

Witold ILEWICZ, Damian GRZECHCA, Adam ZIĘBIŃSKI,
Piotr BIERNACKI, Weronika GORNIG, Kordian OKULARCZYK,
Wojciech MAZUR, Jarosław URBANEK, Cezary MAŁEK
Politechnika Śląska

KALIBRACJA OSI SKRĘTNEJ 4-KOŁOWEJ PLATFORMY JEZDNEJ – METODA I ANALIZA DANYCH POMIAROWYCH

Streszczenie. W celu optymalnej realizacji zaplanowanej trajektorii ruchu czterokołowej platformy jezdnej wymagana jest zależność znajomości charakterystyki statycznej promienia (krzywizny) skrętu pojazdu w zależności od wartości elektrycznego sygnału sterującego. W ramach pracy przeprowadzono eksperyment kalibracyjny polegający na wyznaczeniu charakterystyki promienia (krzywizny) skrętu zdalnie sterowanego pojazdu autonomicznego w zależności od wartości sygnału sterującego podanego na serwo mechanizm przedniej osi skrętnej. Przeanalizowano różne sposoby wyznaczania aproksymacji liniowej tej charakterystyki i zaproponowano optymalny sposób przetwarzania danych kalibracyjnych.

CALIBRATION OF THE STEERING AXIS OF A 4-WHEEL DRIVE PLATFORM – METHOD AND ANALYSIS OF MEASUREMENT DATA

Summary. In order to optimally execute the planned motion trajectory of a four-wheeled vehicle, it is necessary to determine the relationship between the vehicle's static turning radius (curvature) characteristics and the value of the electrical control signal. As part of this study, a calibration experiment was conducted to determine the turning radius (curvature) characteristics of a remotely controlled autonomous vehicle as a function of the control signal applied to the servo mechanism of the front steering axle. Various methods for linear approximating this characteristic were analyzed, and an optimal method for processing the calibration data was proposed.

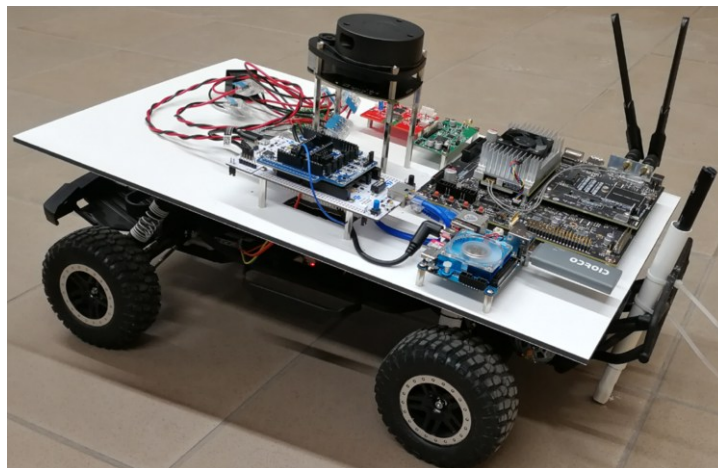
1. Wprowadzenie

Realizacja zaplanowanej trajektorii ruchu czterokołowej platformy jezdnej z przednią osią skrętną wymaga znajomości charakterystyki promienia (krzywizny) skrętu pojazdu w zależności od wartości sygnału sterującego kątem skreślenia kół. Zasadniczo, znając budowę i parametry układu skrętnego lub dysponując dokumentacją pojazdu można z tych danych taką charakterystykę wyznaczyć. Gdy jest to niemożliwe lub trudne, należy przeprowadzić eksperyment kalibracyjny w celu uzyskania danych niezbędnych do wyznaczenia takiej charakterystyki. W ramach studenckiego projektu PBL „Opracowanie i implementacja algorytmów do automatycznego parkowania oraz

przywoływania modelu pojazdu z wykorzystaniem technologii UWB [4,5] realizowanego na Politechnice Śląskiej w latach 2019-2020 wystąpiła potrzeba znalezienia metody wyznaczenia takiej charakterystyki. Krzywizna toru jest podstawą wielu metod planowania trajektorii pojazdu autonomicznego w przestrzeni krzywizny: ścieżki Dubbinsa [2], ścieżki Reeds-Shepp [1, 8, 3], trajektorie z kłotoidami [3, 1], splajny/Béziera [1] oraz metody optymalizacyjne z ograniczeniami na krzywiznę [1].

2. Metoda kalibracji osi skrętnej platformy jezdnej.

Pojazd, który został wykorzystany do przeprowadzenia badań w ramach PBL to platforma jezdna wraz z instrumentacją i oprogramowaniem. Platforma wyposażona jest w 4 koła, z kołami skrętnymi na przedniej osi. Szczegóły budowy mechanizmu skrętnego koła były nieznane, wobec czego opracowano metodę kalibracji układu sterowania osią skrętną w oparciu o pomiar bezpośredni. Wygląd platformy przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. 4-kołowa platforma jezdna zastosowana w projekcie PBL.

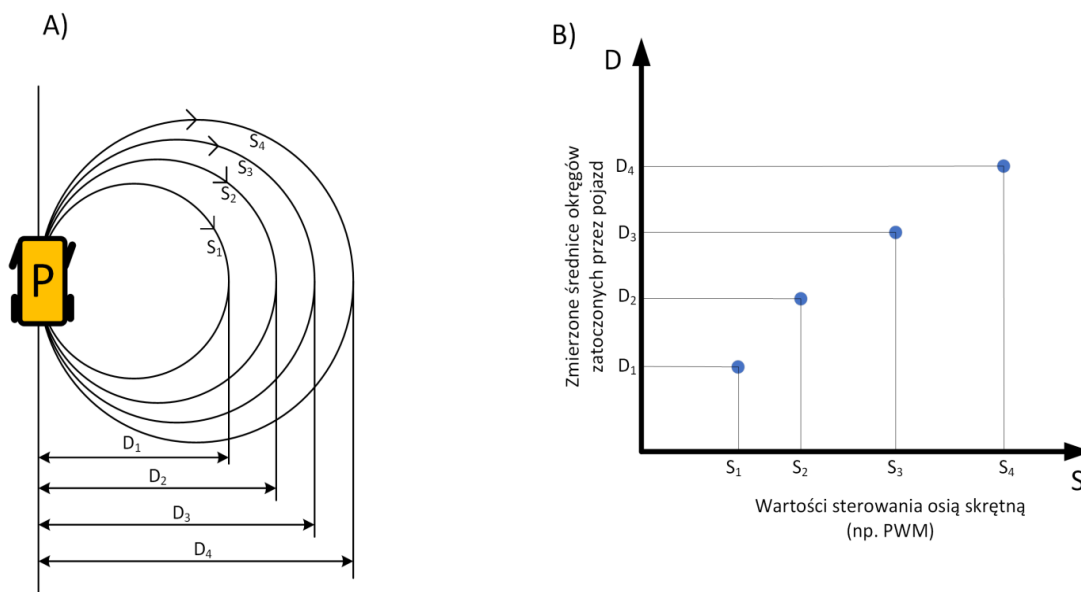
Źródło: opracowanie własne

Celem kalibracji było wyznaczenie charakterystyki $R(S)$ lub $\kappa(S)$, gdzie R jest promieniem krzywizny skrętu pojazdu, κ – krzywizną (z definicji $\kappa = 1/R$), a S – elektrycznym sygnałem sterującym zadawanym na serwomechanizm. W przypadku przedmiotowej platformy jezdnej elektrycznym sygnałem sterującym był sygnał PWM (ang. *Pulse Width Modulation*), przyjmujący arbitralne wartości z przedziału od -500 do 500, przy czym ujemne wartości oznaczają skręt w lewą stronę.

2.1 Procedura kalibracji

Sposób kalibracji zastosowany w projekcie polega na tym, że wymusza się ruch platformy jezdnej po okręgach o różnych promieniach, poprzez zadanie zbioru dobranych, stałych wartości elektrycznego sygnału PWM zadających skręt kół osi skrętnej pojazdu zarówno w lewo jak i w prawo, przy jednoczesnym utrzymaniu stałej prędkości w ruchu postępowym. Dla każdej zadanej wartości PWM platforma jezdna zatacza pełny okrąg lub jego wystarczający fragment, po czym dokonuje się pomiaru średnicy D lub promienia R okręgu, po jakim porusza się platforma, natomiast zbiór

zmierzonych wartości $D(\text{PWM})$ lub $R(\text{PWM})$ wykorzystuje się do wyznaczenia modelu matematycznego krzywej kalibracyjnej $R(S)$ lub $\kappa(S)$ potrzebnej do sterowania pojazdem autonomicznym [7]. Ideę procedury kalibracji pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Idea zaproponowanej procedury kalibracji osi skrętnej. Źródło: opracowanie własne

Zaletą rozwiązania jest podejście funkcjonalne, które nieznany obiekt identyfikuje za pomocą funkcji mapującej, co zapewnia dużą dokładność kalibracji przy jednoczesnej łatwości jej przeprowadzenia – nie jest potrzebne specjalistyczne stanowisko warsztatowe. Ponadto dokładność opisanej metody kalibracji wynika z faktu, że kalibracja jest dokonywana na przygotowanym do jazdy obiekcie, a otrzymane wyniki uwzględniają aktualny stan elementów pojazdu, taki jak eksploatacyjne niedoskonałości układu jezdnego zbieżność i jej rozregulowanie lub zużycie opon, ciśnienie w oponach, czy też rzeczywisty współczynnik tarcia opony o podłoże w miejscu przeprowadzenia kalibracji.

Opracowany na potrzeby projektu PBL sposób kalibracji osi skrętnej został opatentowany w Urzędzie Patentowym RP [6].

3. Realizacja procedury kalibracji w warunkach praktycznych

Pomiaru średnicy okręgu można dokonać znanymi środkami technicznymi: przykładowo poprzez przymocowanie do pojazdu markera przystosowanego do danego podłoża (pisak, kreda, kolec), który zaznaczy okrąg lub fragment okręgu wystarczający do wyznaczenia średnicy/promienia na podłożu, po którym porusza się pojazd, a następnie mierzy się za pomocą: miary rozwijanej, dalmierza laserowego, średnice wyznaczonych markerem okręgów. Innym sposobem jest rejestracja chwilowych położeń pojazdu w systemie komputerowym, podczas ruchu po okręgu, za pomocą systemu pozycjonowania takiego jak GPS lub UWB i wyznaczenie z tych danych odpowiednią metodą matematyczną średnicy lub promienia okręgu po którym porusza się pojazd. Znajomość średnicy (promienia) okręgu po którym poruszał się pojazd oznacza wprost znajomość krzywizny toru ruchu pojazdu.

W projekcie PBL procedurę zrealizowano następująco: do tyłu pojazdu przymocowano chwytak na sprężynie, zamontowanym w osi wzdłużnej. W chwytaku umieszczono kredę. Podczas ruchu platformy tor ruchu był odwzorowany na podłodze za pomocą kredy. Następnie przeprowadzano, za pomocą przymiaru, pomiar średnicy narysowanego okręgu, który przeliczano na promień R . Sposób realizacji procedury pokazano na rysunku 3. Uzyskane wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 1.



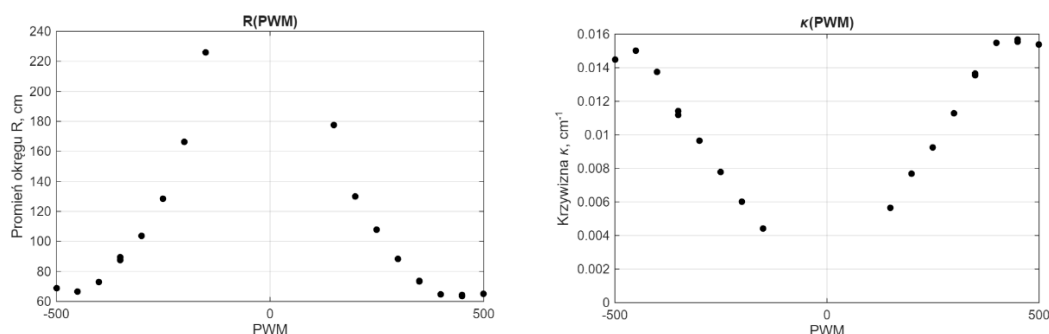
Rys. 3. Sposób realizacji zaproponowanej procedury kalibracji. Źródło: opracowanie własne

Tabela 1

Dane kalibracyjne uzyskane podczas pojedynczego eksperymentu

LP	PWM, a.u.	Promień skrętu R , cm	Krzywizna κ , 1/cm
1	-500	69,0	0,0145
2	-450	66,6	0,0150
3	-400	72,8	0,0137
4	-350	89,5	0,0112
5	-350	87,5	0,0114
6	-300	103,8	0,0096
7	-250	128,5	0,0078
8	-200	166,5	0,0060
9	-150	226,0	0,0044
10	150	177,5	0,0056
11	200	130,0	0,0077
12	250	108,0	0,0093
13	300	88,5	0,0113
14	350	73,3	0,0137
15	350	73,8	0,0136
16	400	64,6	0,0155
17	450	64,4	0,0155
18	450	63,8	0,0157
19	500	65,0	0,0154

Na rysunku 4 przedstawiono wykres surowych danych kalibracyjnych.



Rys. 4. Wykres surowych danych kalibracyjnych. Po lewej zależność promienia R od PWM, po prawej zależność krzywizny κ od PWM.

4. Dyskusja wyników

Analiza wykresów przedstawionych na rysunku 4 pokazuje, że w badanym zakresie, gdy $|PWM| > 450$, charakterystyka osi skrętnej charakteryzuje się widocznym nasyceniem. Ujemne wartości PWM oznaczają skręt w lewo, dodatnie – w prawo. Charakterystyki $R(PWM)$ i $\kappa(PWM)$ wykazują symetrię względem osi $PWM = 0$, przy czym $R(PWM)$ ma charakter odcinkami nieliniowy, z asymptotą pionową w pobliżu $PWM = 0$, gdzie wartości R dążą do nieskończoności (ruch po linii prostej), natomiast $\kappa(PWM)$, po obcięciu danych z obszaru nasycenia, wykazuje charakter odcinkami liniowy, z wartościami z przedziału $\langle 0, 0,0154 \rangle$. Do dalszego przetwarzania wybrano dane $\kappa(PWM)$. Celem jest wyznaczenie jak najprostszego, a jednocześnie wystarczająco dokładnego modelu matematycznego opisującego dane kalibracyjne, który będzie wykorzystany w algorytmie sterowania platformą jezdnią. Poniżej przeprowadzono rozważania dla aproksymacji wielomianem 1 stopnia.

4.1. Niezależna odcinkowo-liniowa aproksymacja wyników kalibracji dla skrętów w lewo i w prawo

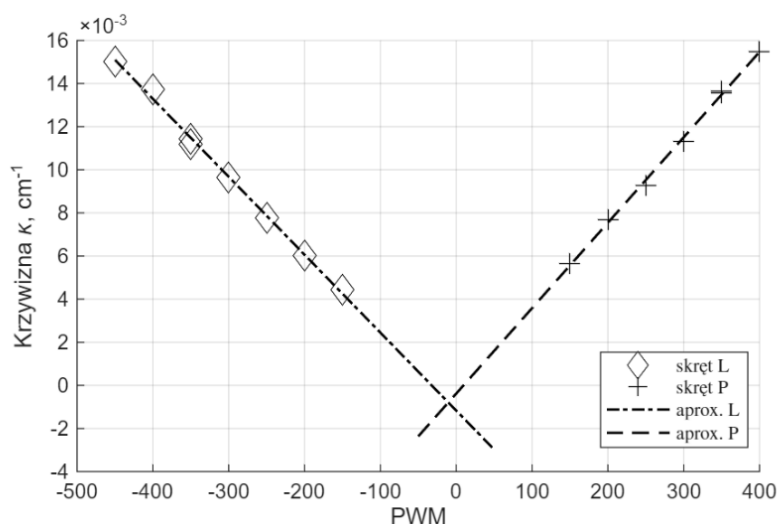
W obliczeniach pominięto dane z obszarów nasycenia, tzn. pomiar nr 1 (skręt w lewo) oraz pomiary nr 17, 18 i 19 (skręt w prawo). z tabeli 1. Osobno wyznaczono aproksymacje wielomianem 1 stopnia danych dla skrętu w lewo i w prawo. Przebiegi aproksymacji przedstawiono na rysunku 5.

Niezależne aproksymacje liniowe dla lewego i prawego skrętu nie przecinają się dla wartości $\kappa = 0$, wobec czego taki rodzaj aproksymacji nie znajduje praktycznego zastosowania do wykorzystania w algorytmie sterującym platformą jezdnią. Sumaryczna suma kwadratów odchyleń obu prostych od danych pomiarowych (SSE) wynosi w tym przypadku $5,16 \cdot 10^{-7}$.

4.2. Odcinkowo-liniowa aproksymacja wyników kalibracji z wymuszeniem punktu przecięcia prostych dla wartości $\kappa = 0$

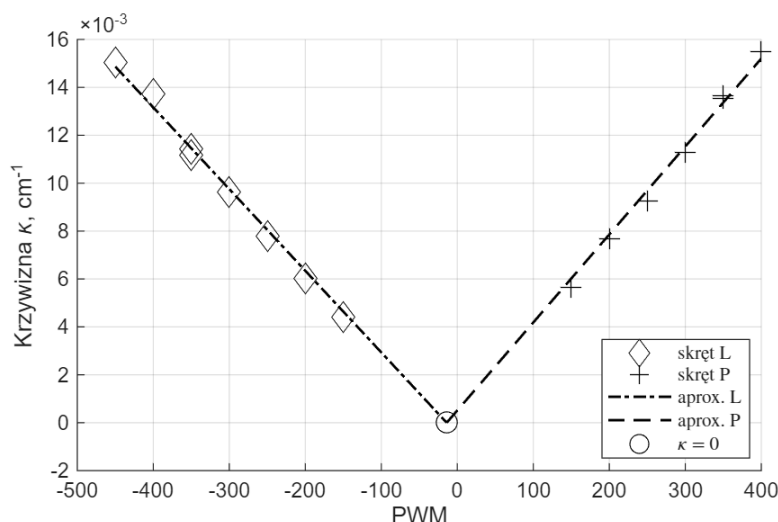
W celu wymuszenia przecięcia się prostych aproksymujących dla punktu $\kappa = 0$, do zbiorów danych dla skrętu w lewo i w prawo wprowadzono dodatkowy punkt o współrzędnych $(x_p, 0)$, przez który powinny przechodzić obie proste. W celu

wyznaczenia nieznanej wartości x_p zbudowano wskaźnik jakości względem x_p , będący ważoną sumą kwadratów odchyleń obu prostych aproksymujących od danych pomiarowych. Poszukuje się minimum takiego wskaźnika względem x_p . Wymuszenie przejścia obu aproksymacji przez punkt $(x_{p_{opt}}, 0)$ osiąga się poprzez ustawienie bardzo dużej wartości wagi dla punktu $(x_p, 0)$, pozostawiając wagi dla pozostałych punktów równe 1.



Rys. 5. Niezależne odcinkowo-liniowe aproksymacje danych kalibracyjnych dla skrętu w lewo i w prawo. $SSE=5,16 \cdot 10^{-7}$

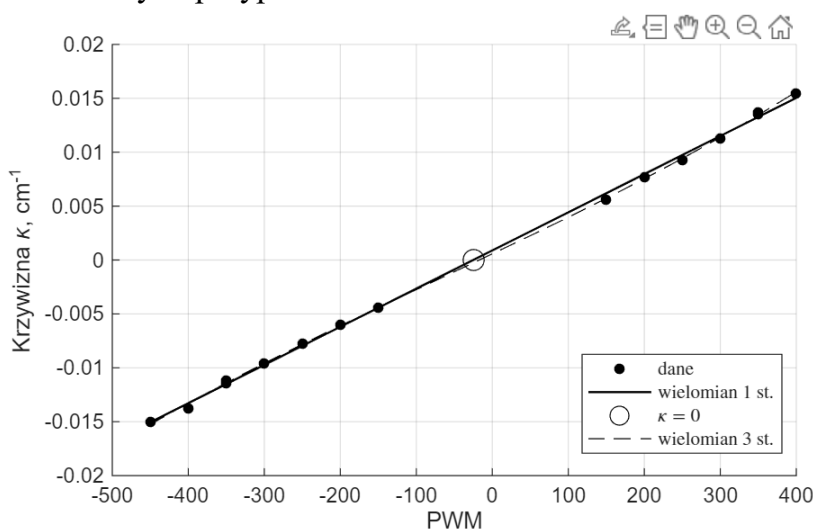
Wyniki działania opisaną procedurę przedstawiono na rysunku 6. – obie proste aproksymujące przecinają się dla wartości $PWM \cong -14$. Dla takiej wartości PWM zadanej w układzie sterowania platformą jezdnią platforma powinna poruszać się po torze zbliżonym do prostoliniowego. Sumaryczna suma kwadratów odchyleń obu prostych od danych pomiarowych (SSE) wynosi w tym przypadku $1,29 \cdot 10^{-6}$ i jest ponad dwukrotnie większa od poprzedniego przypadku. Uzyskana w ten sposób odcinkowo-liniowa krzywa kalibracyjna może zostać wykorzystana do sterowania torem jazdy platformy jezdnej.



Rys. 6. Wyniki zastosowania aproksymacji odcinkowo-liniowej z wymuszeniem przecięcia prostych dla wartości $\kappa = 0$; $PWM(\kappa = 0) = -13,96$; $SSE=1,29 \cdot 10^{-6}$

4.3. Aproksymacja wszystkich danych pomiarowych jedną prostą.

Zagadnienie aproksymacji danych kalibracyjnych można uprościć, przypisując wartościom krzywizny dla skrętu w lewo i w prawo przeciwne znaki. W takim przypadku znika potrzeba aproksymacji odcinkowej – dane można opisać pojedynczą funkcją liniową. Wyniki takiego podejścia zaprezentowano na rysunku 7. Danym dla skrętu w lewo przypisano wartości ujemne, nie zmieniając ich wartości bezwzględnej. Jak widać uzyskany zbiór danych można z dobrą dokładnością aproksymować linią prostą. Punkt przecięcia tej prostej z osią $\kappa = 0$ w naturalny sposób wskazuje wartość PWM, dla której platforma jezdna będzie poruszała się po torze zbliżonym do prostej. W tym przypadku wartość PWM dla $\kappa = 0$ wynosi $-25,01$ i jest inna, niż dla aproksymacji odcinkowo-liniowej. Suma kwadratów odchyłeń prostej aproksymującej od danych pomiarowych (SSE) wynosi w tym przypadku $1,47 \cdot 10^{-6}$ i jest największa spośród trzech omówionych przypadków.



Rys. 7. Aproksymacja danych kalibracyjnych prostą po przyjęciu dla skrętu w lewo ujemnych wartości krzywizny toru; $PWM(\kappa = 0) = -25,01$; $SSE = 1,47 \cdot 10^{-6}$

5. Podsumowanie i wnioski

W zaproponowanej metodzie kalibracji osi skrętnej platformy jezdnej, krzywiznę toru określa się na podstawie pomiaru średnicy okręgu, po którym porusza się platforma jezdna. Metoda jest prosta koncepcyjnie, natomiast problematyczne jest jej stosowanie dla małych wartości krzywizn (dużych promieni skrętu), ze względu na ograniczone miejsce do testów, zwłaszcza jeśli przeprowadza się je wewnątrz budynków. Prowadzi to do braku danych kalibracyjnych dla małych krzywizn toru ruchu. Dlatego metoda wymaga dodatkowych badań. Wydaje się, że punkt środkowy charakterystyki dla krzywizny $\kappa = 0$ da się w przybliżeniu wyznaczyć w osobnym eksperymencie, gdy pojazd doprowadza się do jazdy po linii prostej z zadaną dokładnością i stąd określić wartość PWM dla jazdy na wprost (punkt oznaczony kółkiem na rysunkach 6 i 7). Taki eksperyment może znacząco poprawić dokładność krzywej kalibracyjnej. W opisanych w punktach 4.2 i 4.3 sposobach wyznaczania krzywych kalibracyjnych otrzymano różne wartości PWM dla jazdy na wprost ($\kappa = 0$). Należałoby zweryfikować, która jest

dokładniejsza. Warto również rozważyć w charakterze modeli krzywej kalibracyjnej zastosowanie wielomianów wyższego, niż 1 stopnia, gdy wymagana jest większa dokładność aproksymacji. Na rysunku 7 dopasowany do danych kalibracyjnych wielomian 3. stopnia dobrze oddaje charakter widocznych nieliniowości zmierzonej charakterystyki.

Badania współfinansowane przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego w ramach projektu „Politechnika Śląska jako Centrum Nowoczesnego Kształcenia opartego o badania i innowacje” nr POWR-03.05.00-00-Z098/17/00

LITERATURA

1. Dai J., Wang Y., Bortoff S. A., Burns D. J.: From Reeds-Shepp's paths to continuous curvature path planning, Part I: transition schemes & algorithms (Tech. Rep. TR2017-122). Mitsubishi Electric Research Laboratories, 2017.
2. Dubins L. E.: On curves of minimal length with a constraint on average curvature, and with prescribed initial and terminal positions and tangents. *American Journal of Mathematics*, 79(3), 1957, p. 497–516.
3. Fraichard T., Scheuer A.: From Reeds and Shepp's to continuous-curvature paths. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2004, p. 1632–1637.
4. Grzechca D., Ziębiński A., Ilewicz W., Biernacki P., Gornig W., Małek C., Okularczyk K., Urbanek J., Mazur W.: Raport z PBL: Opracowanie i implementacja algorytmów do automatycznego parkowania oraz przywoływania modelu pojazdu z wykorzystaniem technologii UWB. Projekt: Politechnika Śląska jako Centrum Nowoczesnego Kształcenia opartego o badania i innowacje POWR-03.05.00-00-Z098/17/00.
5. Grzechca D., Ziębiński A., Ilewicz W., Biernacki P., Gornig W., Małek C., Okularczyk K., Urbanek J., Mazur W.: Opracowanie i implementacja algorytmów do automatycznego parkowania oraz przywoływania modelu pojazdu z wykorzystaniem technologii UWB. *PM News*, 2020, Artykuł 23.
<https://delibra.bg.polsl.pl/dlibra/publication/76029/edition/66308/content>
6. Ilewicz W. i inni: Sposób kalibracji układu sterowania osią skrętną autonomicznego pojazdu kołowego, 2020. Patent PL241075. Urząd Patentowy RP.
7. Piotrowski J., Kostyrko K.: Wzorcowanie aparatury pomiarowej. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2000.
8. Reeds J. A., Shepp L. A.: Optimal paths for a car that goes both forwards and backwards. *Pacific Journal of Mathematics*, 145(2), 1990, p.367–393.