

Samochody autonomiczne



Motywacja

- **Teza 1:** Modele o 5 i 7 stopniach swobody w wystarczający sposób godzą efektywność numeryczną z dokładnością odwzorowania rzeczywistego ruchu pojazdu.
- **Teza 2:** Niesprzyjające warunki atmosferyczne mają istotny wpływ na ruch samochodu autonomicznego.

```
graph LR; A[Pozyskanie i interpretacja danych z sensorów] --> B[Określenie stanu pojazdu]; B --> C[Określenie punktów trasy]; C --> D[Aproksymacja trasy do ścieżki ruchu]; D --> E[Obliczenie trajektorii ruchu]; E --> F[Realizacja trajektorii ruchu];
```

Pozyskanie i interpretacja danych z sensorów

Określenie stanu pojazdu

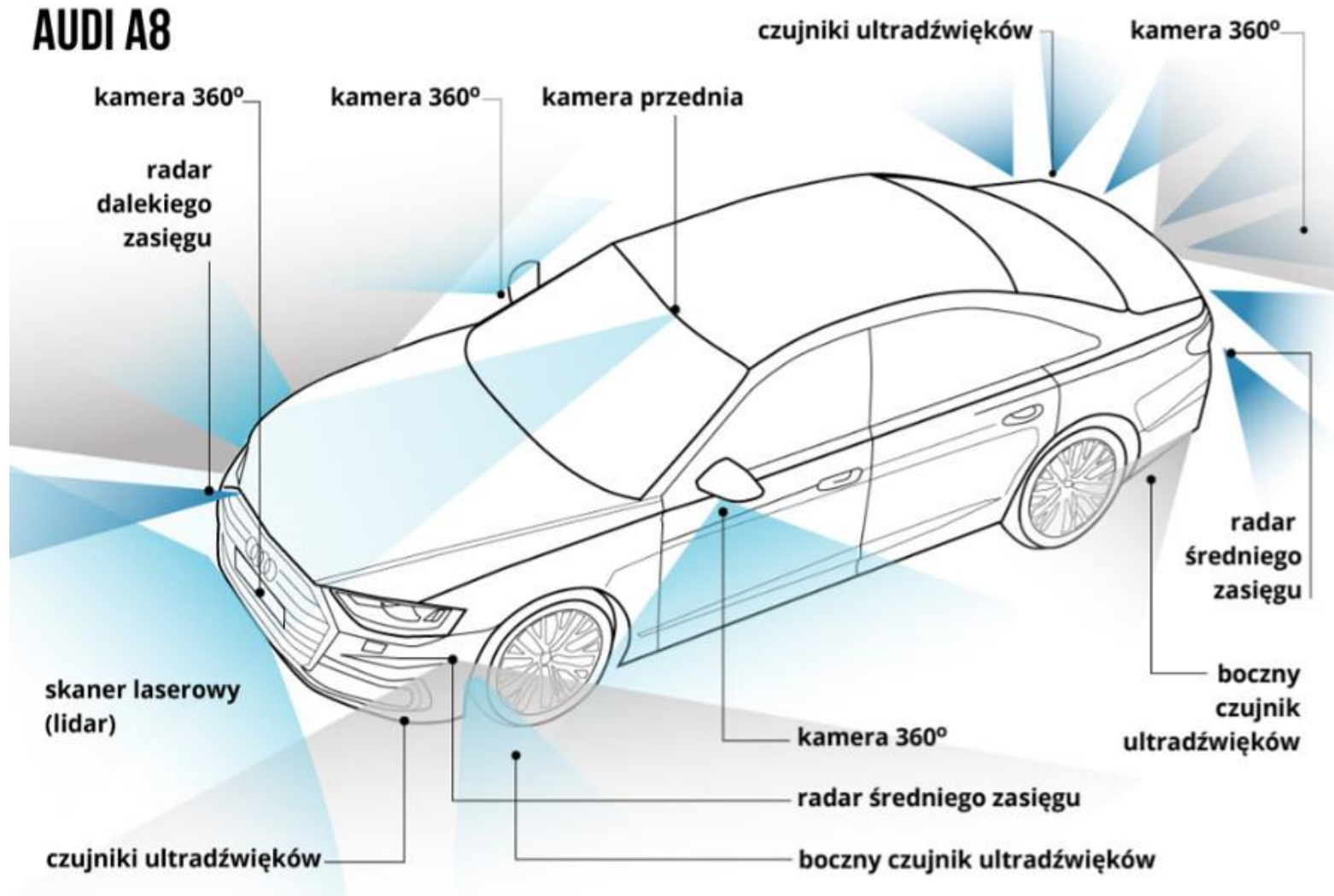
Określenie punktów trasy

Aproksymacja trasy do ścieżki ruchu

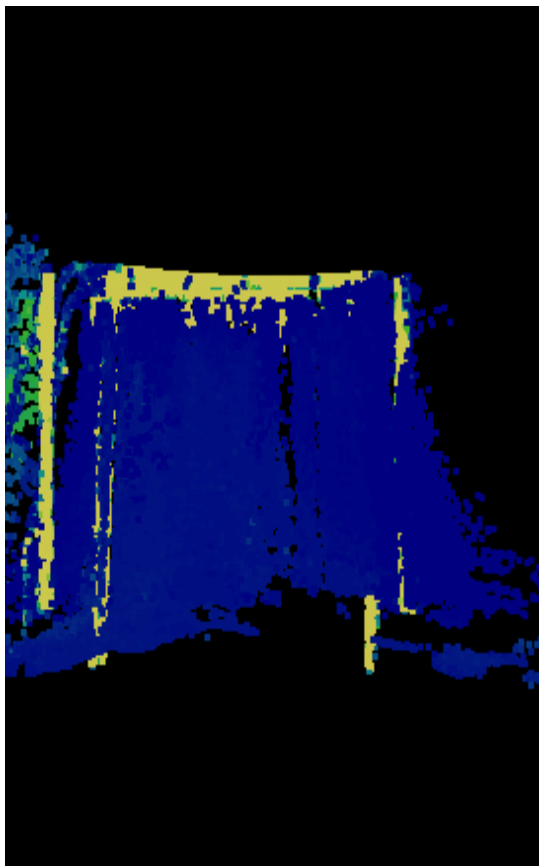
Obliczenie trajektorii ruchu

Realizacja trajektorii ruchu

Pozyskanie i interpretacja danych z sensorów



Badania własne lidaru



Badane zjawisko atmosferyczne	Odległość [m]			
	10	15	20	30
Deszcz (30 mm/h)	spadek o 3%	-	spadek o 47%	spadek o 71%
Śnieg (5 mm/h)	spadek o 29%	spadek o 53%	-	-

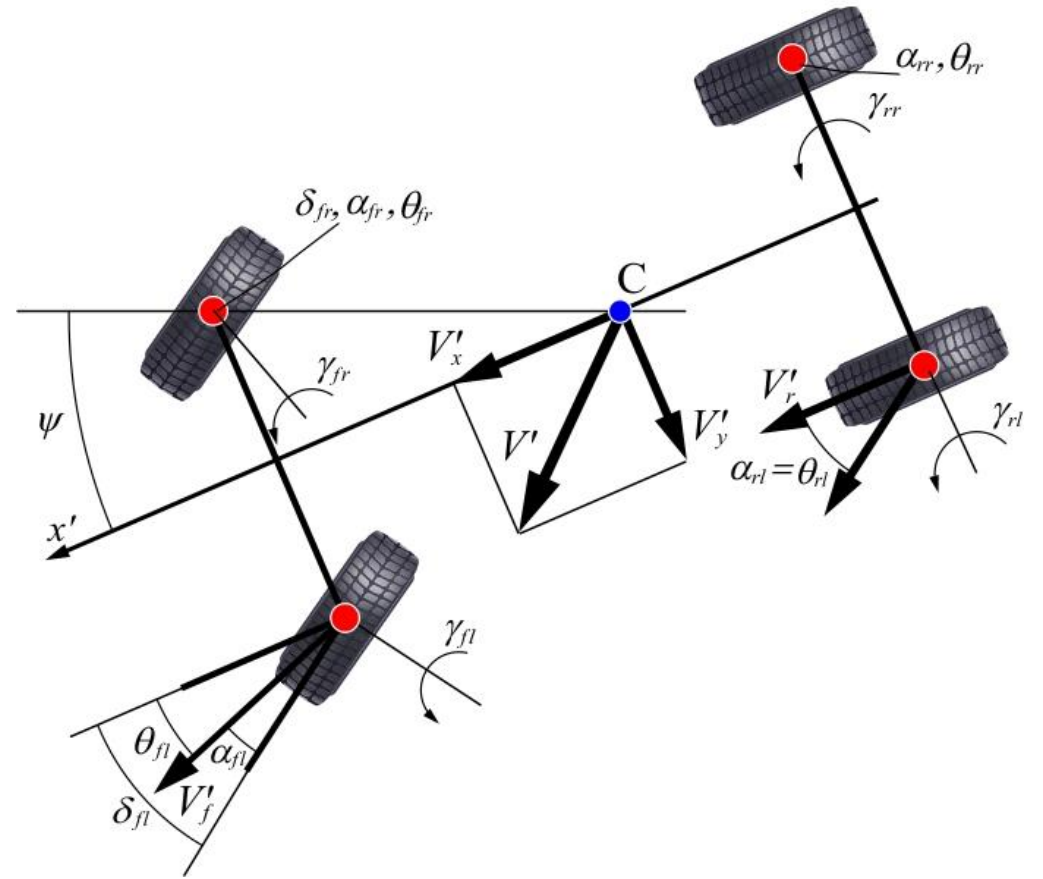
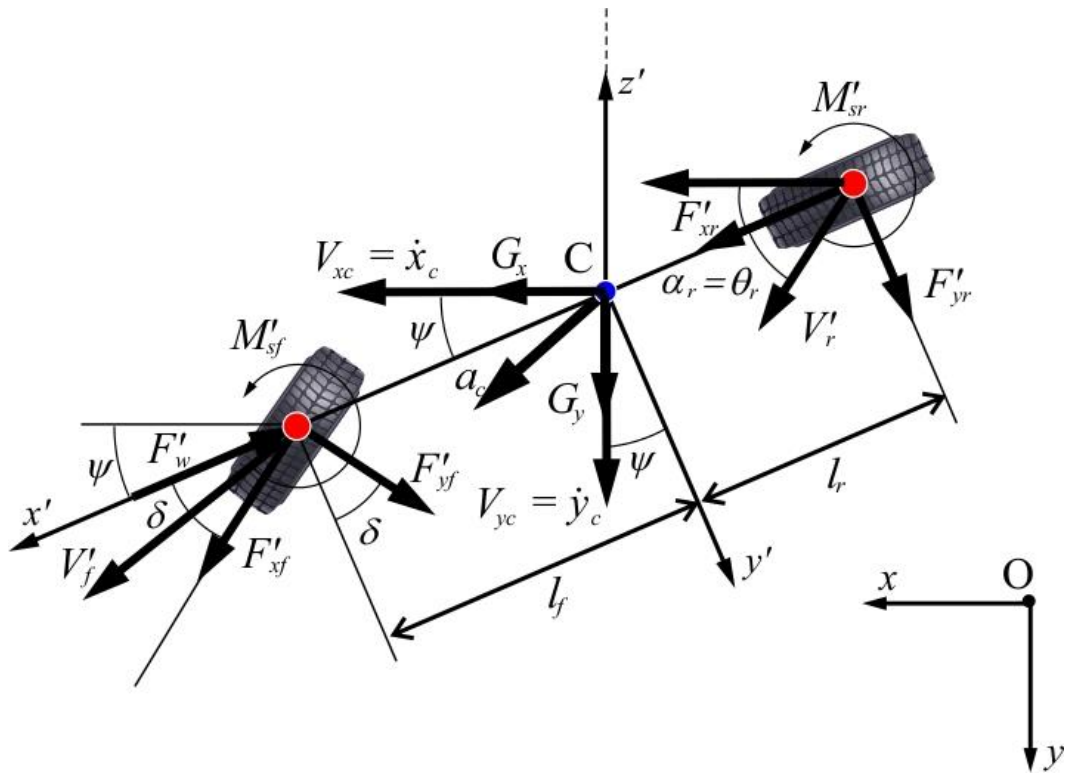
Model dynamiki samochodu autonomicznego



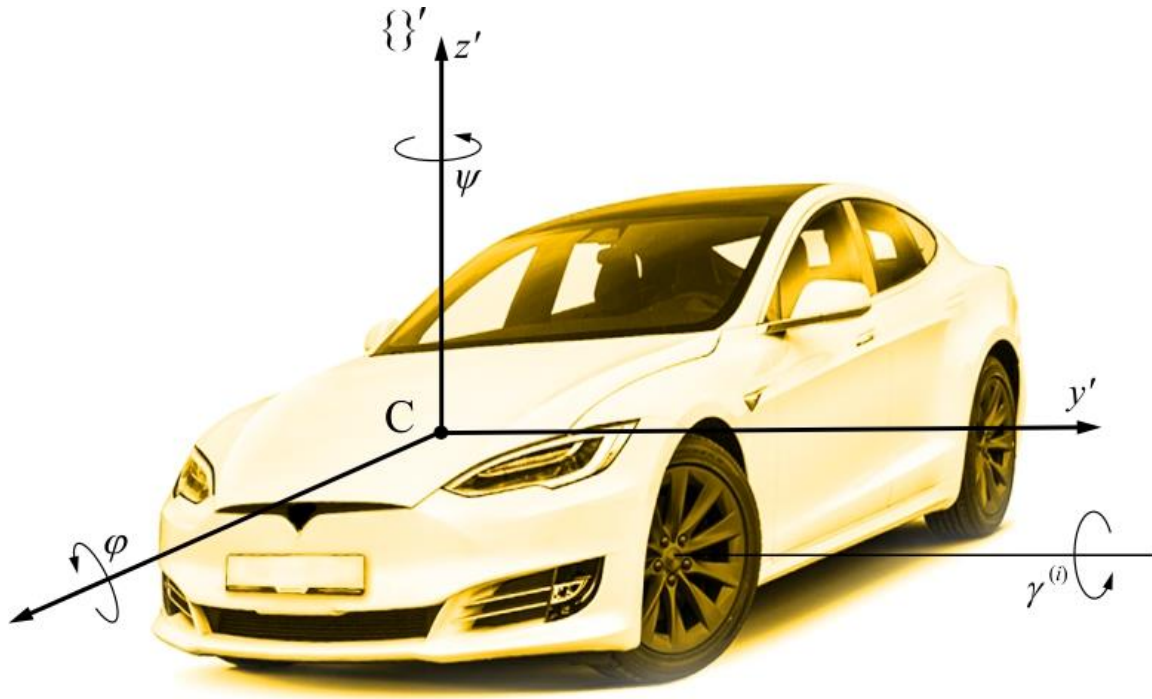
Wysoka efektywność
numeryczna

Odzwierciedlenie
rzeczywistych
warunków ruchu

3, 5, 7 czy 10 stopni swobody?



Model 10 DoF



$$m\dot{\mathbf{V}}_c = \sum_i \mathbf{F}_i$$

$$\frac{d\mathbf{k}_c}{dt} = \sum_i \mathbf{M}_{i_c}$$

$$I^{(i)}\ddot{\gamma}^{(i)} = \sum_j M_j^{(i)}, i = 1,2,3,4$$

$$\mathbf{r}_c = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\phi} = \begin{bmatrix} \varphi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_4 \\ q_5 \\ q_6 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\Gamma} = \begin{bmatrix} \gamma^1 \\ \gamma^2 \\ \gamma^3 \\ \gamma^4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_7 \\ q_8 \\ q_9 \\ q_{10} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{f}$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m\mathbf{I} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{M}\phi & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{I}_w \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_n \\ \mathbf{\Gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_c \\ \phi \\ \mathbf{\Gamma} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} \mathbf{G} + \mathbf{Q}_{\mathbf{r}_c}(\mathbf{F}'_w) + \sum_{i=1}^4 \mathbf{Q}_{\mathbf{r}_c}^{(i)}(\hat{\mathbf{F}}_i) \\ \mathbf{h}\phi + \mathbf{Q}_\phi(\mathbf{F}'_w) + \mathbf{P}\mathbf{M}' + \sum_{i=1}^4 \left(\mathbf{Q}_\phi^{(i)}(\hat{\mathbf{F}}_i) + \mathbf{Q}_\phi(\hat{M}_s^{(i)}) \right) \\ \mathbf{Q}'_w(\mathbf{M}_i) + \mathbf{Q}'_w(\hat{\mathbf{F}}_i) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{P}^T \mathbf{I}_c \mathbf{P} \ddot{\phi} + \mathbf{P}^T (\mathbf{I}_c \dot{\mathbf{P}} \dot{\phi} + \tilde{\omega}' \mathbf{I}_c \omega') = \mathbf{P}^T \sum_i \mathbf{M}_{i_c}$$

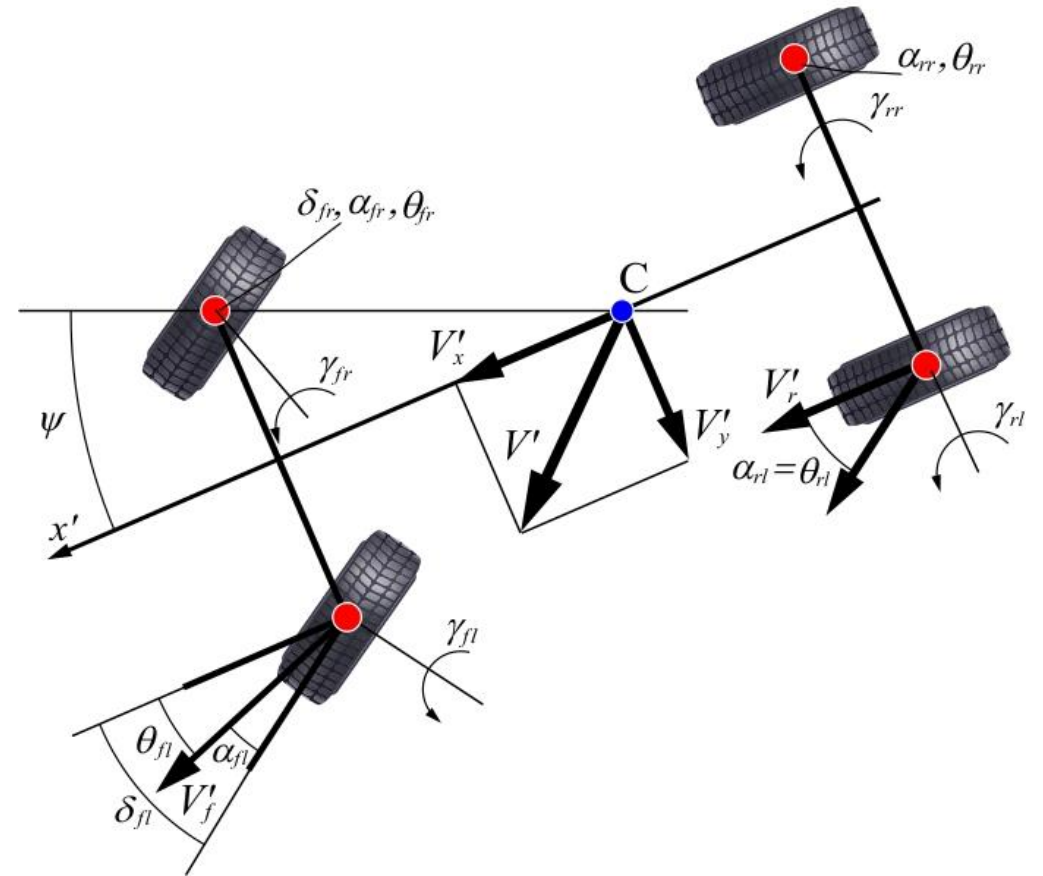
Reakcje jezdni – model Pacejki & Sharp
(Rajamani 2012)

Model 7 DoF

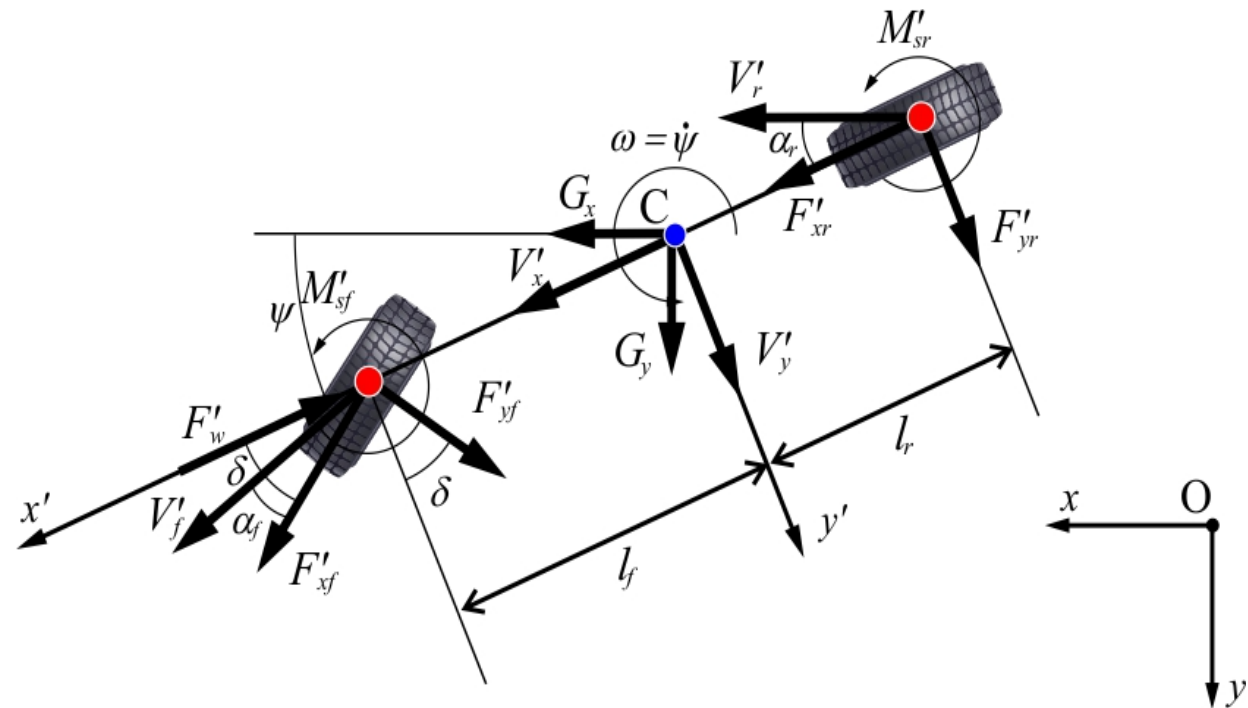
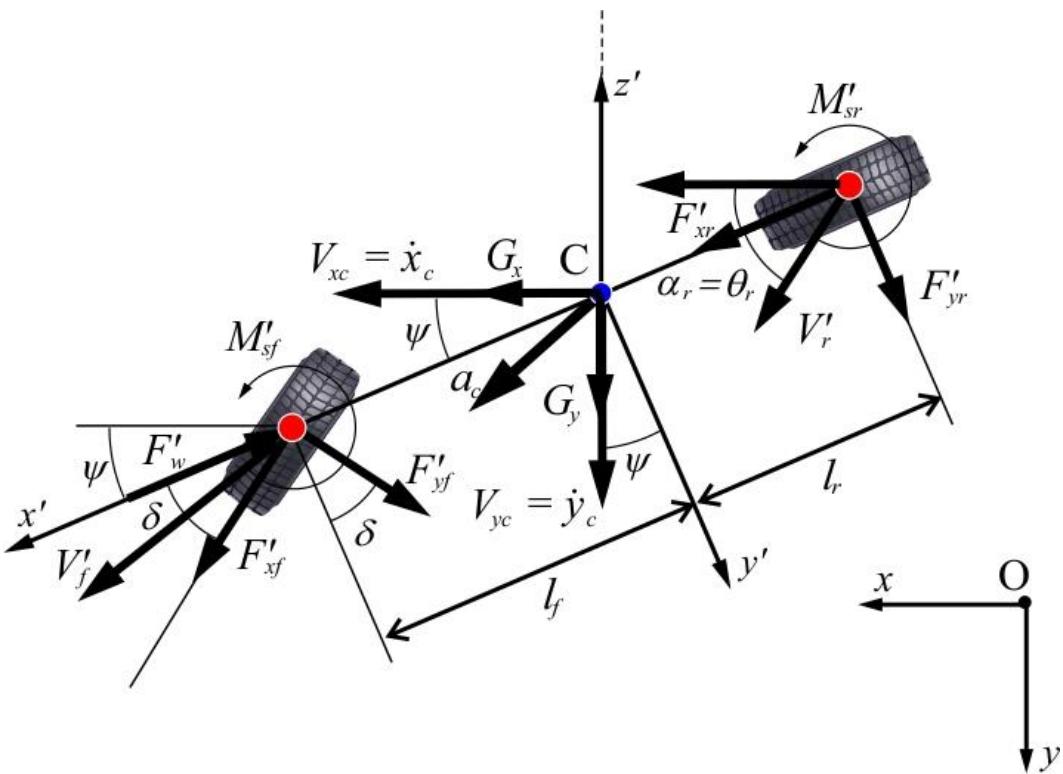
Wyznaczenie reakcji jezdni na koła

$$N^{(i)} = c^{(i)} [a^{(i)} \quad -b^{(i)} \quad -1] \begin{bmatrix} \theta \\ \psi \\ \Delta \end{bmatrix} = \mathbf{a}_i \begin{bmatrix} \theta \\ \psi \\ \Delta \end{bmatrix}$$

Model uwzględnia współrzędną z_c , oraz kąty θ i φ ale w sposób quasi-statyczny. Formalnie nie są to stopnie swobody, bo nie uwzględnia się ich przyspieszeń. Niemniej, są one używane w wyznaczaniu sił reakcji jezdni na koła.



Modele o 3 i 5 DoF



$$m \ddot{x}_c = F'_{xr} c \psi - F'_{yr} s \psi + F'_{xf} c(\delta + \psi) - F'_{yf} s(\delta + \psi) - F'_w c \psi + G_x$$

$$m \ddot{y}_c = F'_{xr} s \psi + F'_{yr} c \psi + F'_{xf} s(\delta + \psi) + F'_{yf} c(\delta + \psi) - F'_w s \psi + G_y$$

$$I'_z \ddot{\psi} = -F'_{yr} l_r + F'_{xf} l_f s \delta + F'_{yf} l_f c \delta + M'_{sr} + M'_{sf},$$

$$I'_{yr} \ddot{\gamma}_r = M_{nr} - M_{hr} - F'_{xr} r_{dr}$$

$$I'_{yf} \ddot{\gamma}_f = M_{nf} - M_{hf} - F'_{xf} r_{df}$$

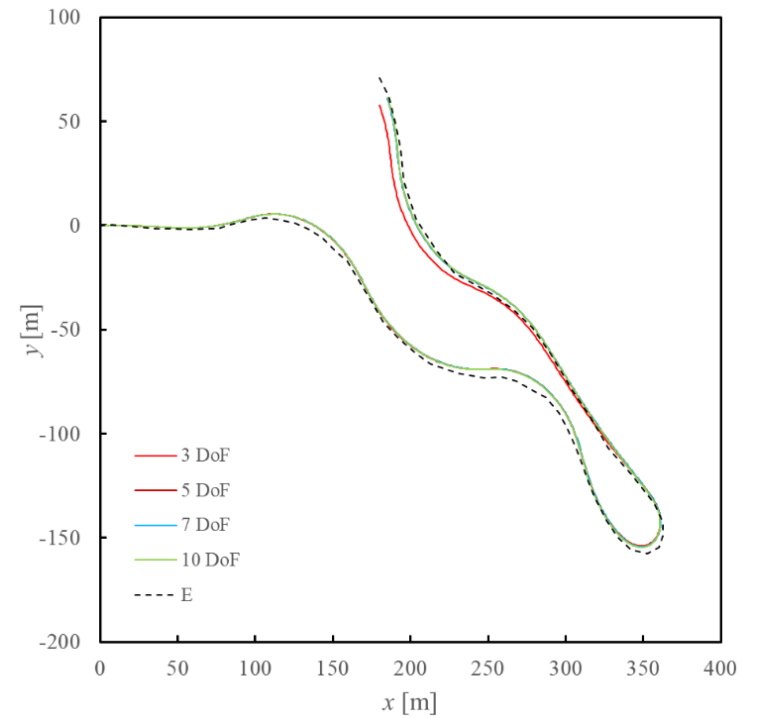
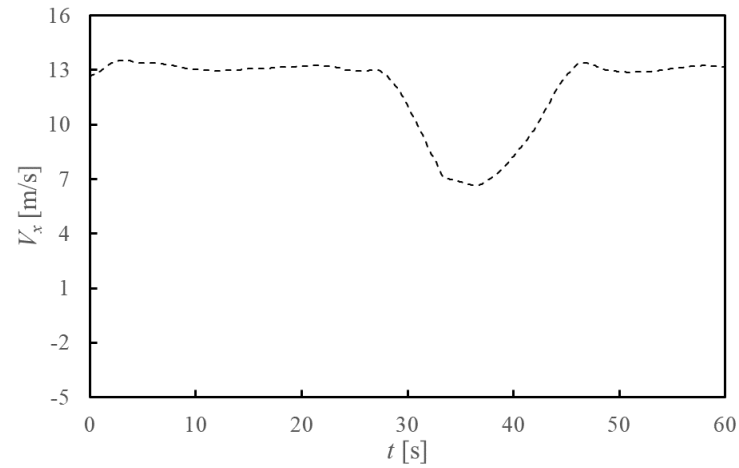
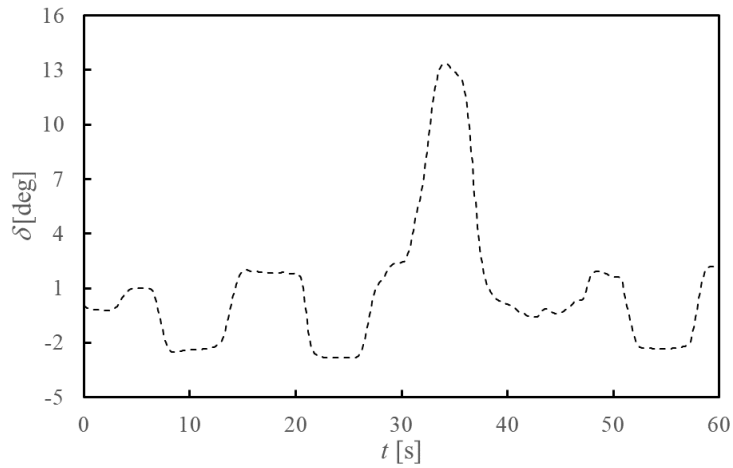
Aplikacja Komputerowa

Walidacja i weryfikacja modeli

Weryfikacja z wynikami
rzeczywistego eksperymentu

Walidacja z zastosowaniem
oprogramowania CarSim

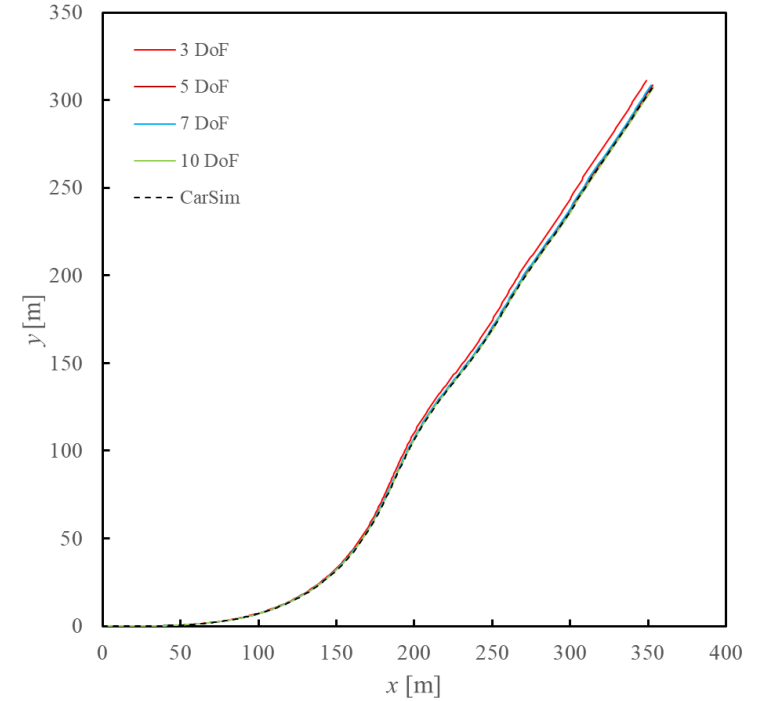
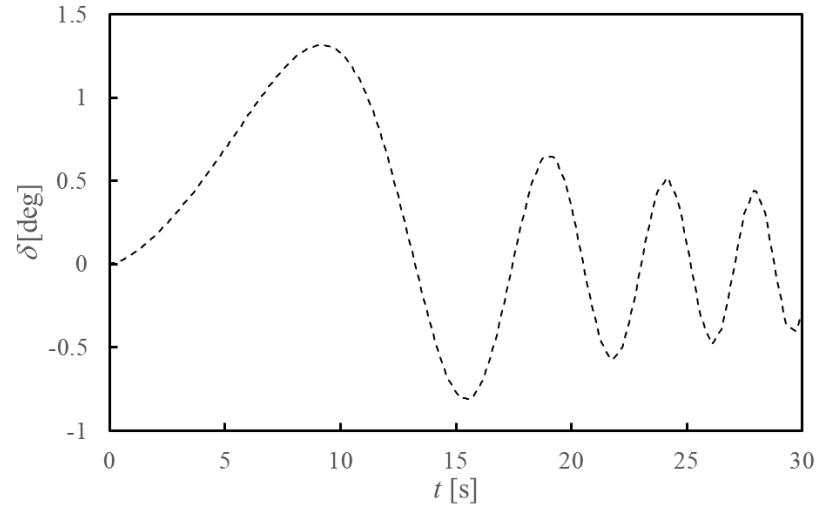
Weryfikacja



Parametr	$\bar{\delta}$				δ_{max}				$\delta_{sk} [-]$			
	3	5	7	10	3	5	7	10	3	5	7	10
ψ [deg/s]	0,535	0,517	0,513	0,284	3,874	3,975	3,890	3,891	0,368	0,389	0,360	0,368
x [m]	0,046	0,018	0,049	-	4,994	0,144	0,412	-	1,781	0,081	0,205	-
y [m]	0,037	0,015	0,054	-	3,756	0,322	0,455	-	1,382	0,180	0,243	-



Walidacja



Parametr	$\bar{\delta}$				δ_{max}				$\delta_{sk} [-]$			
	3	5	7	10	3	5	7	10	3	5	7	10
x [m]	1,521	0,349	0,305	0,187	3,843	0,745	0,630	0,522	1,977	0,417	0,360	0,242
y [m]	1,718	0,612	0,566	0,154	3,584	1,018	0,914	0,355	2,061	0,696	0,642	0,195
ψ [deg]	0,668	0,243	0,233	0,219	1,192	0,647	0,623	0,488	0,629	0,313	0,299	0,201
$\dot{\psi}$ [deg/s]	0,152	0,128	0,126	0,127	0,340	0,306	0,301	0,307	0,155	0,114	0,113	0,110
φ [deg]	-	-	-	0,024	-	-	-	0,051	-	-	-	0,037
$\dot{\varphi}$ [deg/s]	-	-	-	0,033	-	-	-	0,109	-	-	-	0,116

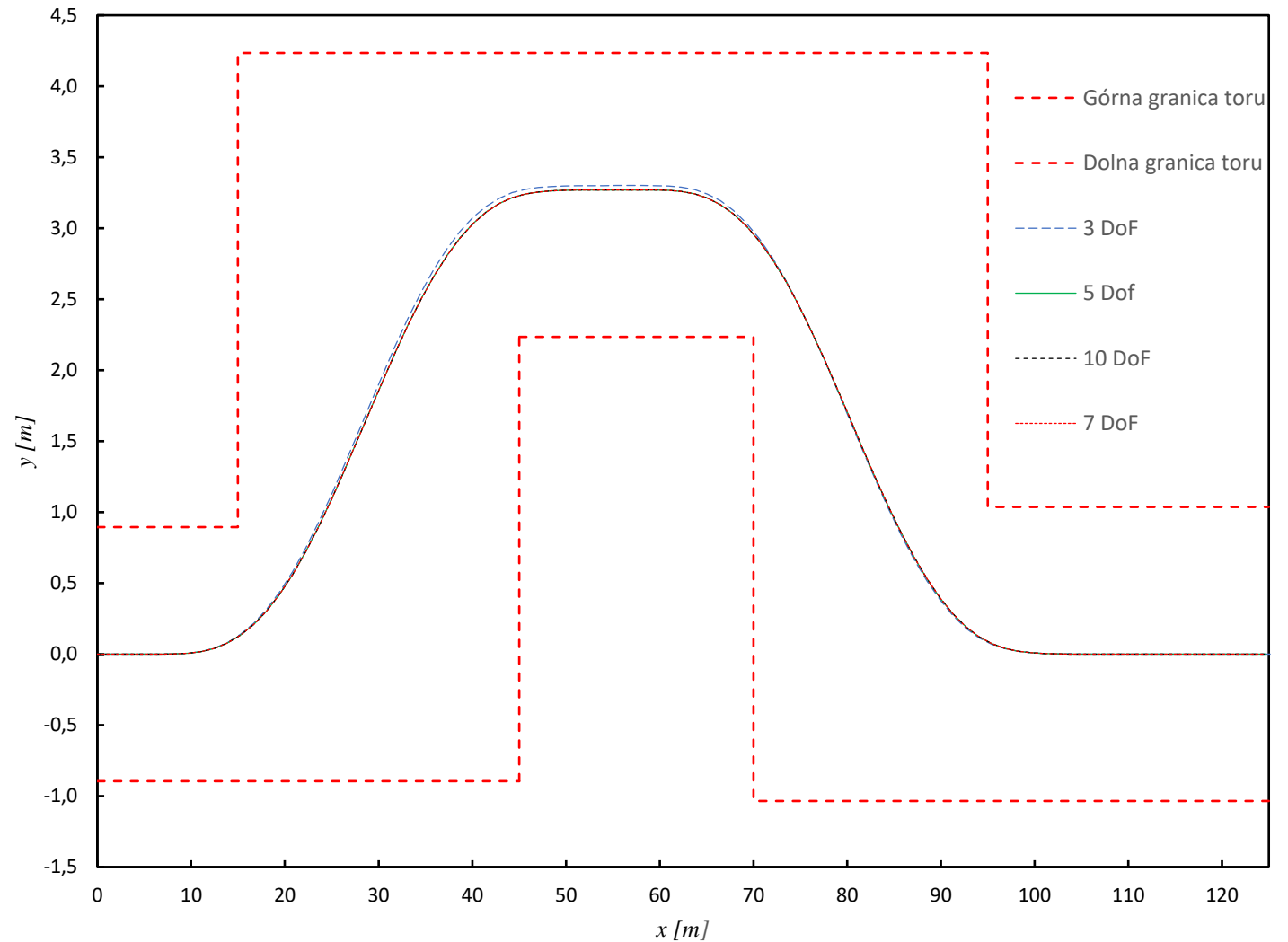
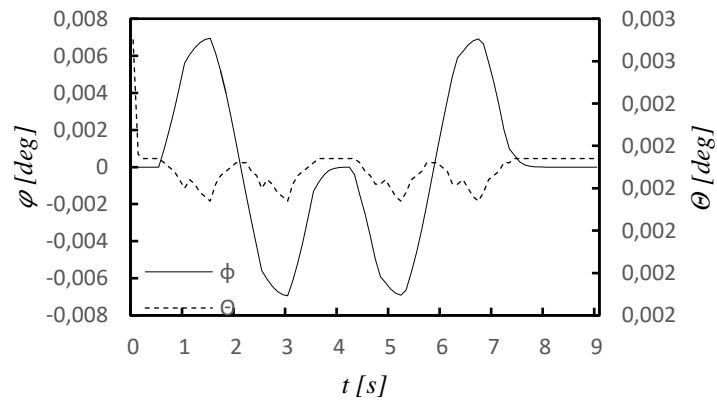
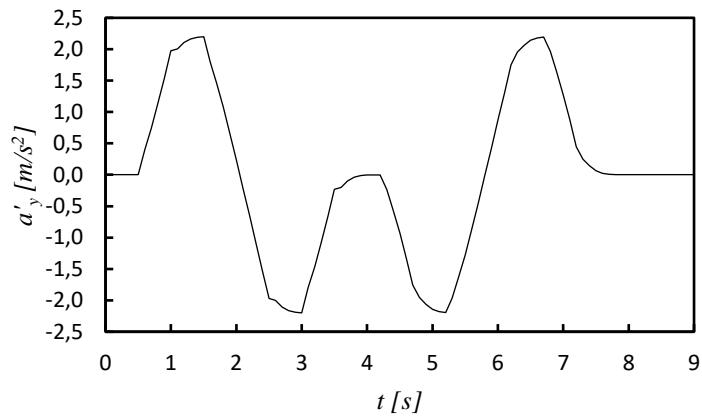
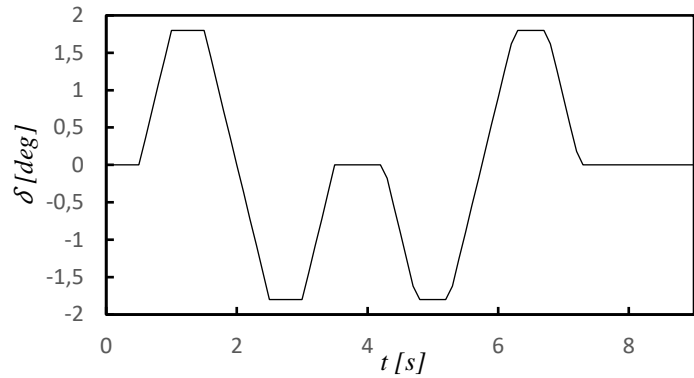
Efektywność numeryczna modeli

Symulowano jazdę po łuku w czasie 30 s z prędkością $V_x' = 80 \text{ km/h}$

Liczba stopni swobody modelu	Krok całkowania	Czas obliczeń [s]	Maksymalny krok całkowania	Minimalny czas obliczeń [s]	Droga pokonana przez pojazd w czasie trwania obliczeń [m]
3	0,004	0,018	0,010	0,008	0,18
3		0,018	0,010	0,008	0,18
5		0,033	0,004	0,033	0,73
7		0,111	0,004	0,111	2,47
10		0,276	0,004	0,276	6,14

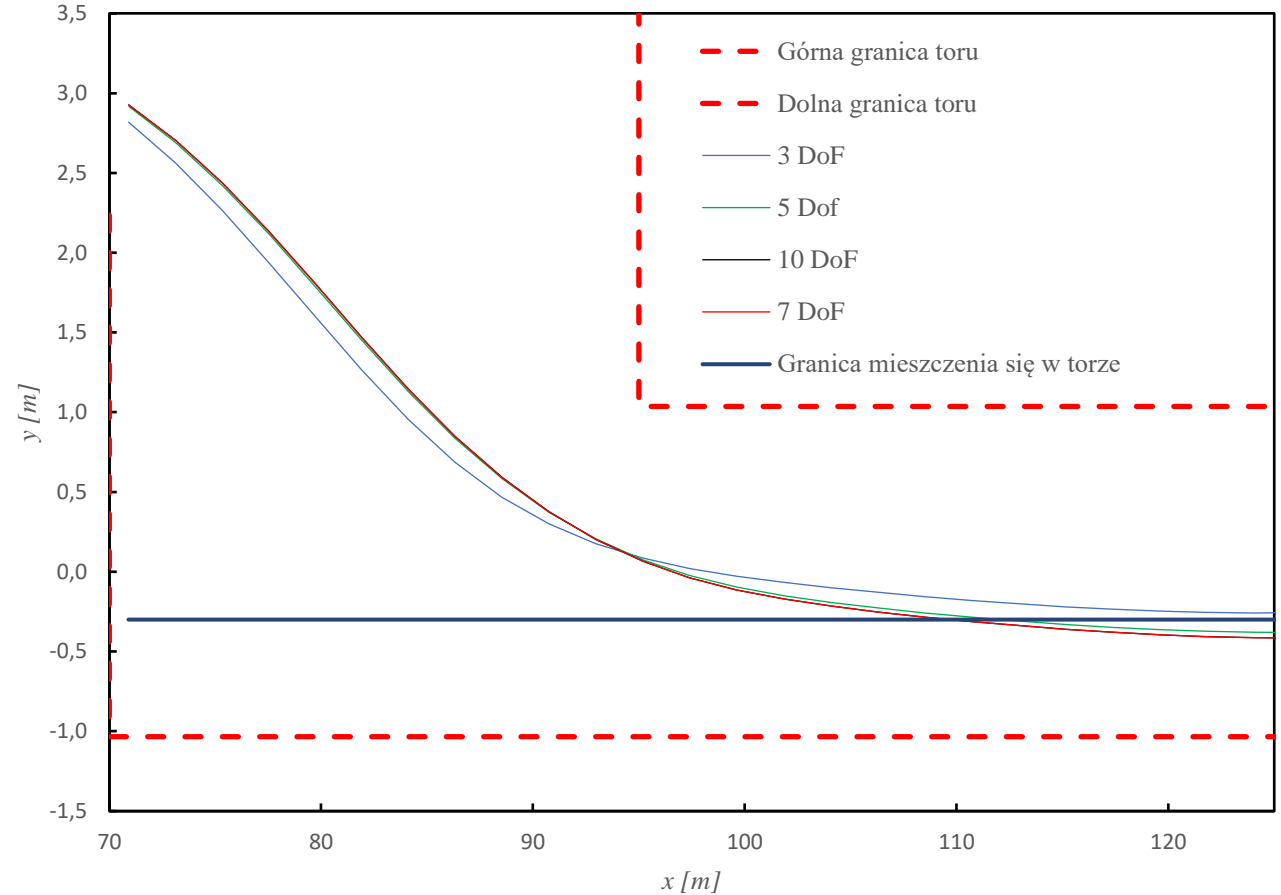
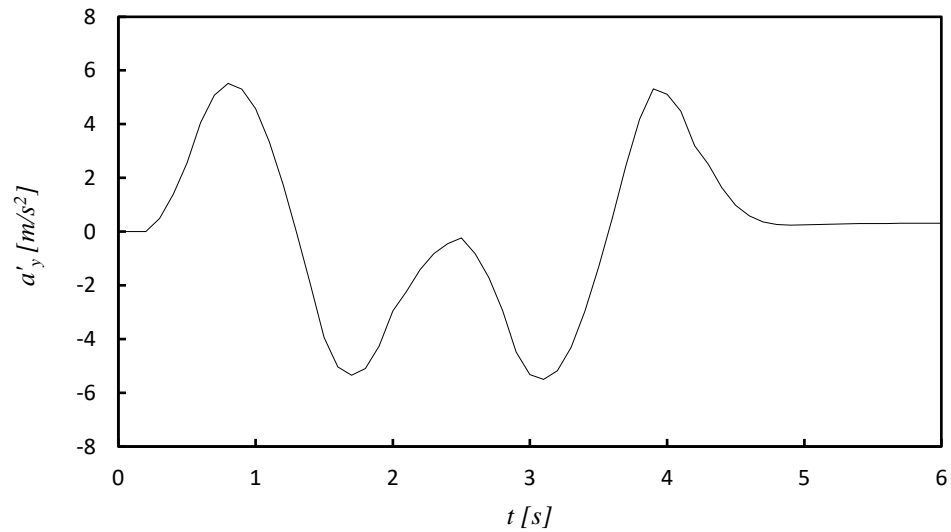
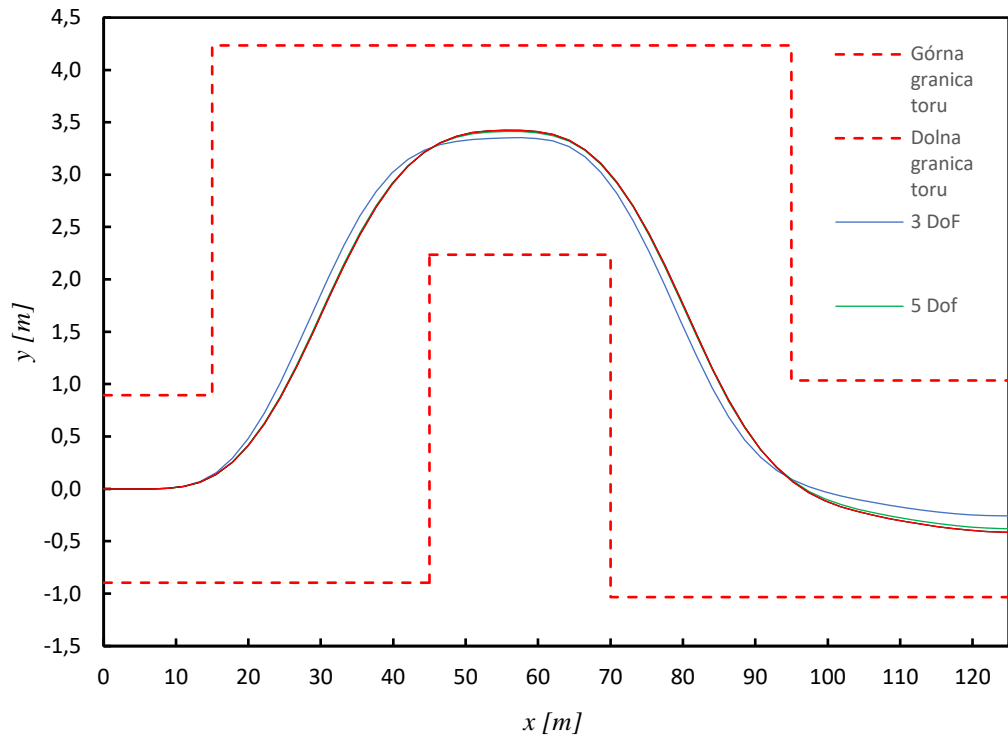
Badania symulacyjne: ISO 3888-1

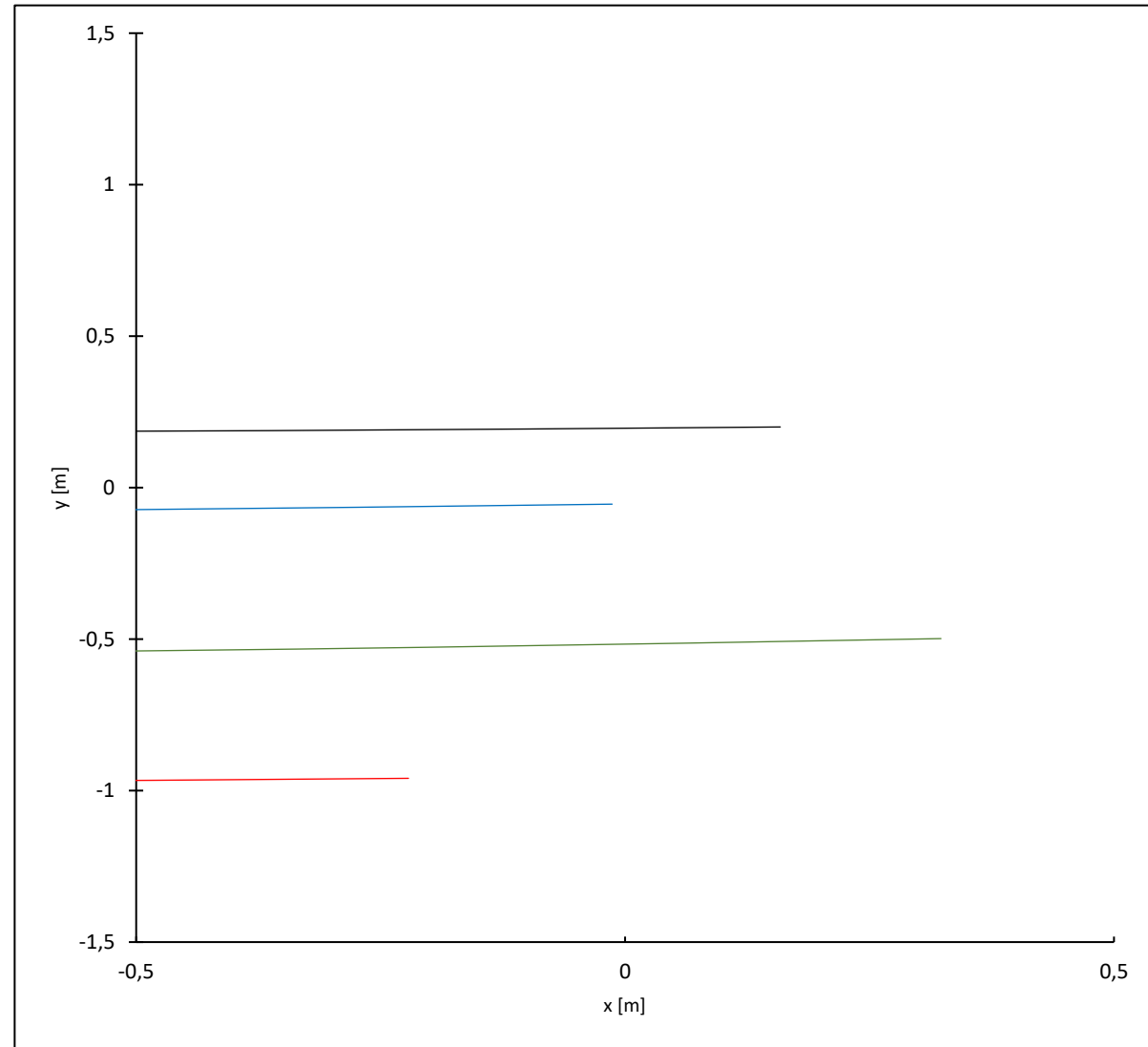
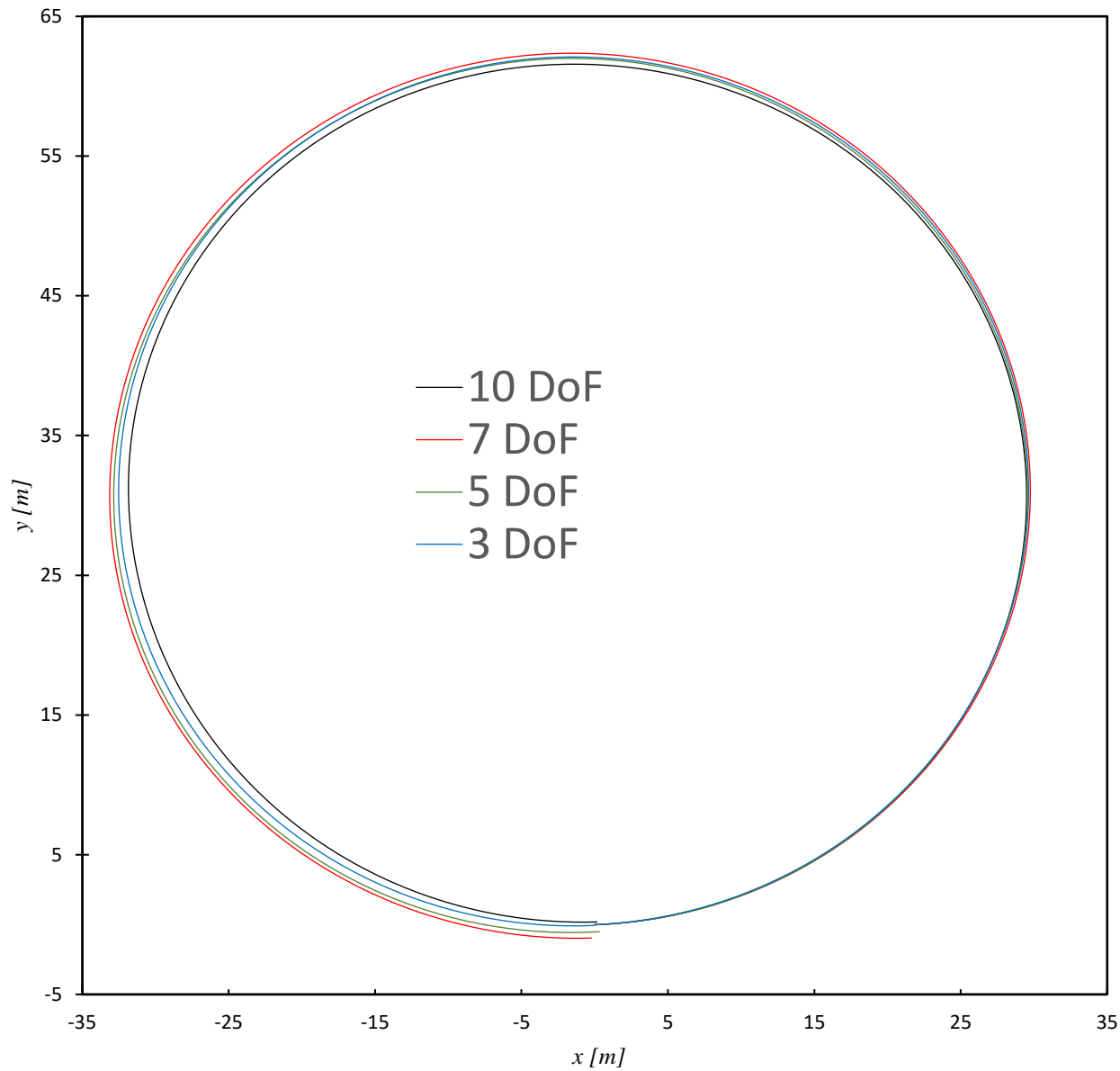
$$V'_x = 50 \text{ km/h}$$



Badania symulacyjne: ISO 3888-1

$$V'_x = 80 \text{ km/h}$$

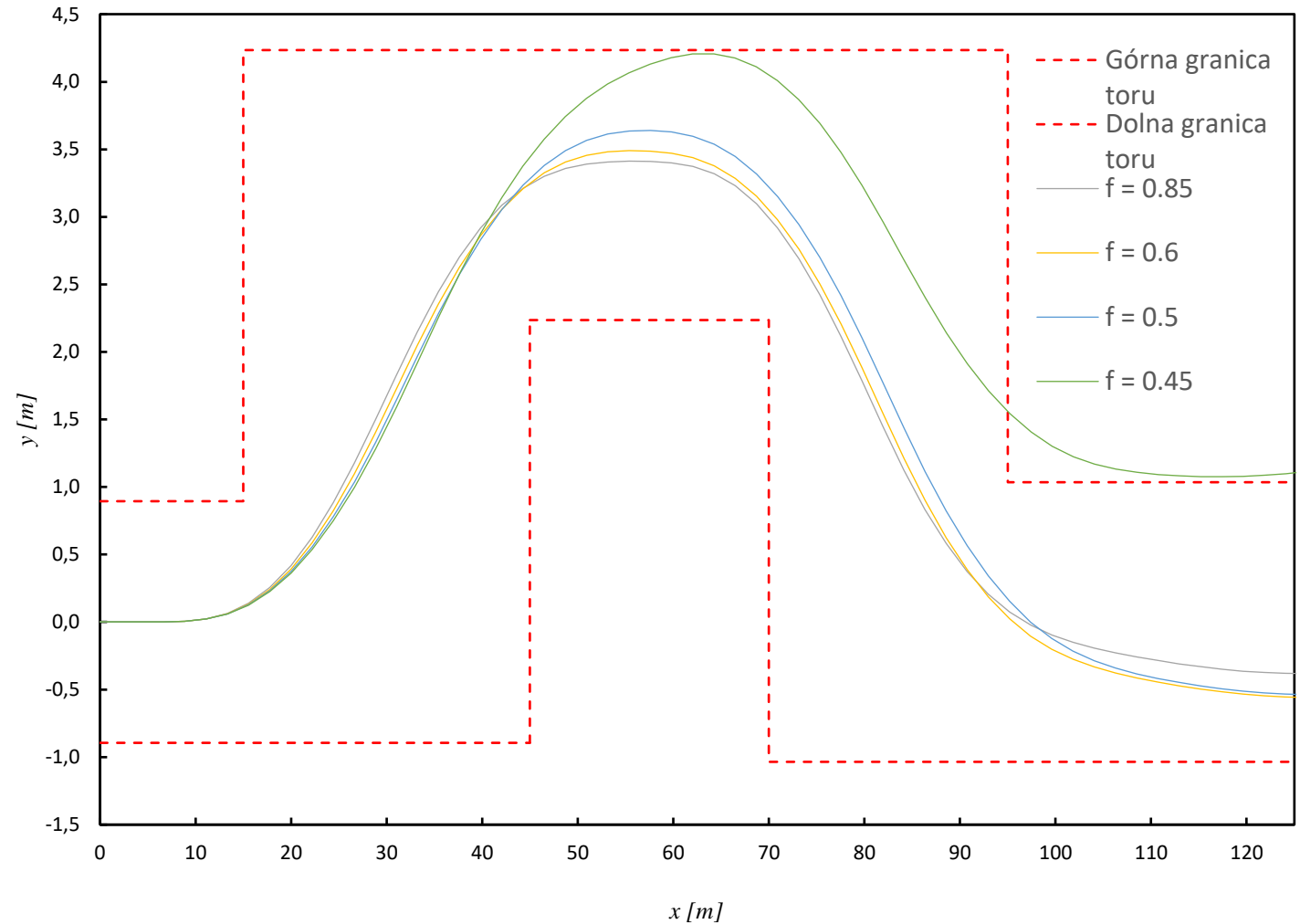




Badania symulacyjne: ISO 4138

Pozostałe badania symulacyjne

- Wpływ mas skupionych do nadwozia pojazdu
- Wpływ wiatru
- Wpływ współczynnika przyczepności



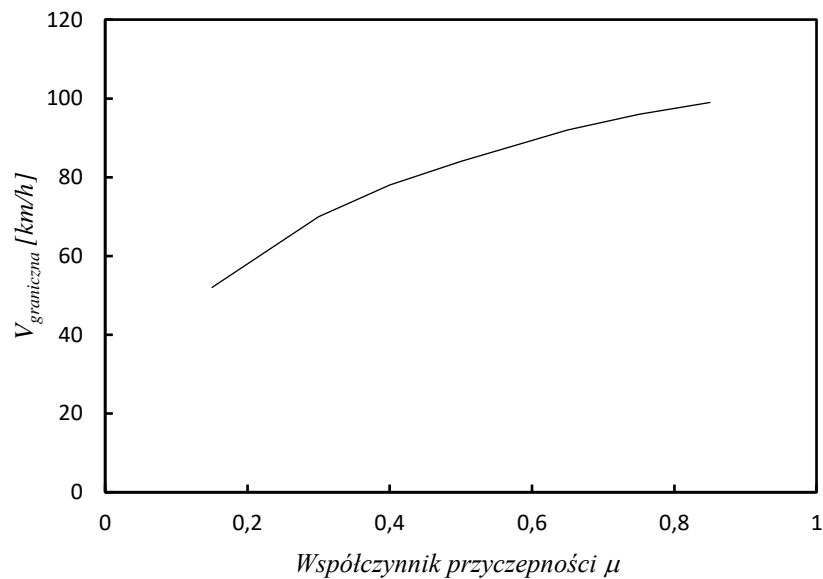
Ocena przydatności poszczególnych modeli do modelowania ruchu samochodu autonomicznego

Model	Mocne strony	Słabe strony	Ocena
3 DoF	<ul style="list-style-type: none"> Bardzo dobra efektywność numeryczna. 	<ul style="list-style-type: none"> Brak możliwości uwzględnienia współczynnika przyczepności. Niedokładny dla intensywnych manewrów 	warunkowo pozytywna
5 DoF	<ul style="list-style-type: none"> Dobra efektywność numeryczna. Możliwość uwzględniania ruchu obrotowego koła. 	<ul style="list-style-type: none"> Niedokładny dla ekstremalnych manewrów 	pozytywna
7 DoF	<ul style="list-style-type: none"> Możliwość uwzględniania ruchu obrotowego kół. Możliwość uwzględniania kątów pochylenia i przechylenia. Dobre odwzorowanie trajektorii ruchu pojazdu 	<ul style="list-style-type: none"> Umiarkowana efektywność numeryczna 	warunkowo pozytywna
10 DoF	<ul style="list-style-type: none"> Możliwość uwzględniania ruchu obrotowego kół. Możliwość uwzględniania kątów pochylenia i przechylenia. Bardzo dobre odwzorowanie trajektorii ruchu pojazdu 	<ul style="list-style-type: none"> Niska efektywność numeryczna 	warunkowo pozytywna

Manewr intensywnego hamowania

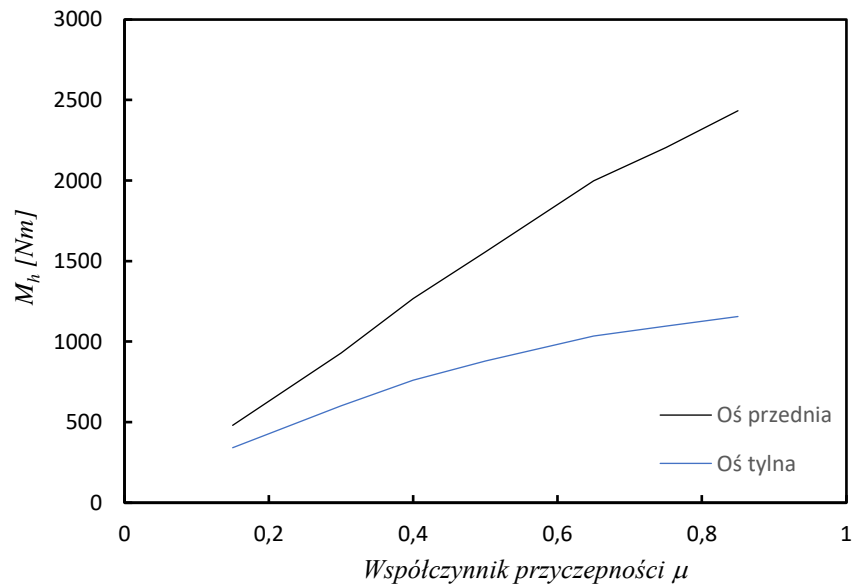
Droga hamowania $S [m]$	Rodzaj nawierzchni	Współczynnik przyczepności μ	Prędkość graniczna $V'_x [km/h]$	Maksymalne Opóźnienie $a_h [m/s^2]$	Współczynnik ξ
100	Suchy beton	0,85	106	8,40	2,14
	Suchy asfalt	0,75	104	7,34	2,03
	Mokry beton	0,65	98	6,36	1,93
	Mokry asfalt	0,5	90	4,91	1,77
	Kostka brukowa	0,4	83	3,79	1,65
	Ubity śnieg	0,3	74	2,92	1,55

Manewr intensywnego hamowania



μ	$V_x' \left[\frac{km}{h} \right]$	$S_r [m]$	$S_b [m]$	$t [s]$	$M_b [Nm]$	$M_f [Nm]$	$M_r [Nm]$	$a_h \left[\frac{m}{s^2} \right]$
0.85	68	22,67	27,33	4,09	3590	2434	1156	8,41
0.75	66	22,00	28,00	4,25	3301	2205	1096	7,36
0.65	64	21,33	28,67	4,42	3032	1998	1034	6,38
0.5	59	19,67	30,33	4,90	2435	1556	879	4,91
0.4	55	18,33	31,67	5,34	2027	1267	760	3,92

Intensywne hamowanie na drodze $S = 50 \text{ m}$.



Realizacja trasy z punktu A do punktu B

- **trasa** to punkty, które pojazd powinien osiągnąć w trakcie ruchu (maksymalnie się do nich zbliżyć),
- **ścieżka** to przedstawienie funkcji opisującej (aproksymującej) trasę,
- **trajektoria** to przemieszczenie środka masy pojazdu wyznaczone za pomocą algorytmu sterowania kątem skrętu kół, zbudowanego na bazie zależności geometrycznych.
 - Prędkość jest znaną funkcją czasu (drogi)

Realizacja trasy z punktu A do punktu B

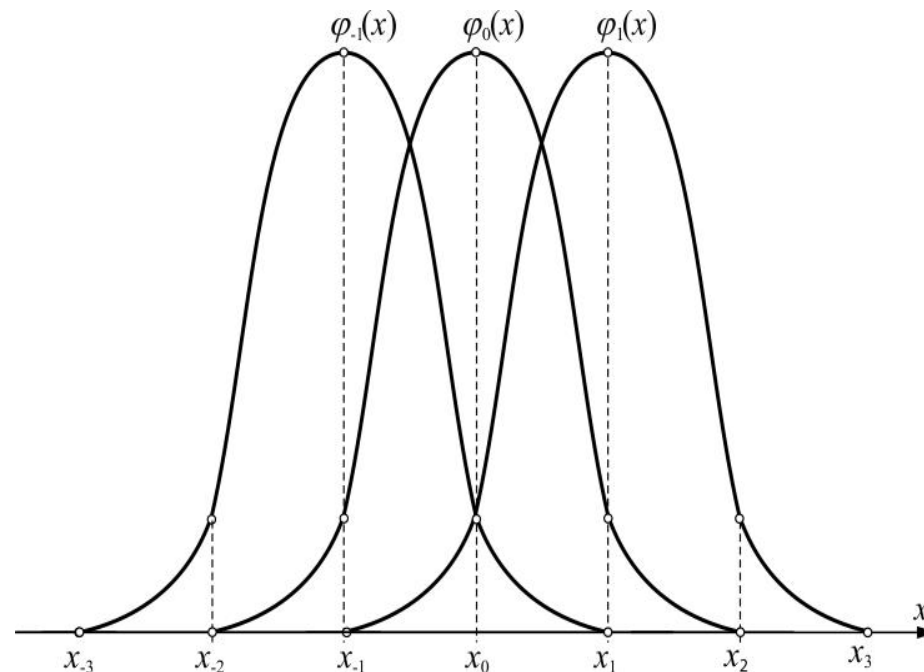
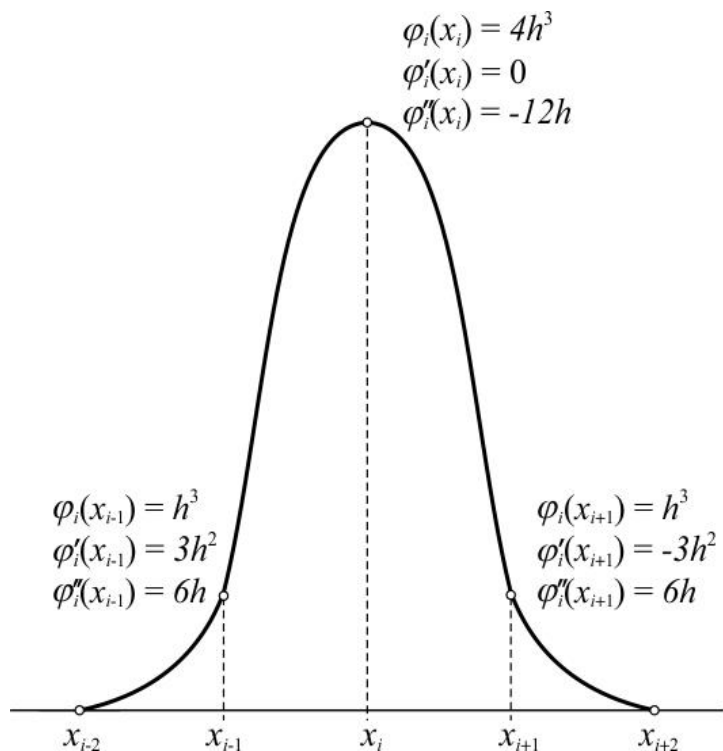
Wyznaczenie
ścieżki przejazdu
(funkcja
aproksymująca)

obliczenie
wstępnego
przebiegu kąta
skrętu kół,

Wygładzenie
przebiegu kąta
skrętu kół przy
zastosowaniu
metod
optymalizacji,

sterowanie za
pomocą
kontrolerów z
uwzględnieniem
ograniczeń
kinematycznych i
geometrycznych

Funkcije sklejane B3



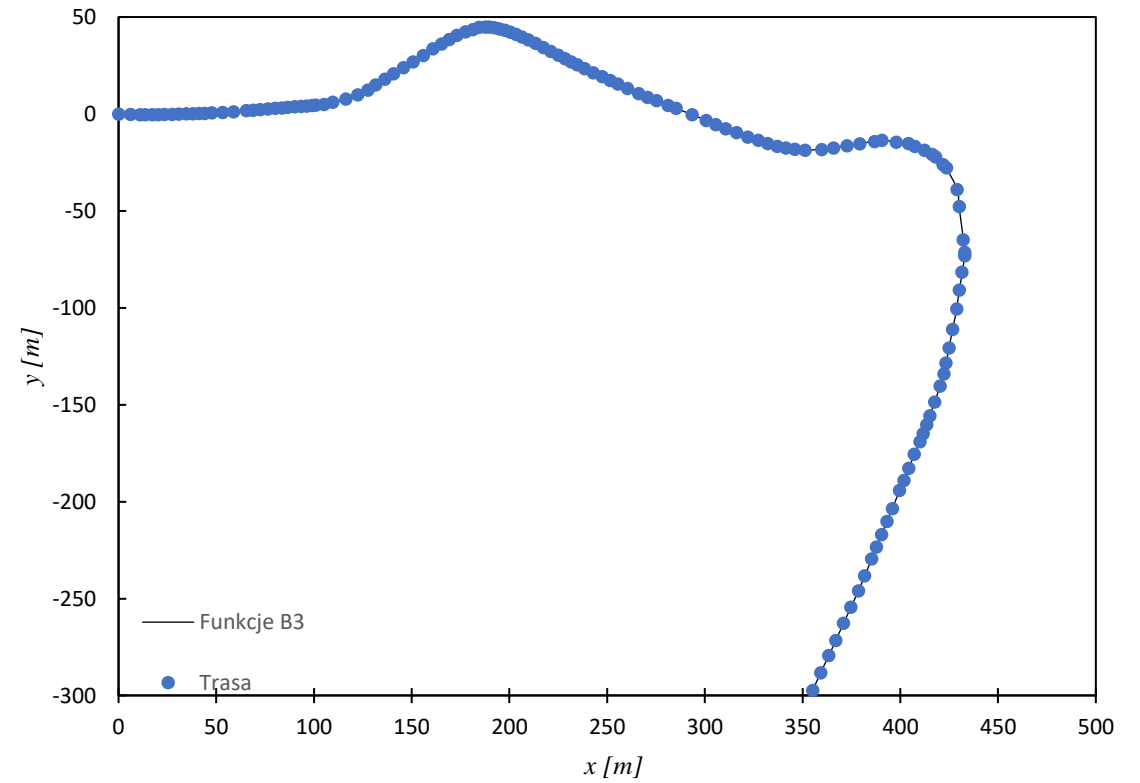
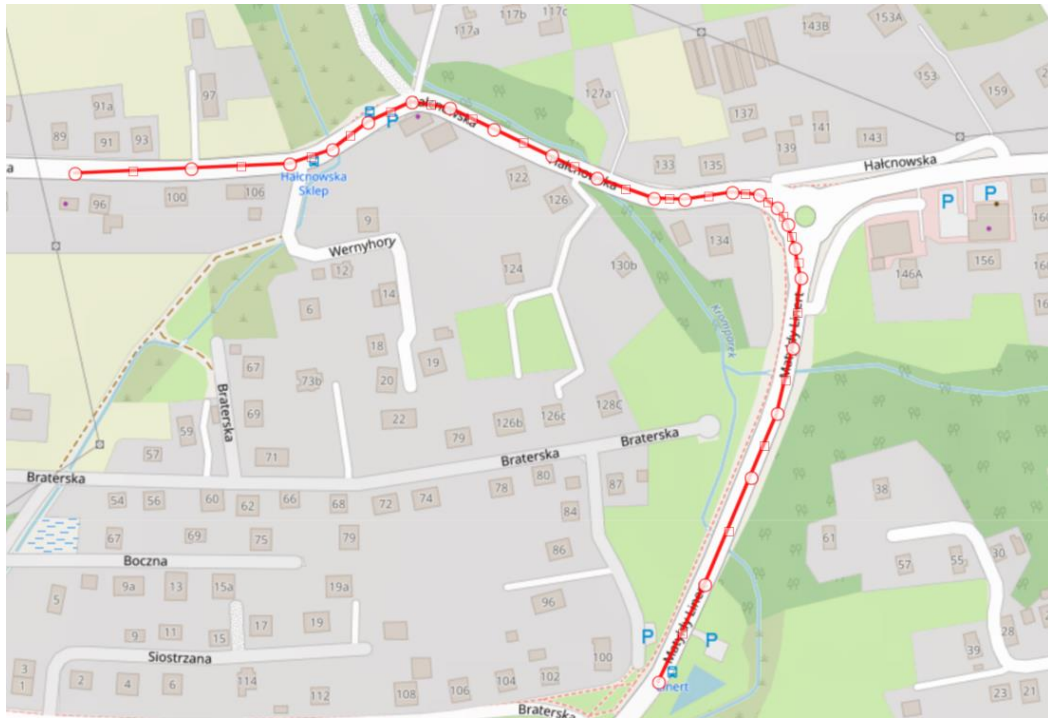
$$x(s) = \sum_{i=-1}^{n+1} a_i^x \varphi_i(s)$$

$$y(s) = \sum_{i=-1}^{n+1} a_i^y \varphi_i(s)$$

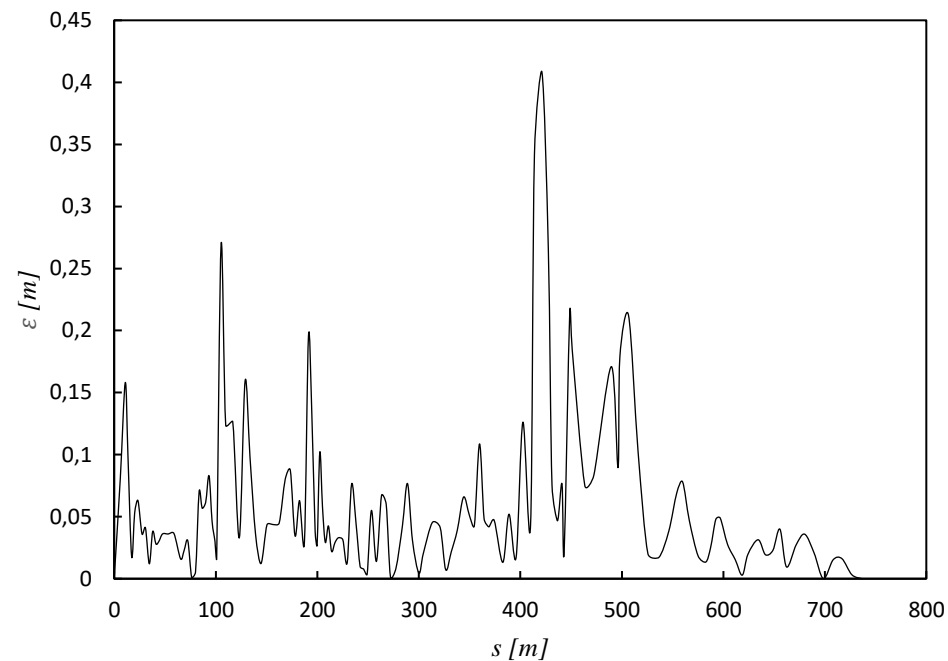
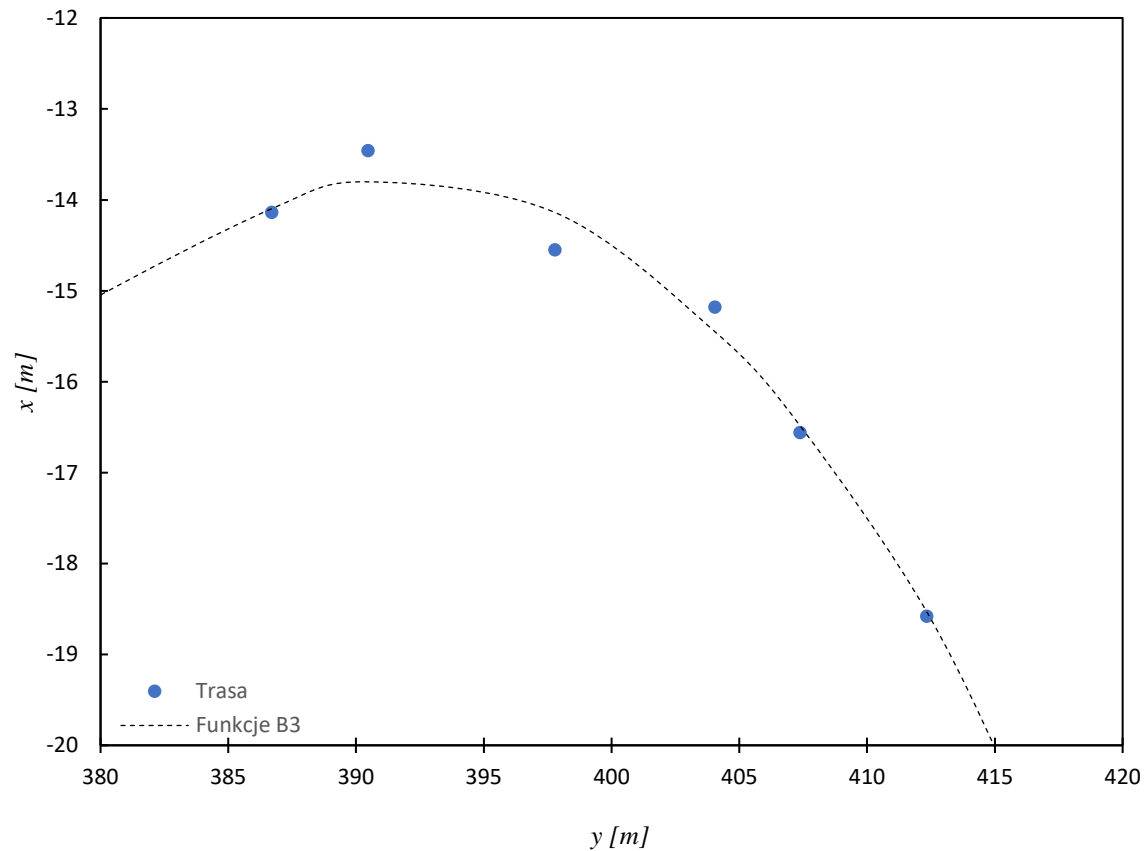
$$\Omega_x(a_{-1}^x \dots a_{n+1}^x) = \sum_{i=0}^m [x(s_i) - x_i^e]^2 \rightarrow \min$$

$$\Omega_y(a_{-1}^y \dots a_{n+1}^y) = \sum_{i=0}^m [y(s_i) - y_i^e]^2 \rightarrow \min$$

Trasa Hałcnów (1) punkty trasy



Trasa Hałcnów (2) wyznaczenie ścieżki



Błąd (różnica między trasą, a ścieżką)	Liczba przedziałów p	
	1	6
$\varepsilon_{x \max} [m]$	0,18	0,10
$\varepsilon_{y \max} [m]$	0,34	0,38
$\varepsilon_{x,y \max} [m]$	0,41	0,45
$\bar{\varepsilon} [m]$	0,06	0,06

Rajamani

Stanley
Control

Algorytmy doboru kąta skrętu kół

Pure Pursuit

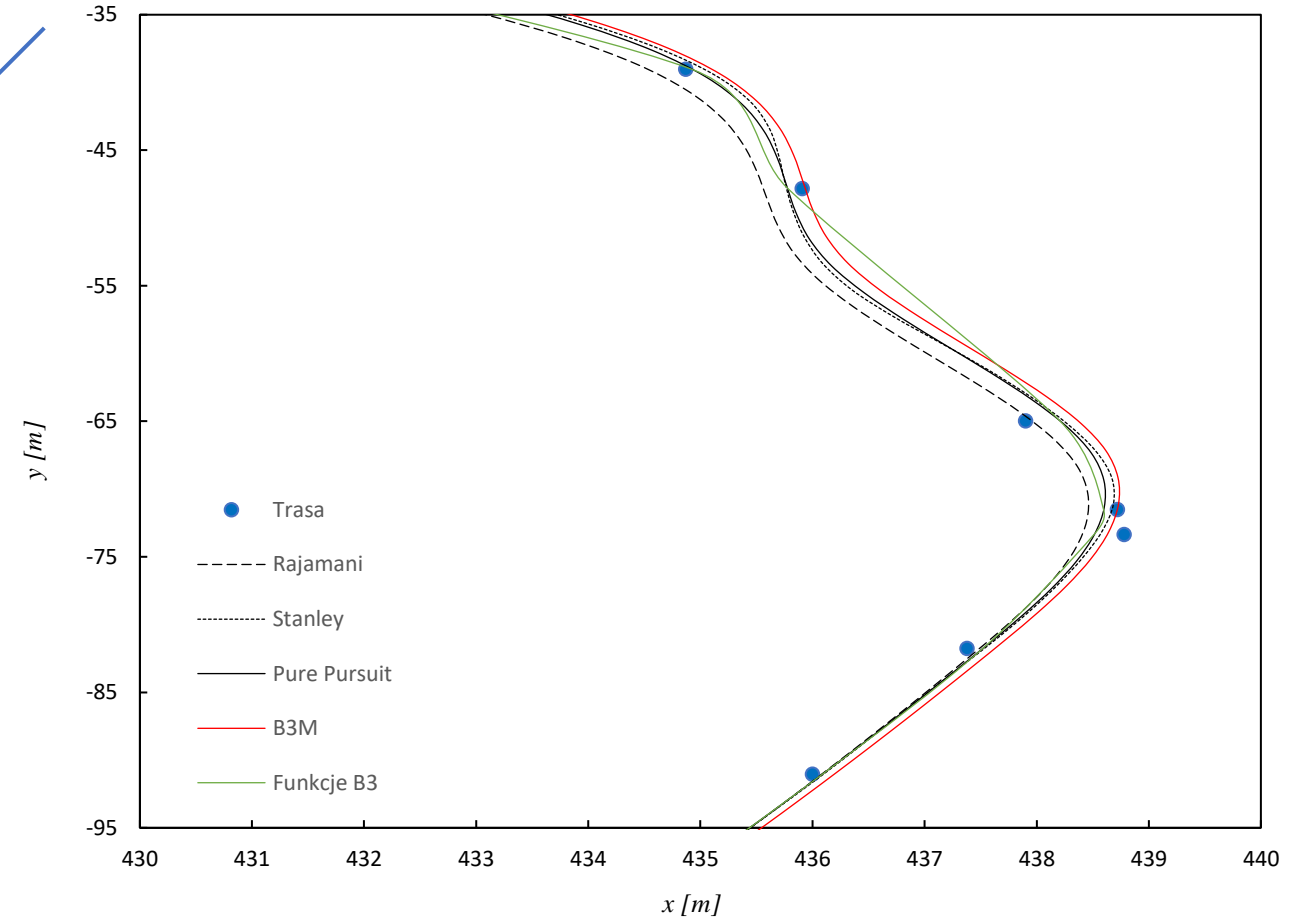
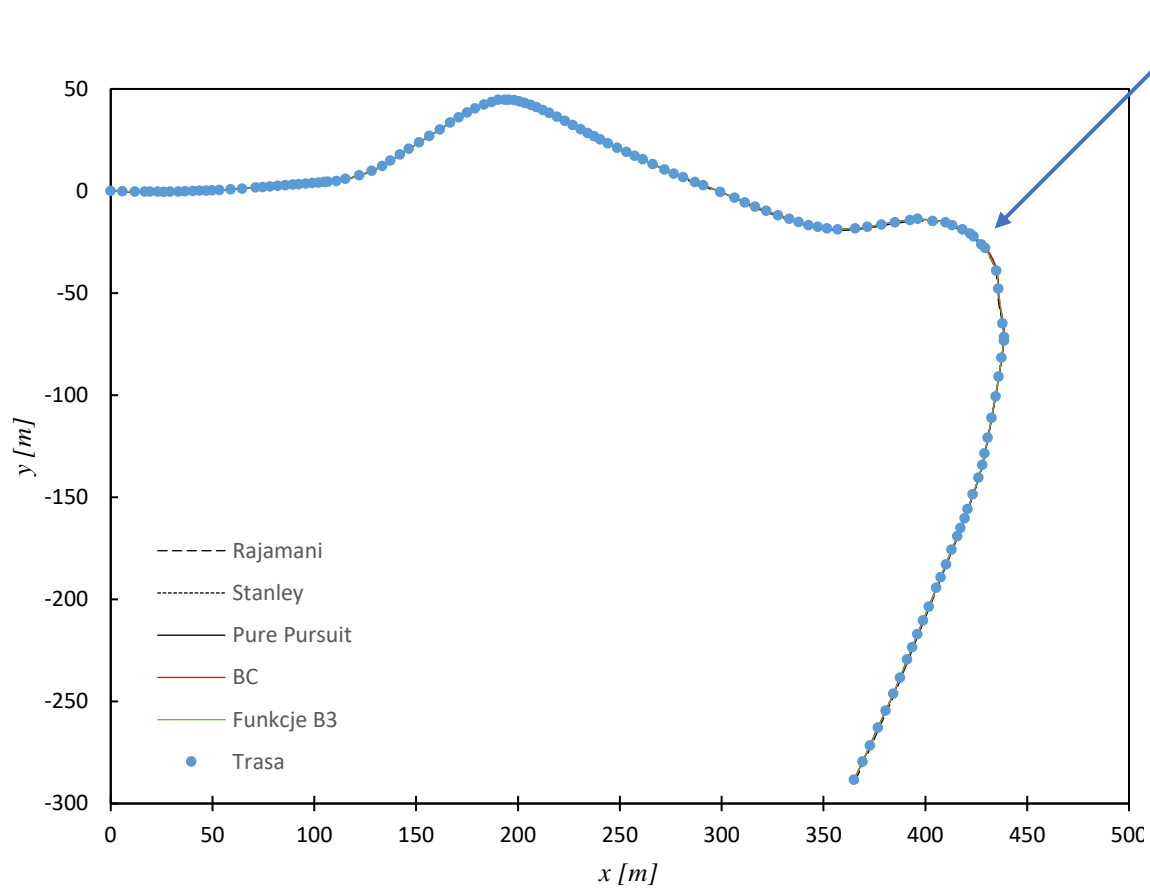
B3M

Algorytm B3M

- Bazujący na równaniach ruchu dla modelu o 3 stopniach swobody
- Nie wymagający empirycznego ustalania parametrów
- Efektywny numerycznie

$$\delta = \frac{1}{C_{\alpha_f}} \left[F'_{yf} + F'_{yr} + C_{\alpha_f} \theta_f + C_{\alpha_r} \theta_r \right]$$

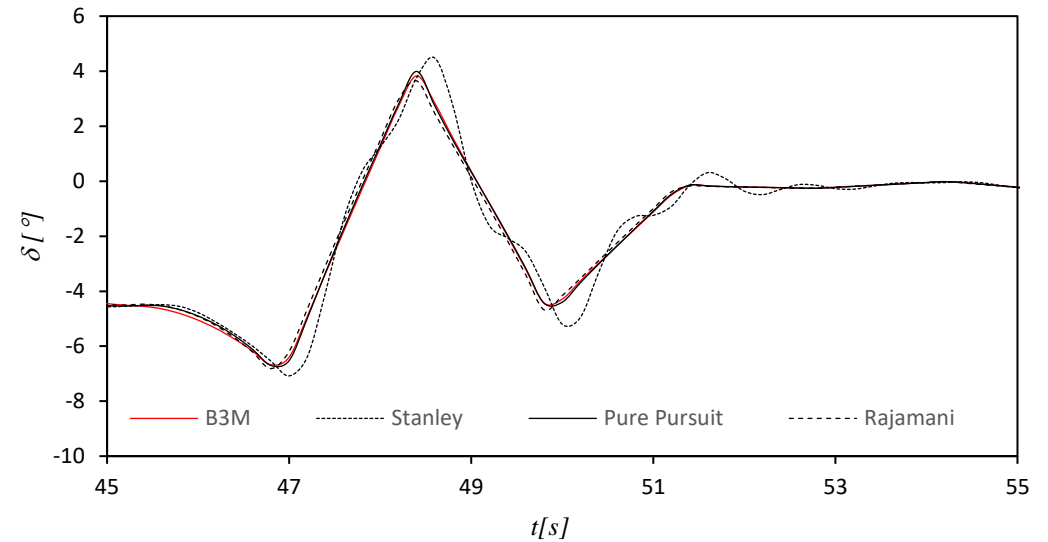
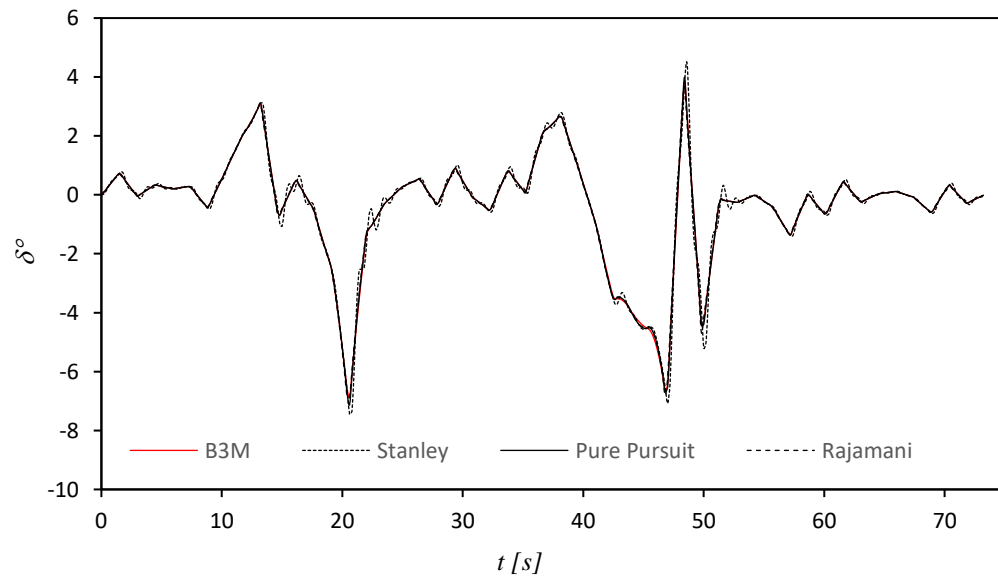
Obliczenie trajektorii ruchu pojazdu, śledzenie ścieżki (1)



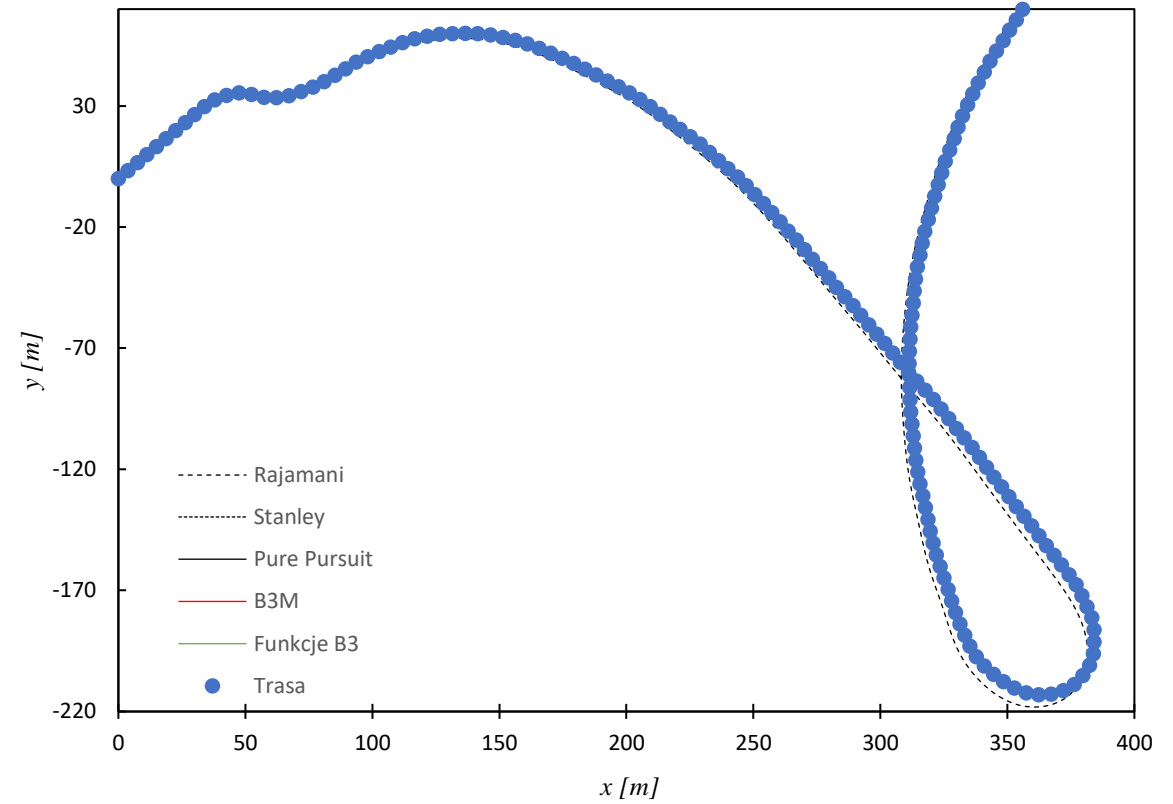
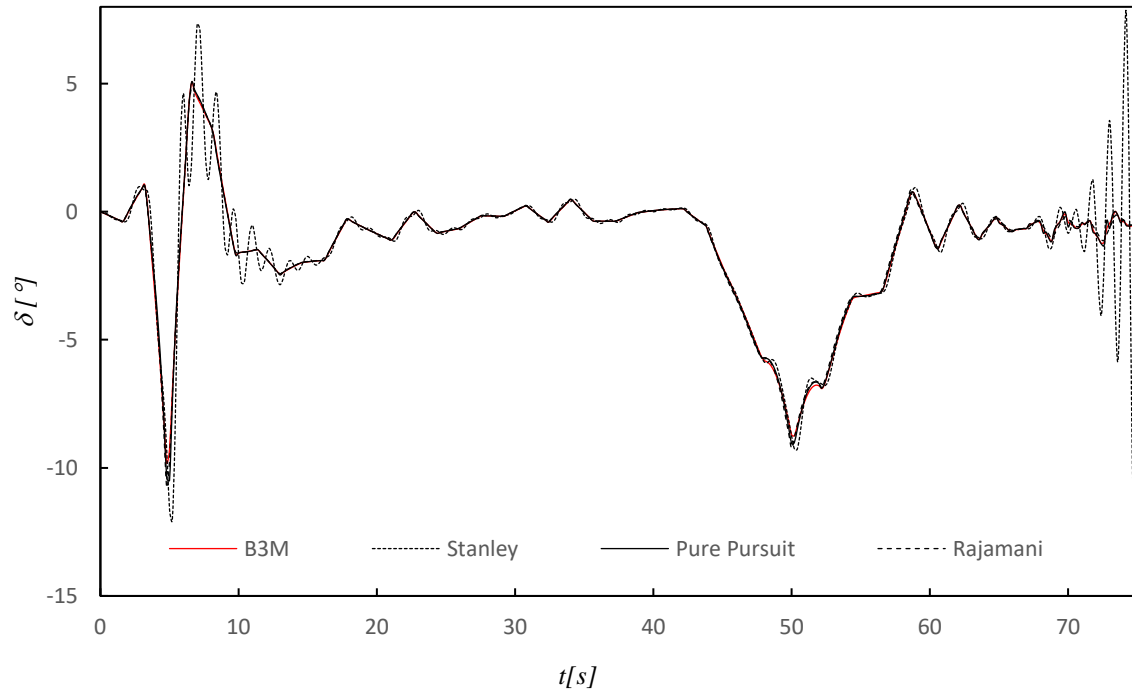
Obliczenie trajektorii ruchu pojazdu, śledzenie ścieżki (2)

Maksymalne wartości błędów (odchyłki od ścieżki) dla poszczególnych algorytmów dobierających kąt skrętu kół

Zastosowany algorytm	Δ_{max} [m]	Stała (k lub l_d)	Czas obliczeń [s]
B3M	0,312	-	<1
Pure Pursuit	0,200	0.05	
Stanley Control	0,298	10	
Rajamani	1,188	-	



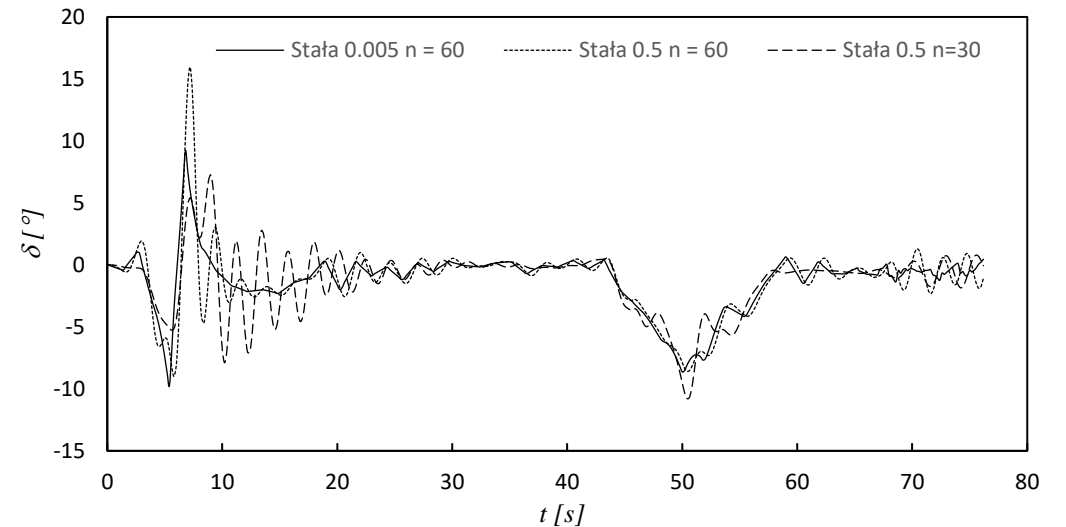
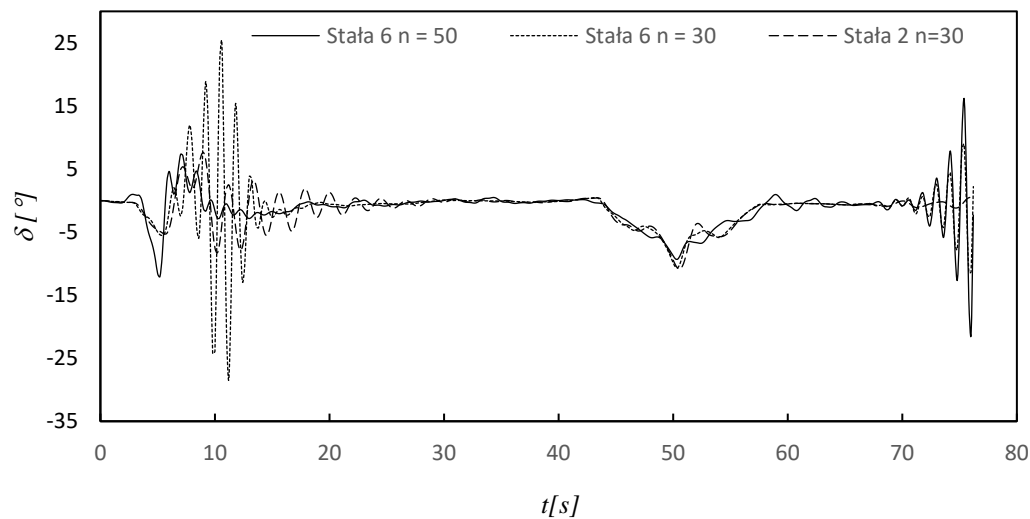
Wjazd na obwodnicę Bielska-Białej



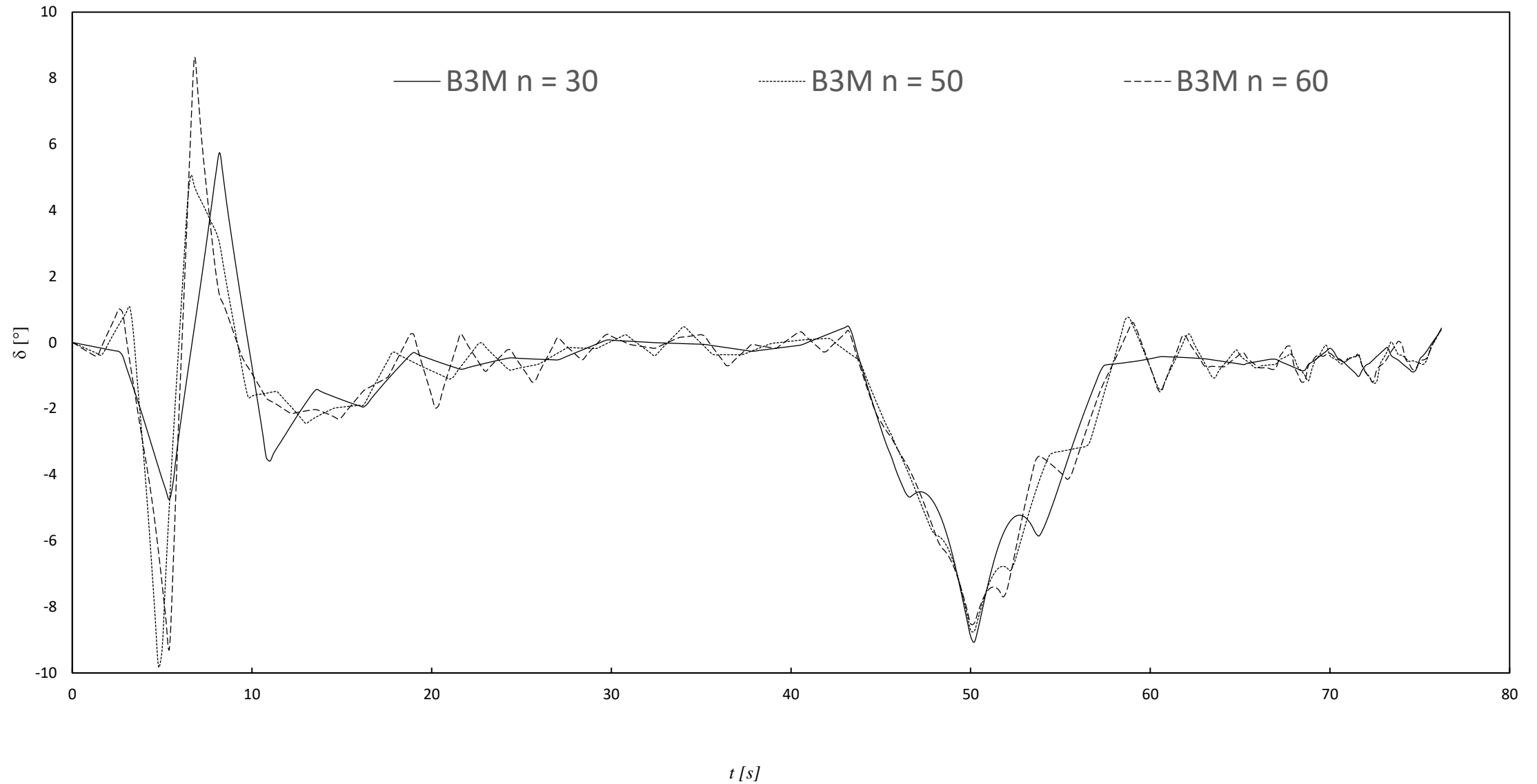
Zastosowany algorytm	Δ_{max} [m]	Stała (k lub l_d)	Czas obliczeń [s]
B3M	0,617	-	<1
Pure Pursuit	0,375	0,004	
Stanley Control	1,681	3	
Rajamani	6,591	-	

Analiza i wybór odpowiedniego algorytmu doboru kąta skrętu kół

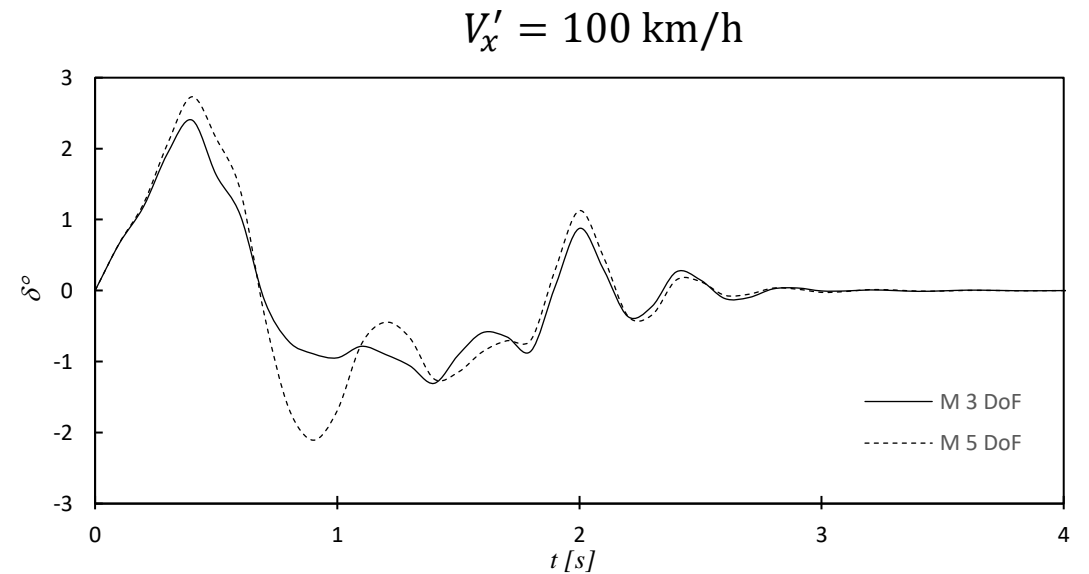
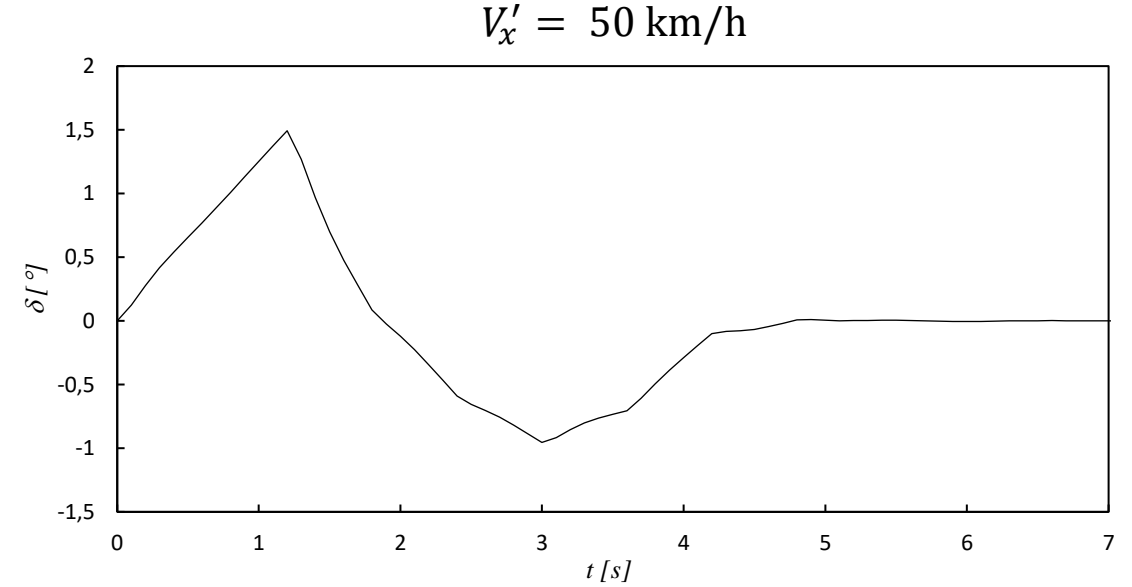
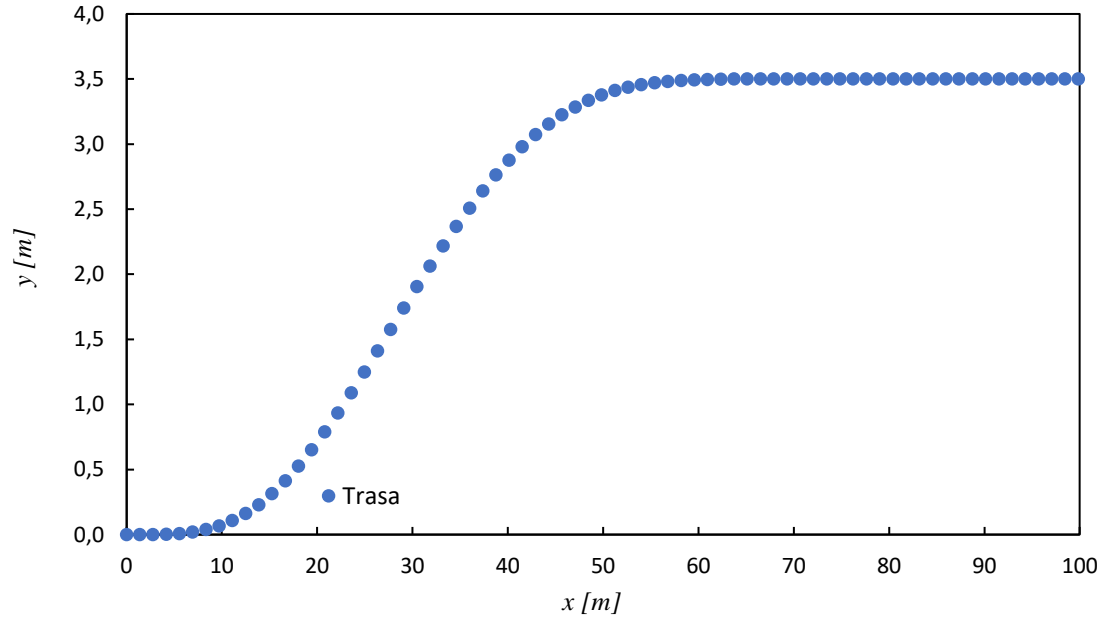
n	Błąd aproksymacji		Błąd trajektorii Δ_{max} [m]					
	ε_{max} [m]	$\bar{\varepsilon}$ [m]	B3M	Rajamani	Pure Pursuit		Stanley	
	-	-	-	-	$l_d = 0,05$	$l_d = 0,5$	$k = 6$	$k = 2$
30	2,073	0,245	2,158	6,178	1,139	1,522	1,322	1,702
40	1,473	0,164	1,861	4,644	1,667	1,542	2,308	1,754
50	0,623	0,085	0,617	6,591	0,375	2,414	1,681	2,527
60	0,399	0,066	0,280	6,626	0,133	2,642	2,524	2,716



Algorytm B3M



Manewr zmiany pasa ruchu



Prędkość pojazdu V'_x [km/h]	Błąd funkcji B3 [m]		Błąd trajektorii Δ_{max} [m]		Maksymalne przyspieszenie boczne pojazdu $a'_{y max}$ [m/s^2]
	ε_{max} [m]	$\bar{\varepsilon}$ [m]	Model 3 DoF	Model 5 DoF	
50	0.004	0.001	0.001	0.007	1,8
100	0.004	0.001	0.003	0.152	6,1

Podsumowanie i wnioski modele:

- 🚗 Model o 10 DoF sformułowany w ramach równań Newtona – Eulera jest efektywniejszy numerycznie niż model sformułowaniu w ramach równań Lagrange’a
- 🚗 Model o 7 DoF charakteryzuje się podobną dokładnością jak model o 10 DoF, jednak jest znacznie efektywniejszy obliczeniowo.
- 🚗 Model o 5 DoF okazał się być wystarczająco dobry dla większości przypadków
- 🚗 Model o 3 DoF przez to, że ma najmniejszą złożoność obliczeniową jest najbardziej wydajny obliczeniowo, jednak wykonane z jego użyciem obliczenia symulacyjne wykazały, że posiada on istotne ograniczenia

Podsumowanie i wnioski manewr hamowania:

- 🚗 Model o 3 DoF może być zastosowany do obliczania momentu hamującego w sytuacji hamowania awaryjnego oraz podczas modelowania dynamiki pojazdu po uwzględnieniu ograniczeń kinematycznych
- 🚗 Spadek efektywnego zasięgu sensorów z 100 do 50 metrów przy jednoczesnym spadku współczynnika przyczepności wymusza niemalże dwukrotne zmniejszenie prędkości jazdy.

Podsumowanie i wnioski realizacja trasy przejazdu

- ☛ Zastosowanie funkcji sklejanych B_3 umożliwiło odwzorowanie trasy o długości kilkuset metrów z błędem nie przekraczającym kilkudziesięciu centymetrów.
- ☛ Analiza wyników obliczeń uzyskanych wg. algorytmów doboru przebiegu kąta skrętu kół wykazała, że zaproponowany w pracy algorytm B3M jest najbardziej adekwatny do znalezienia rozwiązania dla tego typu zadania. Do najważniejszych zalet algorytmu B3M można zaliczyć:
 - ☛ brak potrzeby określania dodatkowych parametrów, koniecznych choćby przy stosowaniu algorytmów Stanley i Pure Pursuit,
 - ☛ niska podatność na liczbę podprzedziałów n (przy aproksymacji funkcji aproksymujących ścieżkę),
 - ☛ możliwość łączenia go z modelami o różnym stopniu złożoności (o 3, 5, 7 i 10 DoF),
 - ☛ wysoka efektywność numeryczna.

Dziękuję za uwagę



Źródła obrazków:

- <https://chronicle.lu/category/research-r-d/43176-press-get-1st-ride-on-snts-experimental-self-driving-car>
- <https://www.herox.com/blog/159-the-drive-for-autonomous-vehicles-the-darpa-grand>
- <https://autoexpert.pl/artykuly/jak-dzialaja-samochody-autonomiczne>