związku z tym musi być on wyposażony w czujniki, które umożliwią mu rozpoznanie tych elementów. Zadanie to realizowane jest przez systemy wizyjne w postaci zestawu kamer wspomaganych radarami lub lidarami wraz z odpowiednim oprogramowaniem. Na podstawie danych z tego typu czujników i wykorzystania zaawansowanego oprogramowania, które na bieżąco mapuje przestrzeń wokół pojazdu układ sterowania może modyfikować swoje działanie tak, aby bezpiecznie osiągnąć zadany cel podróży [5, 9].

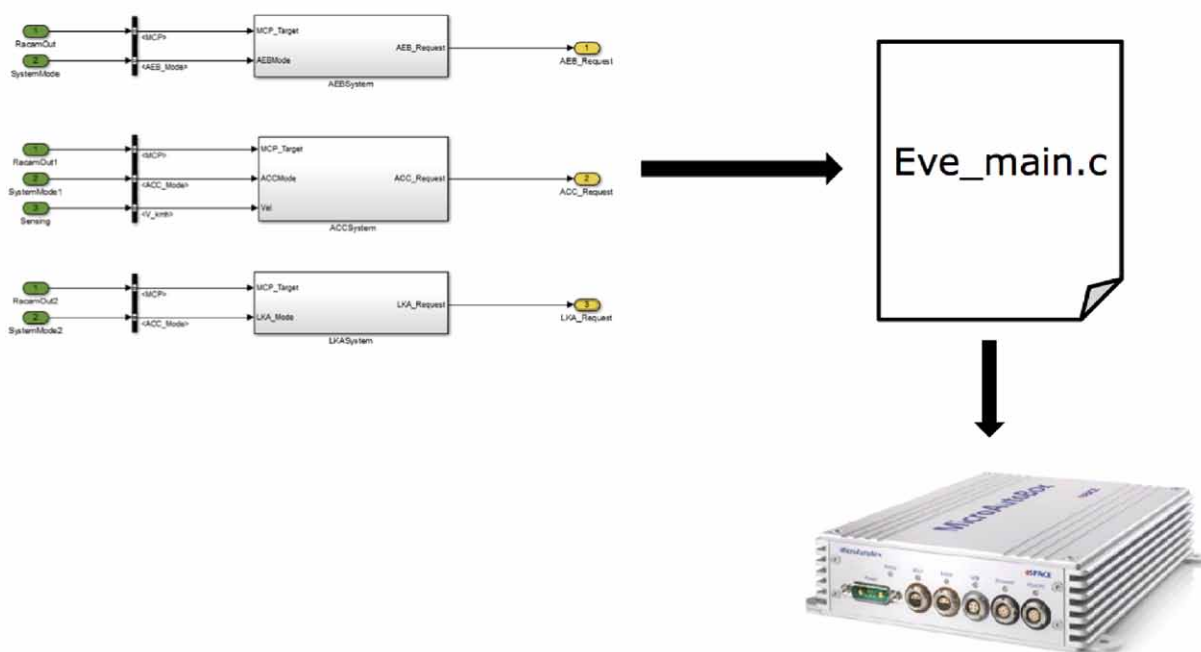
Demonstracyjny pojazd elektryczny EVE wyposażony jest na chwilę obecną w zintegrowany system radaru z kamerą. Drugi etap prac przewidziany na czwarty kwartał 2015 roku przewiduje dodanie czterech bocznych radarów, modułu GPS oraz czujników ultradźwiękowych.

3.2. Platforma sterowania i obliczeniowa

Kolejnym elementem systemu umożliwiającego autonomiczną jazdę pojazdu jest algorytm sterowania i platforma obliczeniowa. Na podstawie danych zebranych z czujników, układ sterowania musi odpowiednio zinterpretować stan w jakim znajduje się sterowany pojazd oraz stan otoczenia i na tej podstawie wygenerować odpowiednie sygnały sterowania. Istotną cechą algorytmu sterowania i platformy obliczeniowej jest ich determinizm czasowy, tzn. sygnały sterowania bezwarunkowo muszą być generowane w czasie nie dłuższym od założonego – musi być to więc system czasu rzeczywistego. Pojazd EVE został wyposażony w platformę obliczeniową MicroAutoBox [11, 18]. Programowanie odbywa się przy wykorzystaniu pakietu MATLAB/Simulink. Program jest tworzony przy pomocy graficznego interfejsu i składa się z połączonych ze sobą bloków funkcjonalnych. Na podstawie takiego schematu blokowego jest następnie generowany kod programu, który po kompilacji jest uruchamiany na właściwie wybranej platformie sprzętowej (rys. 2). W efekcie końcowym otrzymujemy system czasu rzeczywistego (gwarantowane jest to przez producenta platformy sprzętowej oraz wykorzystane oprogramowanie MATLAB/Simulink [21]), który realizuje nasze zadanie sterowania. Możliwość graficznego tworzenia programu w sposób znaczący przyspiesza sam proces programowania. Automatyczna generacja kodu gwarantuje nam, że kod programu będzie optymalny pod względem wydajnościowym i dodatkowo wolny od typowych błędów popełnianych przez człowieka podczas programowania.

3.3. Architektura elektryczno-elektroniczna

Pojazd EVE zasilany jest jednym silnikiem prądu zmiennego z napędem na tylną oś. Pozycja pedału przyspieszenia jest od-



Rys. 2. Proces programowania z wykorzystaniem platformy sprzętowej MicroAutoBox

czytywana przy pomocy potencjometru, a następnie jest generowany sygnał analogowy (poziom od 0 V do 5 V) do układu sterowania silnikiem. Prędkość maksymalna uzyskiwana przez pojazd to 20 km/h (jest ona ograniczona elektronicznie) przy zasięgu 15–20 km. Układ kierowniczy zbudowany jest z kierownicy wykorzystywanej w grach komputerowych. Pozycja kątowa kierownicy jest ustalana poprzez potencjometr i przekazywana do układu sterowania silnikiem, który skręca koła. Układ wykonawczy skręcania kół składa się z niewielkiego silnika prądu stałego oraz przekładni liniowej. Działanie pojazdu EVE jest nadzorowane przez system komputerowy zbudowany w oparciu o procesor Atmel Atmega 128. Monitoruje on podstawowe parametry pojazdu, takie jak prędkość, temperaturę silnika, stopień naładowania akumulatorów, a także zarządza częścią logiczną związaną z załączaniem świateł, otwieraniem drzwi, itp. Wszystkie elementy odpowiedzialne w jakikolwiek sposób za działania pojazdu EVE zostały zamontowane w podłodze pojazdu, tak aby dostęp do nich nie był przypadkowy. Pojazd EVE może pracować w dwóch trybach pracy: tryb sterowania ręcznego i automatycznego. W trybie pracy automatycznej kontrolę nad pojazdem przejmuje algorytm sterowania zaimplementowany i wykonywany na platformie szybkiego prototypowania.

3.4. Łączność

Samochody autonomiczne będą miały zainstalowane pokładowe urządzenia komunikacyjne wykorzystujące bezprzewodowe protokoły wymiany danych takie jak IEEE 802.11p, 4G LTE, Wi-Fi oraz Bluetooth. Urządzenia te będą zbierać dane przekazywane z pobocza i wysyłane przez inne pojazdy, tak aby ostrzec kierowców przed zbliżającym się ruchem i warunkami drogowymi. Istota działania takiego systemu polega na wysyła-

niu i odbieraniu ustandaryzowanych wiadomości wykorzystując bezprzewodową komunikację między pojazdami. Systemy komunikacji samochodu z innymi samochodami i elementami infrastruktury określa się mianem V2V i V2I. Systemy V2V oraz V2I występują często razem pod nazwą V2x lub Car2x [13]. Na podstawie wysłanych i odebranych danych pojazd posiadający V2x jest w stanie szybko zareagować w przypadku niebezpieczeństwa, ograniczyć prędkość, zatrzymać się oraz przekazać informację do kolejnego pojazdu.

Samochód demonstracyjny EVE zostanie wyposażony w system komunikacji bezprzewodowej V2x bazujący na standardach IEEE 802.11p [13], IEEE 1609.x [14] oraz SAE J2735 [19] w kolejnym etapie prac, który jest planowany na rok 2016.



Rys. 3. Eksperyment jazdy autonomicznej na terenie Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie

3.5. Doświadczenie użytkownika

Proces projektowania pojazdu autonomicznego wymagać będzie również wzięcia pod uwagę aspektów wpływających na doświadczenia użytkowników, które będą im towarzyszyć podczas jazdy takim pojazdem. Te w przeważającej mierze subiektywne doświadczenia mają decydujący wpływ na poziom zadowolenia docelowej grupy, dla której pojazd będzie zaprojektowany. Projektowanie samochodu autonomicznego będzie miało zatem charakter interdyscyplinarny łączący ze sobą elementy psychologii, ergonomii, sztuki, użyteczności, wzornictwa przemysłowego oraz technologii inżynierskich obejmujących elektronikę, mechanikę, informatykę i automatykę. Idea przyświecająca powstaniu pojazdu autonomicznego EVE zakłada wspólną pracę nad projektem przez specjalistów z różnych jednostek naukowych przy intensywnej współpracy z jednostkami przemysłowymi. Pierwsze eksperymenty z jazdą autonomiczną zostały przeprowadzone w czerwcu 2015 roku na terenie Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie (rys. 3).

3.6. Wsparcie infrastruktury

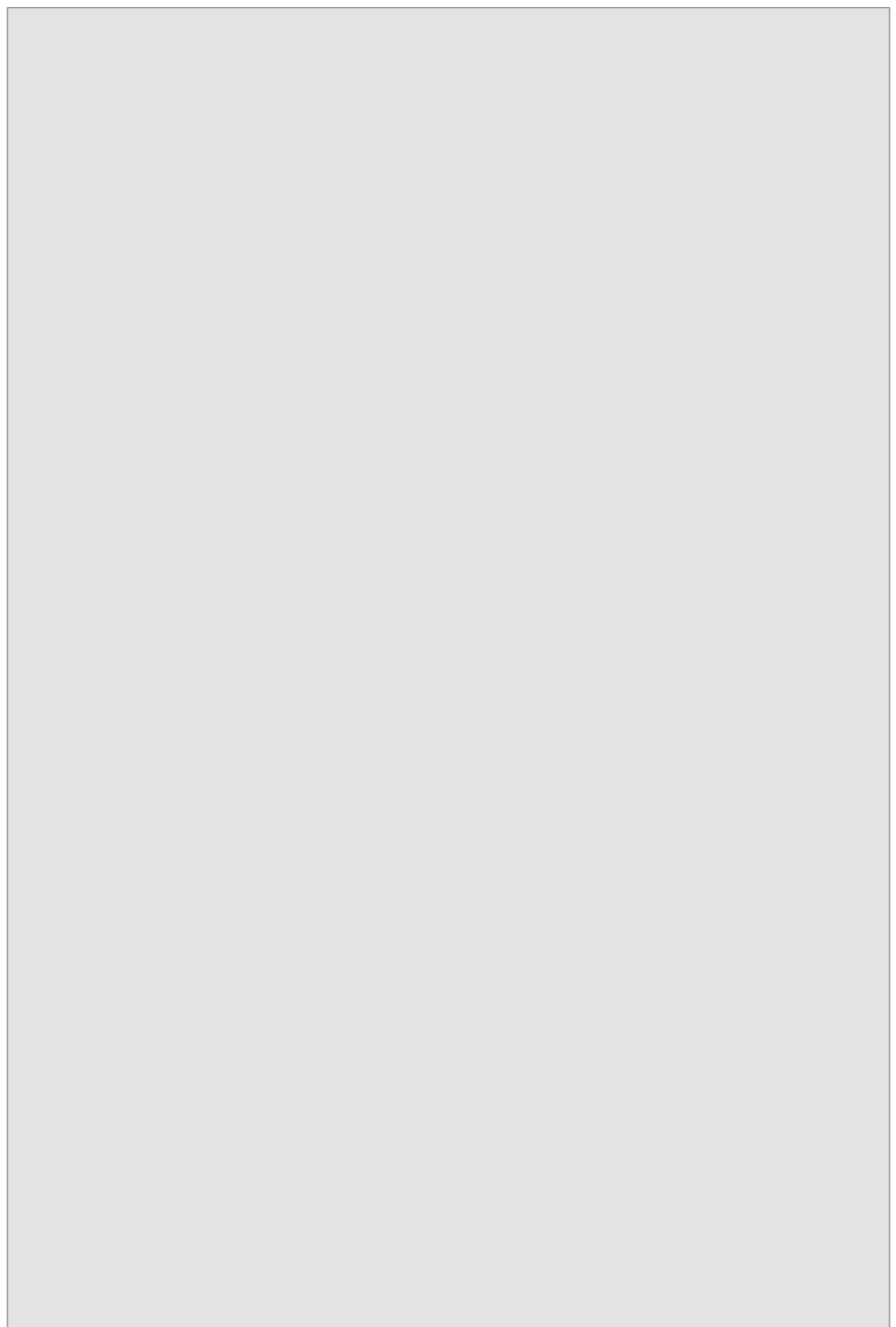
Poruszanie się samochodu autonomicznego na wspomnianym już poziomie 4. nie będzie możliwe bez odpowiedniego wsparcia ze strony infrastruktury drogowej. Elementy infrastruktury będą musiały zostać dostosowane do nowych wymogów. Systemy V2x będą wymagać odpowiednich stacji infrastruktury, tzw. ITS-S (*Intelligent Transport System-Station*). Stacje te będą otrzymywać i monitorować informacje pochodzące od pojazdów i na bieżąco informować inne pojazdy o sytuacji na drogach w danym momencie czasowym. Nad odpowiednimi standardami oraz regulacjami prawnymi zaczęto już pracować w kilku krajach, m.in. w USA oraz Niemczech.

3.7. Bezpieczeństwo i ochrona

Bezpieczeństwo i niezawodność samochodowych układów elektronicznych przy wzrastającej funkcjonalności i złożoności funkcji (opartych na oprogramowaniu) są kluczowymi zagadnieniami aktualnego i przyszłego postępu w branży motoryzacyj-

nej. Nowa ukazująca się norma samochodowa bezpieczeństwa funkcjonalnego ISO 26262 [15] dostarcza wytycznych pozwalających uniknąć wzrastających ryzyk wynikających z błędów w systemie. Standardy SPiCE [1] oraz AUTOSAR [2] połączone z normą ISO 26262 są lub w niedalekiej przyszłości będą obowiązuje dla wszystkich dostawców wbudowanej elektroniki samochodowej. Należy również zauważyć, że w przypadku gdy samochody będą podłączone do globalnej sieci informatycznej, aspekty związane z bezpieczeństwem samochodowych systemów komputerowych staną się jednym z ważniejszych problemów do rozwiązania.

reklama




4. Podsumowanie

Wiele koncernów samochodowych oraz dostawców komponentów dla przemysłu motoryzacyjnego przewiduje, że pierwsze pojazdy autonomiczne pojawią się w seryjnej produkcji po 2020 roku. Firmy te przeprowadziły do tej pory szereg testów, których wyniki wskazują jednoznacznie, że dysponujemy już technologiami i rozwiązaniami, które umożliwiają poruszanie się samochodu bez udziału kierowcy. Ostatnio takim dobrym przykładem jest test wykonany przez firmę Delphi, który polegał na przejechaniu samochodem zautomatyzowanym z San Francisco do Nowego Jorku. Przejazd ten był autonomiczny w 99% przejechanej trasy – pozostałe 1% obejmował przede wszystkim operacje tankowania. Jednak sytuacja, w której wszystkie pojazdy poruszające się po drogach publicznych będą autonomiczne zdaje się być jeszcze odległą perspektywą. Kluczowym i pełnym wyzwaniem będzie okres przejściowy, w którym jednocześnie będą koegzystować tradycyjne i autonomiczne pojazdy. Prawidłowe funkcjonowanie transportu samochodowego w tym okresie będzie wymagać specjalnych regulacji prawnych, nad którymi pracują już instytucje w USA, Niemczech i Wielkiej Brytanii.

Literatura

- [1] Automotive SPICE: *Automotive SPICE. Process Assessment Model (PAM) and Process Reference Model (PRM)*. <http://www.automotivespice.com>, 2010.
- [2] Automotive Open System Architecture (AUTOSAR): *Specifications, release 4.0*. <http://www.autosar.org>, 2012.
- [3] BARTELS A., EBERIE U., KNAPP A.: *Deliverable D2.1 System Classification and Glossary*. Adaptive Consortium, 2015.
- [4] BUEHLER M., IAGNEMMA K., SINGH S.: *The DARPA Urban Challenge, Autonomous Vehicles in City Traffic*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [5] CHENG H.: *Autonomous Intelligent Vehicles. Theory, Algorithms, and Implementation*. Springer, London, Dordrecht, Heidelberg, New York, 2011.
- [6] DAGAN E., MANO O., STEIN G.P., SHASHUA A.: *Forward collision warning with a single camera*. Proc. of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium, doi: 10.1109/IVS.2004.1336352, pp. 37–42, 2004.
- [7] DESJARDINS C., CHAIB-DRAA B.: *Cooperative adaptive cruise control: a reinforcement learning approach*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 12, no. 4, pp. 1248–1260, 2011.
- [8] FISHER A.: *Inside Google's quest to popularize self-driving cars*. Popular Science, <http://www.popsci.com/cars/article/2013-09/google-self-driving-car>, 2013.
- [9] GE S.S., LEWIS F.L.: *Autonomous Mobile Robots: Sensing, Control, Decision Making and Applications*. Taylor & Francis, Boca Raton, London, New York, 2006.
- [10] GUIZZO E.: *How google's self-driving car works*. IEEE Spectrum Online, vol. 18, 2011.
- [11] GÜVENÇ L. ET. AL.: *Cooperative adaptive cruise control implementation of team Mekar at the grand cooperative driving challenge*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 13, no. 3, pp. 1062–1074, 2012.
- [12] HIETANEM S.: *'Mobility as a Service' – the new transport model?* Eurotransport, vol. 12, no. 2, pp. 1–4, 2014.
- [13] IEEE Standards: *802.11p-2010 – IEEE Standard for Information Technology – Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments*. <http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.11p-2010.html>, 2010.
- [14] IEEE Standards: *IEEE 1609.x – Family of Standards for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE)*. <http://standards.ieee.org>, 2006–2013.
- [15] International Standard ISO/DIS 26262: *Road Vehicles – Functional Safety, Part 1 to Part 10*. <http://www.iso.org>, 2009.
- [16] JO K., KIM J., KIM D., JANG C., SUNWOO M.: *Development of autonomous car – part 1: distributed system architecture and development process*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, no. 12, pp. 7131–7140, 2014.
- [17] LEE J.W.: *A machine vision system for lane-departure detection*. Computer Vision and Image Understanding, vol. 86, no. 1, pp. 52–78, 2002.
- [18] MAXWELL T., PATIL K., BAYNE S., GALE R.: *Hardware-in-the-loop testing of GM two-mode hybrid electric vehicle*. Proc. of the IEEE 12th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), pp. 1–5, 2010.
- [19] SAE Standards: *J2735 – Dedicated Short Range Communications (DSRC) Message Set Dictionary*. http://standards.sae.org/j2735_201509, 2015.
- [20] Srinivasa N.: *Vision-based vehicle detection and tracking method for forward collision warning in automobiles*. Proc. of the IEEE Intelligent Vehicle Symposium, doi: 10.1109/IVS.2002.1188021, vol. 2, pp. 626–631, 2002.
- [21] XUE D., CHEN Y.: *System Simulation Techniques with MATLAB and Simulink*. John Wiley & Sons, Chichester, United Kingdom, 2014.
- [22] VAHIDI A., ESKANDARIAN A.: *Research advances in intelligent collision avoidance and adaptive cruise control*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 4, no. 3, pp. 143–153, 2003.
- [23] WALDROP M.: *Autonomous vehicles: no drivers required*. Nature, vol. 518, no. 7537, pp. 20–24, 2015.
- [24] U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration: *Releases Policy on Automated Vehicle Development*, 2013.
- [25] ZHENG N., TANG S., CHENG H., LI Q., LAI G., WANG F.W.: *Toward intelligent driver-assistance and safety warning system*. IEEE Intelligent Systems, vol. 19, no. 2, pp. 8–11, 2004.

 dr inż. Paweł Skruch,
dr inż. Marek Długosz,
dr hab. inż. Antoni Cieśla

artykuł recenzowany