

Dr inż. Maciej TROJNACKI, e-mail: mtrojnacki@piap.pl

Mgr inż. Przemysław DĄBEK, e-mail: pdabek@piap.pl

Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP

BADANIA SYMULACYJNE I DOŚWIADCZALNE RUCHU ROBOTA KOŁOWEGO SCOUT PODCZAS MANEWRU ZAKRĘCANIA

Streszczenie: Praca dotyczy badań ruchu robota mobilnego SCOUT podczas manewru zakręcania. Na początku omówiono konstrukcję robota oraz opracowano model dynamiki. Opisano model symulacyjny robota w pakiecie Matlab/Simulink i zaprezentowano wybrane wyniki badań symulacyjnych ruchu robota. Przedstawiono środowisko badań doświadczalnych robota oraz pokazano wybrane wyniki eksperymentów pomiarowych. W ramach badań symulacyjnych i doświadczalnych wyznaczono m.in. parametry ruchu robota oraz występujące poślizgi kół jezdnych. W celu oceny uzyskanych wyników przyjęto wskaźniki jakości. Na koniec dokonano porównania uzyskanych wyników i przedstawiono wnioski wynikające z przeprowadzonych badań.

Słowa kluczowe: mobilny robot kołowy, modelowanie dynamiki, poślizg kół jezdnych, badania ruchu, badania symulacyjne, badania doświadczalne

SIMULATION AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF MOTION OF SCOUT WHEELED ROBOT DURING TURNING MANEUVER

Abstract: The work concerns investigations of motion of the PIAP Scout wheeled mobile robot during turning maneuver. Robot design, dynamics model and implementation of the dynamics model in Matlab/Simulink package are described. Selected results of simulation research of robot motion are presented. Environment of experimental research is described and selected results of empirical experiments are discussed. During simulation and empirical investigations, parameters of motion of the robot and road wheels' slips are determined. To the end of assessment of the obtained results quality indices are introduced. Finally, the results from both kinds of research are compared and resulting conclusions are given.

Keywords: wheeled mobile robot, dynamics modeling, wheels' slip, motion investigations, simulation research, empirical research

1. WPROWADZENIE

Obecnie spośród dostępnych na rynku robotów mobilnych największą grupę stanowią roboty gąsienicowe i kołowe. Dotychczas bardziej popularnym układem jezdnym przeznaczonym do poruszania się w zróżnicowanym terenie był układ gąsienicowy [1, 2]. Jednakże obserwując tendencje rynku mobilnych można zauważyć, że coraz częściej odchodzi się od robotów gąsienicowych na rzecz robotów kołowych [5, 6]. Wynika to przede wszystkim z prostoty konstrukcji i sterowania tego typu układem ruchu. Ponadto roboty takie często radzą sobie w otwartym terenie nie gorzej od robotów gąsienicowych oraz w mniejszym stopniu ingerują w podłoże, po którym się poruszają. Mobilne roboty kołowe można podzielić na dwie grupy, tj. takie, dla których w typowych warunkach eksploatacji występują niewielkie poślizgi kół jezdnych oraz takie, w przypadku których poślizgi kół jezdnych są nieodłączną cechą ich ruchu. Do pierwszej grupy należą roboty mające kierowane lub samonastawne koła jezdne. Roboty takie z reguły przeznaczone są do poruszania się wewnątrz budynków. Przykładem takiej konstrukcji jest np. robot Pioneer 2-DX pokazany na rys. 1a.

Do drugiej grupy można zaliczyć roboty, których wszystkie koła jezdne są niekierowane. Zazwyczaj tego typu roboty stosowane są do pracy w otwartym terenie. Przykładem takich konstrukcji są zaprojektowane w PIAP roboty IBIS i SCOUT pokazane na rys. 1b-c [7].

Podstawowym problemem związanym z tego typu robotami jest trudność w określeniu prędkości robota w zależności od prędkości kątowych obrotu własnego kół jezdnych.



Rys. 1. Przykłady mobilnych robotów kołowych: a – Pioneer 2-DX, b – SCOUT, c – IBIS

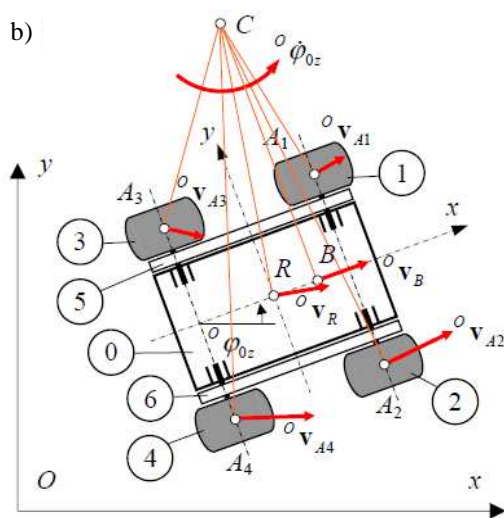
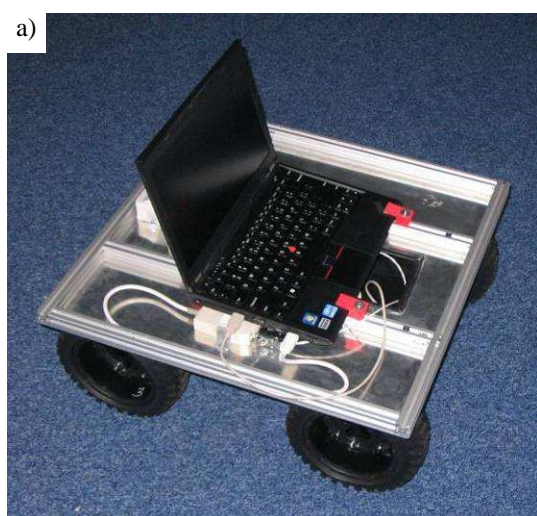
Związane jest to z faktem, że ruch robota wynika z działających sił na styku kół jezdnych z podłożem, które w przypadku kół ogumionych zależą nieliniowo od występujących poślizgów. W literaturze niewiele jest prac dotyczących badań ruchu robotów z niekierowanymi kołami jezdными. Szczególnie interesującym jest zachowanie się takich robotów podczas manewru zakręcania lub obracania się robota wokół jego osi pionowej. W związku z tym jako cel pracy przyjęto analizę wpływu poślizgu kół jezdnych na dokładność realizacji ruchu robota SCOUT z niekierowanymi kołami jezdnymi. W ramach pracy przeprowadzono badania symulacyjne i doświadczalne ruchu robota podczas manewru zakręcania.

2. ROBOT SCOUT I JEGO MODEL

W ramach pracy analizowany jest mobilny robot czterokołowy SCOUT, który został opracowany w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów PIAP [7]. Robot ten został dostosowany do realizacji badań doświadczalnych poprzez wyposażenie go w dodatkowy stelaż wraz laptopem i czujnikami (rys. 2a).

Robot SCOUT ma niezależnie napędzane tylne koła jezdne. Napęd z tylnych kół jezdnych jest przekazywany na koła przednie za pośrednictwem pasów zębatych, które mogą także pełnić funkcję gąsienic. W robocie użyte są silniki prądu stałego wraz z przekładnią. Opony robota wykonane są z materiału viton i posiadają wypełnienie w postaci pianki. Struktura kinematyczna robota jest pokazana na rys. 2b.

Wyróżnia się następujące podstawowe zespoły robota: 0 – korpus wraz ze stelażem do montażu oprzyrządowania badawczego, 1-4 – koła jezdne, 5-6 – paski zębate, które służą do sprzęgania przednich i tylnych kół jezdnych.

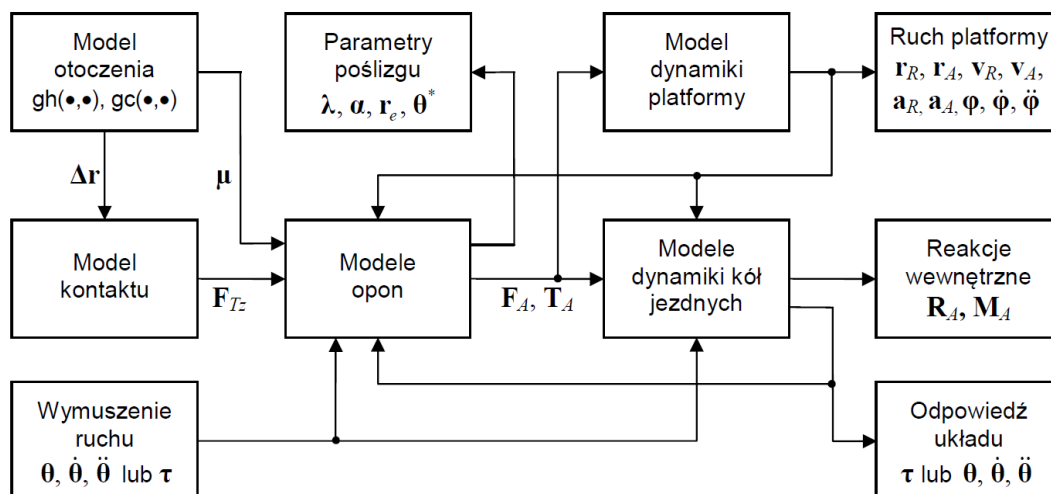


Rys. 2. Robot SCOUT: a – wersja robota dostosowana do badań doświadczalnych, b – przyjęty model robota ($A_1A_3 = A_2A_4 = L$, $A_1A_2 = A_3A_4 = W$)

Do badań założono następujące podstawowe parametry robota ($i = \{1, \dots, 4\}$):

- wymiary (oznaczenia W i L wyjaśniono na rys. 2b): $L = 0,35$ m, $W = 0,386$ m, $r_i = 0,0965$ m;
- masy poszczególnych członów: $m_0 = 15,02$ kg, $m_i = 0,66$ kg, $m_5 = m_6 = 0,17$;
- parametry opony: $k_i = 20\ 000$ N/m, $c_i = 250$ Ns/m.

Do badań został przygotowany model dynamiki robota i jego otoczenia uwzględniający występowanie poślizgu kół jezdnych. Model ten opracowano, stosując podobną metodykę jak w pracy [4], w której badano ruch wzdłużny robota bez pasków zębatych. Schemat ideowy tego modelu pokazany jest na rys. 3. Model ten składa się z szeregu podmodeli.



Rys. 3. Schemat ideowy modelu dynamiki robota oraz jego otoczenia

Ze względu na sprzężenie przednich i tylnych kół jezdnych modele dynamiki kół jezdnych uzupełniono o model dynamiki przekładni pasowej.

Obliczenia z użyciem opracowanego modelu dynamiki robota przebiegają następująco:

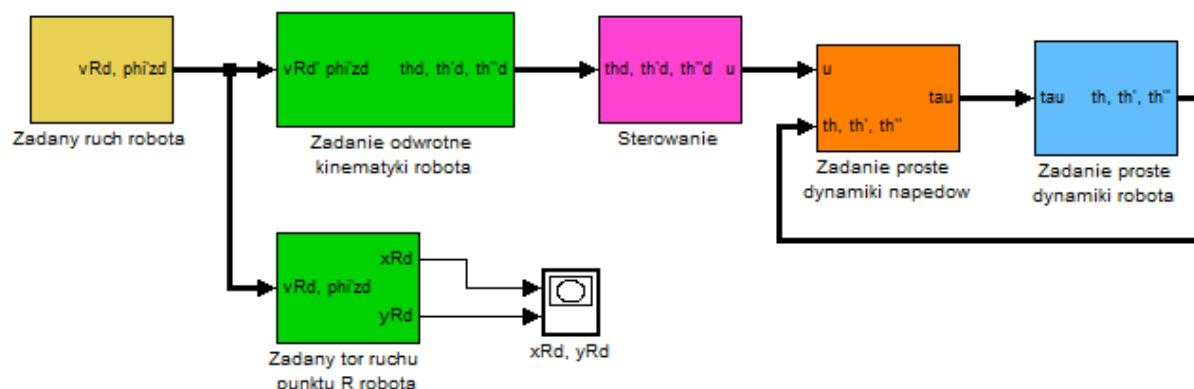
- Na początek z modelu otoczenia wyznaczane są deformacje promieniowe opon robota oraz współczynniki tarcia i oporu toczenia charakteryzujące współpracę tych opon z danym rodzajem podłoża;
- Na podstawie deformacji promieniowej opon obliczane są z modelu kontaktu składowe normalne siły reakcji podłoża;
- Następnie wyznaczane są parametry poślizgu wzdłużnego i poprzecznego;
- Na ich podstawie z modelu opony H.B. Pacejki [3] obliczane są: składowa wzdłużna i poprzeczna siły tarcia, moment stabilizujący oraz moment oporu toczenia;
- Z modelu przekładni pasowej wyznaczane są siły napięcia pasków zębatych oraz ich wydłużenie.
- Dalej z modelu dynamiki kół jezdnych obliczane są reakcje wewnętrzne oraz momenty napędowe dla zadania odwrotnego dynamiki lub parametry kątowe obrotu własnego kół jezdnych w przypadku rozwiązywania zadania prostego dynamiki.
- Z modelu platformy mobilnej na podstawie wyznaczonych sił reakcji na styku kół jezdnych z podłożem wyznaczany jest wynikowy ruch całego robota.

W celu realizacji badań symulacyjnych ruchu robota opracowano w środowisku Matlab/Simulink model symulacyjny, którego schemat pokazano na rys. 4.

Model symulacyjny zawiera następujące podsystemy:

- Zadany ruch robota – generuje zadane przebiegi prędkości charakterystycznego punktu R robota ${}^R v_{Rd}^O$ i prędkości kątowej jego korpusu ${}^R \dot{\phi}_{0zd}^O$;

- Zadanie odwrotne kinematyki – wyznacza zadane prędkości kątowe obrotu własnego napędzanych kół jezdnych $\dot{\theta}_{3d}$ i $\dot{\theta}_{4d}$ na podstawie zadanych prędkości ${}^R v_{Rd}^O$ i ${}^R \dot{\phi}_{0zd}^O$;
- Zadany tor ruchu punktu R robota – oblicza zadane współrzędne charakterystycznego punktu R robota ${}^O x_{Rd}$ i ${}^O y_{Rd}$ (co pozwala na narysowanie zadanego toru ruchu tego punktu) oraz zadaną orientację korpusu robota ${}^R \phi_{0zd}^O$;
- Sterowanie – oblicza napięcie wejściowe niezbędne do ruchu robota z zakładanymi prędkościami kątowymi obrotu własnego kół jezdnych $\dot{\theta}_{3d}$ i $\dot{\theta}_{4d}$;
- Zadanie proste dynamiki napędów – umożliwia wyznaczenie poboru prądu i_3 i i_4 oraz momentów napędowych τ_3 i τ_4 na podstawie aktualnego napięcia wejściowego oraz aktualnych parametrów kątowych obrotu własnego napędzanych kół jezdnych 3 i 4;
- Zadanie proste dynamiki robota – rozwiązuje zadanie proste dynamiki robota korzystając z opisanego wcześniej modelu dynamiki, pozwalając na wyznaczenie parametrów ruchu korpusu (w szczególności prędkości ${}^R v_{Rx}^O$ i ${}^R \dot{\phi}_{0z}^O$) oraz kół jezdnych (m.in. prędkości kątowych obrotu własnego tych kół $\dot{\theta}_{id}$).



Rys. 4. Model symulacyjny w środowisku Matlab/Simulink

Należy zauważyć, że w przypadku zakręcania robota lub jego obracania wokół osi pionowej, ponieważ koła jezdne robota nie są kierowane, więc jego ruch zależy w dużym stopniu od działających sił poprzecznych na styku kół jezdnych z podłożem, czyli od dynamiki układu. Dlatego też robot będzie wykonywał obrót wokół osi pionowej z mniejszą prędkością kątową ${}^R \dot{\phi}_{0z}^O$ niż wynika to z zadanych prędkości kątowych obrotu własnego napędzanych kół jezdnych wyznaczonych z modelu kinematyki robota. W związku z tym, w celu rozwiązania zadania odwrotnej kinematyki dla robota można w pierwszym przybliżeniu zastosować zależność:

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} 1 & -W/2 \\ 1 & W/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^R v_{Rx}^O \\ k_{\omega 0z} {}^R \dot{\phi}_{0z}^O \end{bmatrix}, \quad (1)$$

w której współczynnik $k_{\omega 0z} \geq 1$ zależy przede wszystkim od sposobu napędzania robota (tj. od liczby napędzanych kół jezdnych), rodzaju zastosowanego ogumienia kół jezdnych i podłoża, po którym porusza się robot.

Ze względu na nieznajomość warunków współpracy kół jezdnych z podłożem na początek zostanie przyjęty współczynnik $k_{\omega 0z} = 1$, który odpowiada przypadkowi ruchu robota bez poślizgu kół jezdnych.

W wyniku przeprowadzonych badań można będzie następnie dobrać optymalną do danych warunków wartość tego współczynnika lub zastosować dodatkowy regulator odpowiedzialny za realizację ruchu robota z zadanymi prędkościami ${}^R v_{Rx}^O$ i ${}^R \dot{\varphi}_{0z}^O$.

3. BADANIA SYMULACYJNE RUCHU ROBOTA

Badania symulacyjne ruchu robota zrealizowano w dwóch etapach. W pierwszym etapie zadane prędkości ruchu robota zmieniały się skokowo, co pozwoliło na wyznaczenie maksymalnych przyspieszeń możliwych do osiągnięcia przez robota. W drugim etapie badań zadane prędkości ruchu robota zmieniały się już łagodnie, czyli z przyspieszeniami mniejszymi od maksymalnych możliwych do osiągnięcia. W przypadku drugiego etapu badań założono występowanie trzech faz ruchu, tj. rozpędzanie, ruch ustalony i hamowanie. Badania symulacyjne wykonano dla wariantów zadanych parametrów ruchu oraz rodzajów podłoża zestawionych w tab. 1. Zadane wartości maksymalnego przyspieszenia liniowego a_{Rm} i kąтового ε_{0zm} podano wyłącznie dla wariantów badań dla łagodnych zmian prędkości. Należy zauważyć, że proponowane materiały podłoża są rzadko analizowane w badaniach ruchu robotów mobilnych. Przyjęte do badań współczynniki charakteryzujące współpracę kół jezdnych robota z tymi rodzajami podłoża zamieszczono w tab. 2. Są nimi współczynnik przyczepności przyłgowej μ_p oraz współczynniki oporów toczenia f_r . Współczynniki te wyznaczono w wyniku odrębnych badań doświadczalnych.

Tab. 1. Warianty zadanych parametrów ruchu i rodzajów podłoża dla manewru zakręcania

Nr wariantu	v_{Ru} (m/s)	a_{Rm} (m/s ²)	ω_{0zu} (rad/s)	ε_{0zm} (rad/s ²)	Rodzaj podłoża
1	0,3	–	–2,00	–	wykładzina dywanowa
2	0,3	0,7	–2,00	$1,5 \pi$	wykładzina dywanowa
3	0,5	–	–3,33	–	wykładzina dywanowa
4	0,7	–	–4,67	–	wykładzina dywanowa
5	1,0	2,0	–6,67	10π	wykładzina dywanowa
6	1,0	2,0	–6,67	–	wykładzina PVC
7	1,0	2,0	–6,67	10π	wykładzina PVC

Tab. 2. Współczynniki charakteryzujące współpracę kół jezdnych z podłożem

Rodzaj podłoża	μ_p	f_r
wykładzina dywanowa	0,87	0,03
wykładzina PVC	0,51	0,02

Zdefiniowano następujące błędy dokładności realizacji ruchu przez robota:

- błędy współrzędnych x i y charakterystycznego punktu R (rys. 2b) oraz błąd pozycji robota, czyli odpowiednio: ${}^O e_{Rx} = {}^O x_{Rd} - {}^O x_R$, ${}^O e_{Ry} = {}^O y_{Rd} - {}^O y_R$, ${}^O e_R = \|{}^O \mathbf{e}_R\| = \sqrt{{}^O e_{Rx}^2 + {}^O e_{Ry}^2}$,
- błąd kursu robota: ${}^O e_{\psi} = {}^O \psi_d - {}^O \psi$, ${}^O \psi = {}^R \varphi_{0z}^O$,
- błędy obrotu napędzanych kół jezdnych: $e_{\theta_i} = \theta_{id} - \theta_i$, $i = \{3, 4\}$.

W celu dokonania oceny dokładności realizacji ruchu przez robota dla poszczególnych wyników badań przyjęto następujące wskaźniki jakości:

- maksymalny błąd pozycji i kursu robota oraz obrotu napędzanych kół jezdnych

$${}^O e_{Rmax} = \max_{t \in (0, T)} (\|{}^O \mathbf{e}_R\|), \quad {}^O e_{\psi max} = \max_{t \in (0, T)} (|{}^O e_{\psi}|), \quad e_{\theta_{imax}} = \max_{t \in (0, T)} (|e_{\theta_i}|), \quad (2)$$

- całka kwadratu błędu pozycji i kursu robota oraz obrotu napędzanych kół jezdnych

$$E_R = \int_0^T \|\mathbf{e}_R\|^2 dt, \quad E_\psi = \int_0^T e_\psi^2 dt, \quad E_{\theta_i} = \int_0^T e_{\theta_i}^2 dt, \quad (3)$$

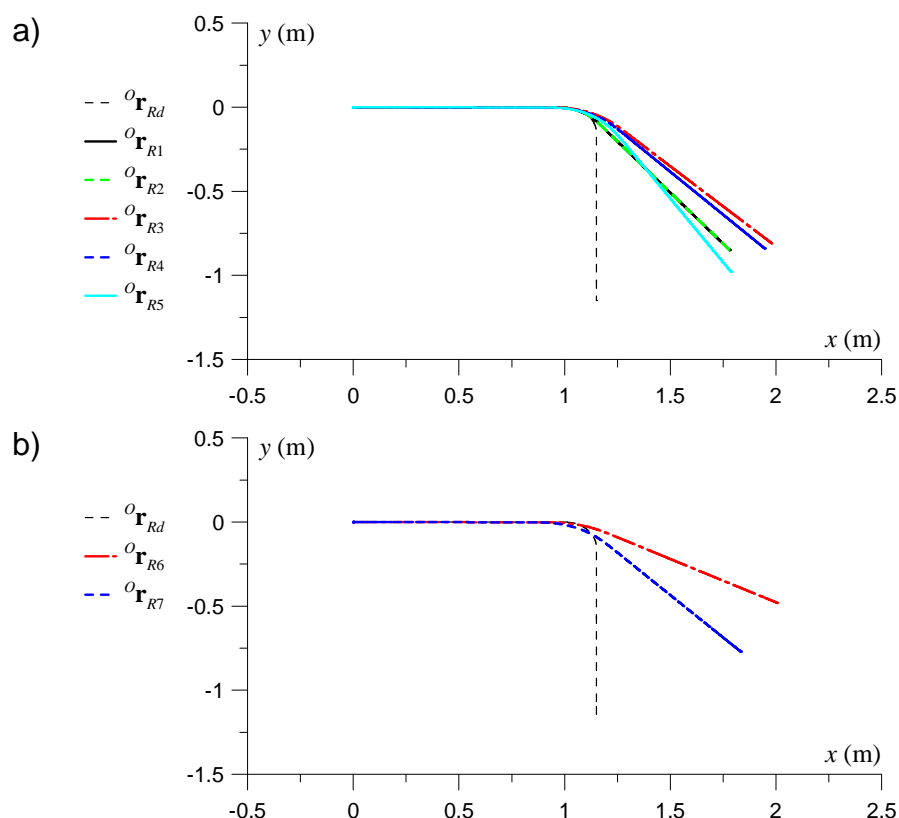
gdzie: $\|\mathbf{e}_R\| = \sqrt{({}^o e_{R_x})^2 + ({}^o e_{R_y})^2}$, $i = \{3, 4\}$, T – analizowany okres ruchu robota.

Uzyskane w wyniku badań symulacyjnych wskaźniki jakości dla poszczególnych wariantów zestawiono w tab. 3.

Tab. 3. Wskaźniki jakości uzyskane w wyniku badań symulacyjnych dla poszczególnych wariantów manewru zakręcania

Nr wariantu	${}^o e_{R_{max}}$ (m)	${}^o e_{\psi_{max}}$ (rad)	${}^o e_{\theta_{3max}}$ (rad)	${}^o e_{\theta_{4max}}$ (rad)	E_R ($m^2 \cdot s$)	E_ψ ($rad^2 \cdot s$)	E_{θ_3} ($rad^2 \cdot s$)	E_{θ_4} ($rad^2 \cdot s$)
1	0,6987	0,7178	2,0896	0,7937	0,8142	1,9568	15,916	1,6933
2	0,6982	0,6989	2,0883	0,7329	0,9678	2,1104	17,654	1,7197
3	0,8979	0,8741	1,1230	0,3860	0,9970	1,7682	3,0087	0,2060
4	0,8555	0,8931	1,0856	0,4053	0,7436	1,2713	1,6488	0,2137
5	0,6573	0,7221	1,2499	0,5611	0,5231	0,7053	2,0258	0,3738
6	1,0880	1,2533	1,9511	1,4631	1,4239	2,4040	7,6284	4,3256
7	0,7804	0,9220	2,0700	1,5036	0,7357	1,2484	8,5333	4,4998

Z kolei na rys. 5 zamieszczono wykresy zadanego toru ruchu charakterystycznego punktu R robota (oznaczony jako ${}^o \mathbf{r}_{Rd}$) oraz rzeczywistych torów ruchu tego punktu (oznaczone jako ${}^o \mathbf{r}_{Rj}$, $j = \{1, \dots, 7\}$), gdzie j – nr wariantu z tab. 1), które otrzymano w wyniku symulacji ruchu robota dla analizowanych wariantów manewru zakręcania.



Rys. 5. Zadany tor ruchu punktu R robota oraz toru ruchu tego punktu uzyskane w wyniku symulacji ruchu robota po: a – wykładzinie dywanowej, b – wykładzinie PVC

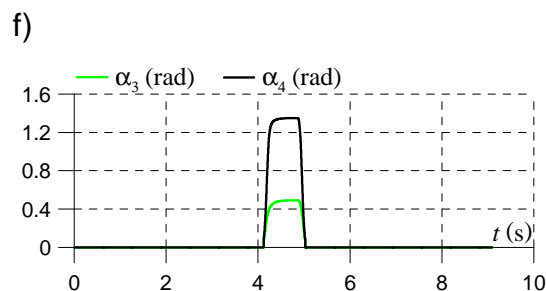
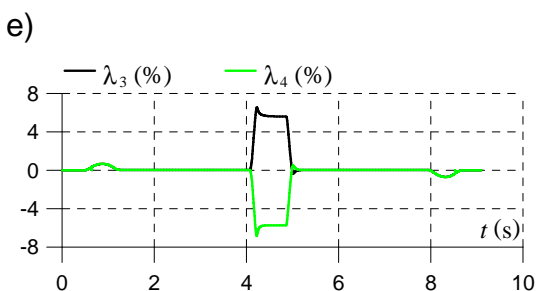
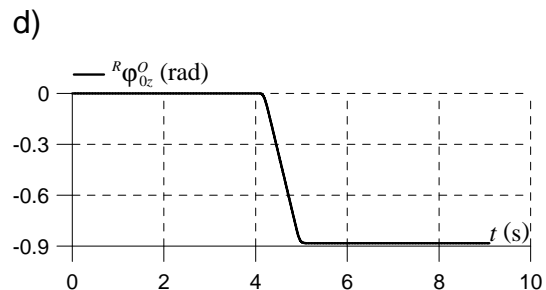
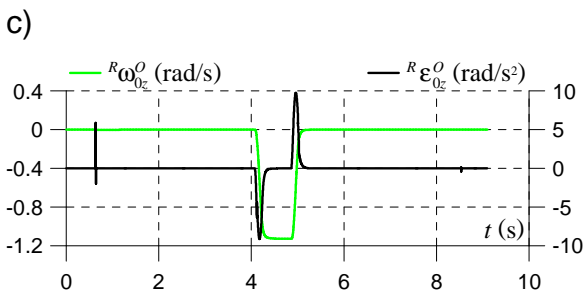
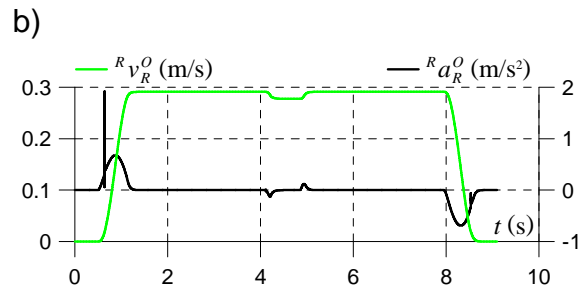
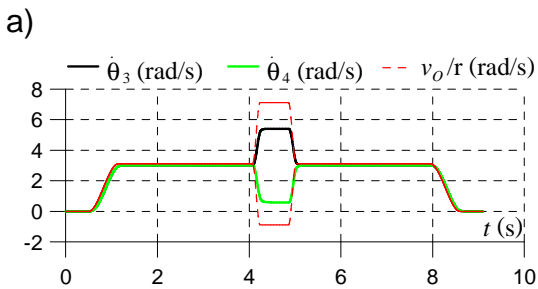
Poniżej przedstawiono natomiast wyniki wybranych symulacji.

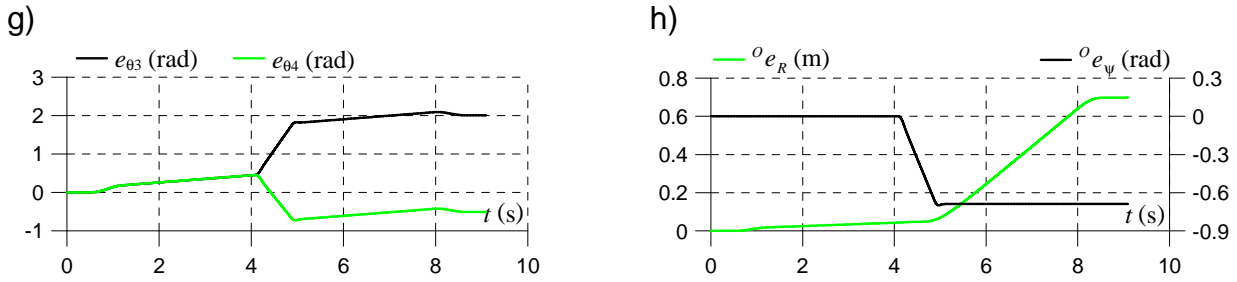
Symulacja 1 – wariant 2 ($v_{Ru} = 0,3 \text{ m/s}$, $\omega_{0zu} = -2 \text{ rad/s}$, wykładzina dywanowa)

Pierwsza prezentowana w niniejszej pracy symulacja dotyczyła ruchu robota po wykładzinie dywanowej z zadanymi parametrami ruchu, takimi jak: maksymalna prędkość liniowa $v_{Ru} = 0,3 \text{ m/s}$ i maksymalne przyspieszenie liniowe $a_{Rm} = 0,7 \text{ m/s}^2$ oraz maksymalna prędkość kątową $\omega_{0zu} = -2 \text{ rad/s}$ i maksymalne przyspieszenie kątowe $\varepsilon_{0zm} = 1,5 \pi \text{ rad/s}^2$.

Na rys. 6 pokazane są uzyskane w wyniku symulacji przebiegi czasowe:

- prędkości kątowych obrotu własnego napędzanych kół jezdnych $\dot{\theta} = [\dot{\theta}_3, \dot{\theta}_4]^T$ i odpowiadające im wartości wynikające z aktualnych prędkości wzdłużnych środków geometrycznych tych kół;
- prędkości i przyspieszenia punktu R robota, tj. odpowiednio ${}^R v_R^O$ i ${}^R a_R^O$, w układzie związanym z robotem;
- prędkości kątowej i przyspieszenia kątowego platformy mobilnej, odpowiednio ${}^R \omega_{0z}^O$ i ${}^R \varepsilon_{0z}^O$, w układzie związanym z robotem;
- kursu robota ${}^O \psi = {}^R \varphi_{0z}^O$;
- współczynników poślizgu wzdłużnego dla napędzanych kół jezdnych λ_3 i λ_4 ;
- kątów poprzecznego znoszenia dla napędzanych kół jezdnych α_3 i α_4 ;
- błędów obrotu napędzanych kół jezdnych: $e_{\theta_i} = \theta_{id} - \theta_i$, $i = \{3, 4\}$;
- błędów pozycji i kursu robota, czyli odpowiednio ${}^O e_R$ i ${}^O e_\psi$.

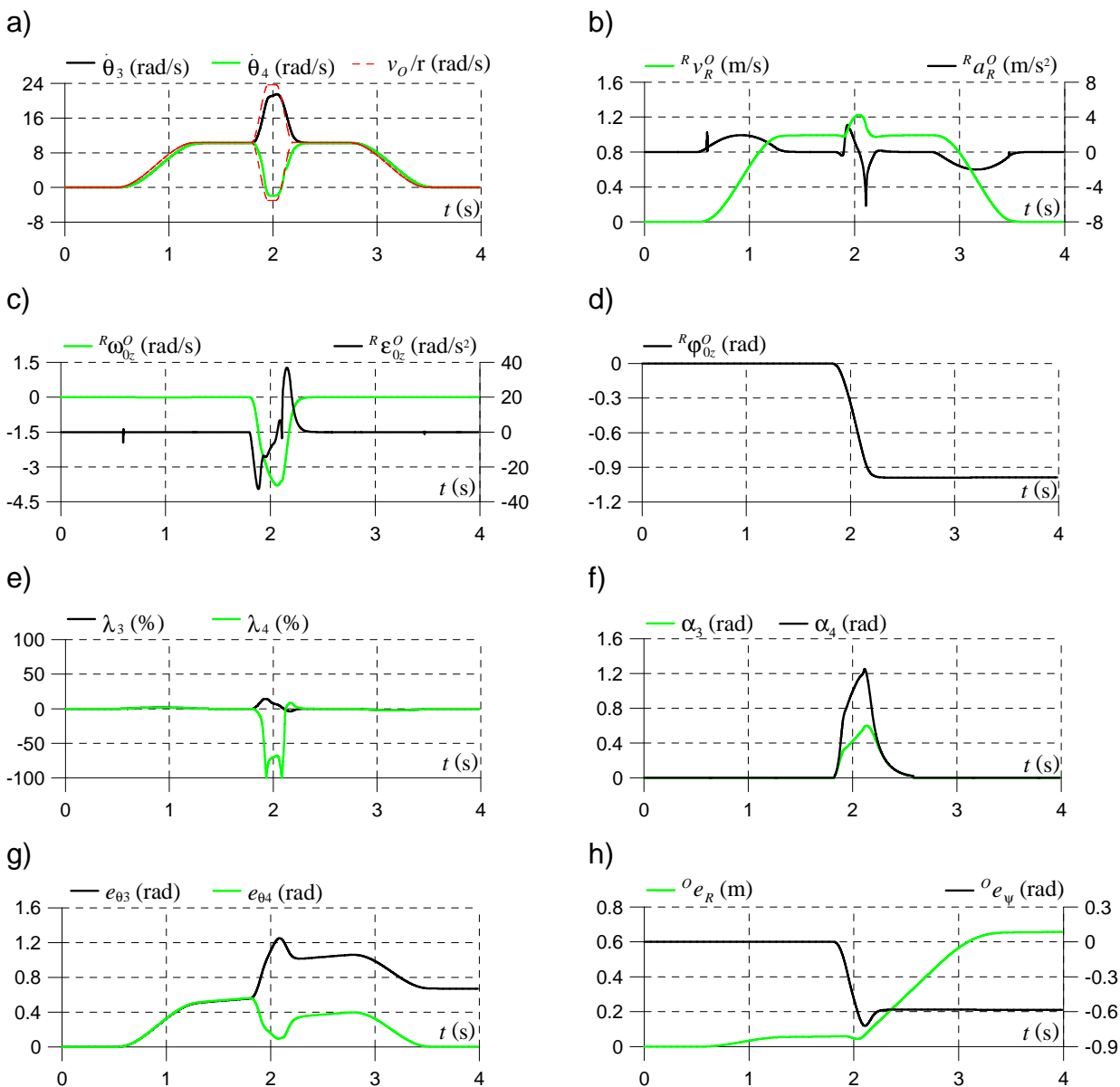




Rys. 6. Wyniki symulacji manewru zakręcania robota na wykładzinie dywanowej dla prędkości $v_{Ru} = 0,3$ m/s, $\omega_{0zu} = -2$ rad/s

Symulacja 2 – wariant 5 ($v_{Ru} = 1$ m/s, $\omega_{0zu} = -6,67$ rad/s, wykładzina dywanowa)

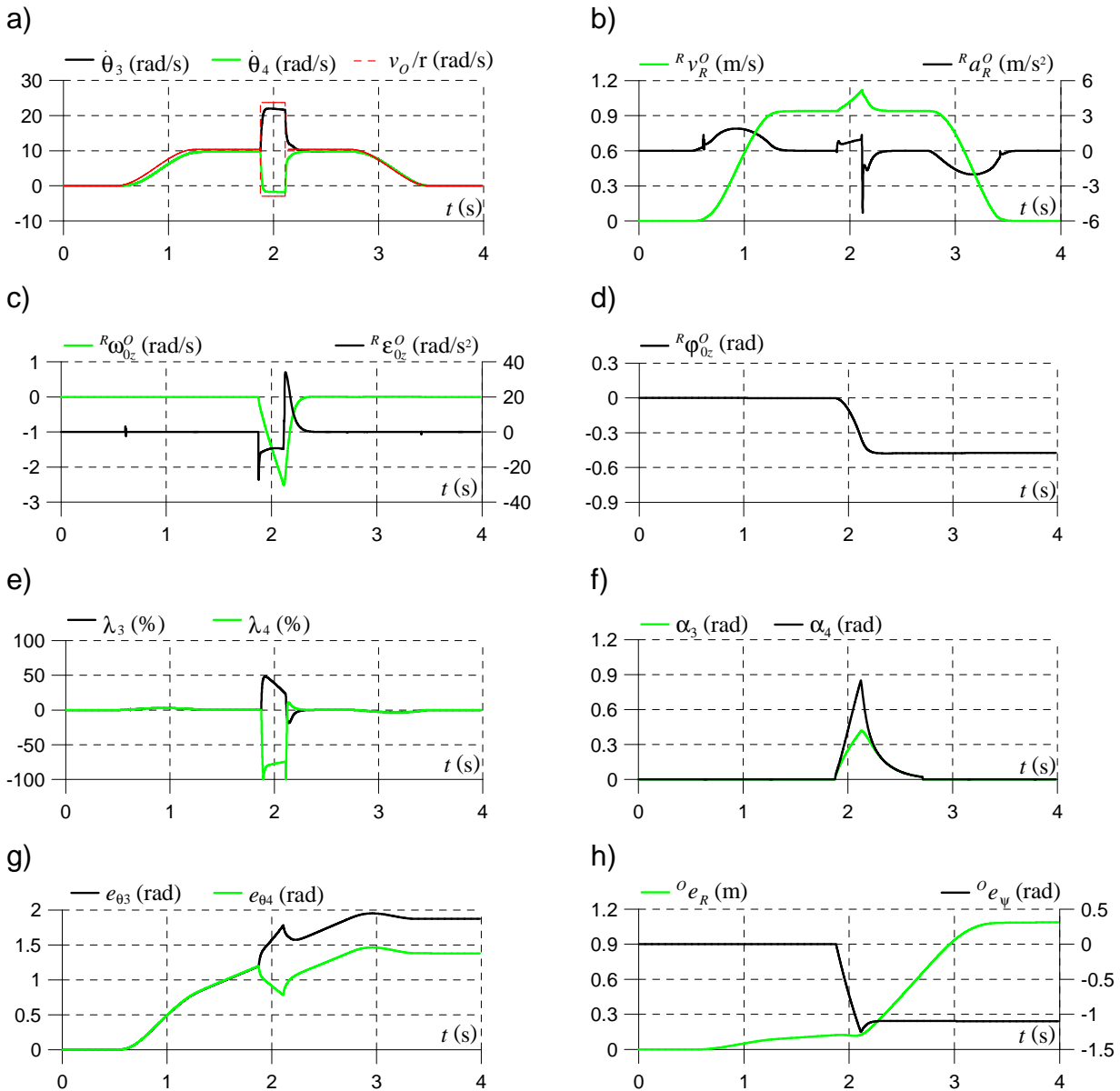
Drua zamieszczona w pracy symulacja polegała na realizacji analogicznego jak poprzednio ruchu, lecz tym razem z większymi zadanymi prędkościami. W symulacji tej analizowano analogiczne przebiegi czasowe, które pokazano na rys. 7.



Rys. 7. Wyniki symulacji manewru zakręcania robota na wykładzinie dywanowej dla prędkości $v_{Ru} = 1$ m/s, $\omega_{0zu} = -6,67$ rad/s

Symulacja 3 – wariant 6 ($v_{Ru} = 1$ m/s, $\omega_{0zu} = -6,67$ rad/s, wykładzina PVC)

Ostatnia symulacja była związana z realizacją ruchu robota na wykładzinie PVC. Tym razem analizowano analogiczny zadany ruch robota jak poprzednio, z tą różnicą, że zadana prędkość kątową robota zmieniała się w sposób skokowy, co pozwoliło na wyznaczenie maksymalnego przyspieszenia kąowego zakręcania robota na analizowanym podłożu z zakładaną prędkością maksymalną $v_{Ru} = 1$ m/s. Uzyskane wyniki symulacji widoczne są na rys. 8. Rysunek ten zawiera analogiczne przebiegi czasowe jak w poprzednio analizowanych symulacjach.



Rys. 8. Wyniki symulacji manewru zakręcania robota na wykładzinie PVC dla prędkości $v_{Ru} = 1$ m/s, $\omega_{0zu} = -6,67$ rad/s

Przedstawione wyniki badań symulacyjnych zostały zweryfikowane na etapie badań doświadczalnych z użyciem rzeczywistego robota.

4. BADANIA DOŚWIADCZALNE RUCHU ROBOTA

Aby przeprowadzić na robocie badania doświadczalne umieszczono na nim laptop, który za pomocą adaptera USB-CAN połączono z magistralą CAN robota w celu:

- zadawania prędkości kątowych obrotu własnego kół jezdnych $\dot{\theta}_d = [\dot{\theta}_{3d}, \dot{\theta}_{4d}]^T$;
- wyznaczania aktualnych prędkości kątowych obrotu własnego tych kół $\dot{\theta} = [\dot{\theta}_3, \dot{\theta}_4]^T$;
- pomiaru prądu pobieranego przez napędy robota $\mathbf{i} = [i_3, i_4]^T$.

Dodatkowo na robocie zamontowano:

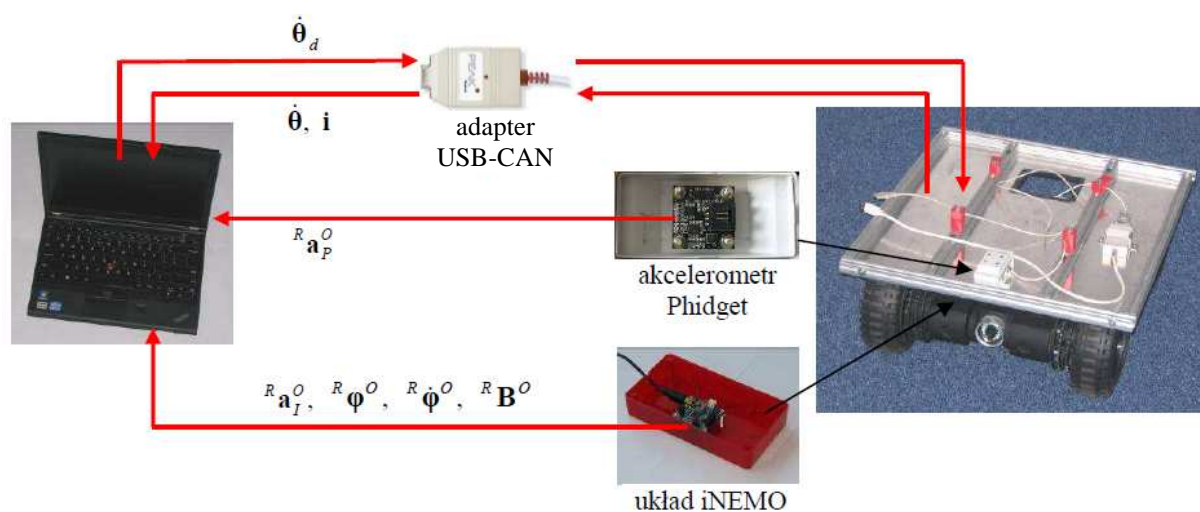
- moduł czujników iNEMO, który podłączono do laptopa za pośrednictwem interfejsu USB;
- czujnik Phidget podłączony do laptopa także za pomocą interfejsu USB.

Układ iNEMO umożliwił pomiar m.in. przyspieszeń liniowych ${}^R \mathbf{a}_I^O = [{}^R a_{Ix}^O, {}^R a_{Iy}^O, {}^R a_{Iz}^O]^T$, prędkości kątowych ${}^R \dot{\boldsymbol{\varphi}}^O = [{}^R \dot{\varphi}_x^O, {}^R \dot{\varphi}_y^O, {}^R \dot{\varphi}_z^O]^T$ oraz kątów obrotu ${}^R \boldsymbol{\varphi}^O = [{}^R \varphi_x^O, {}^R \varphi_y^O, {}^R \varphi_z^O]^T$.

Czujnik Phidget pozwolił na pomiar wektora przyspieszenia ${}^R \mathbf{a}_P^O = [{}^R a_{Px}^O, {}^R a_{Py}^O, {}^R a_{Pz}^O]^T$. Został użyty jako czujnik porównawczy w stosunku do akcelerometru w układzie iNEMO.

Schemat układu kontrolno-pomiarowego pokazano na rys. 9.

Badania doświadczalne wykonano dla tych samych wariantów, co w przypadku badań symulacyjnych (zob. tab. 1). Uzyskane w wyniku badań doświadczalnych wskaźniki jakości dla poszczególnych wariantów przedstawiono w tab. 4.

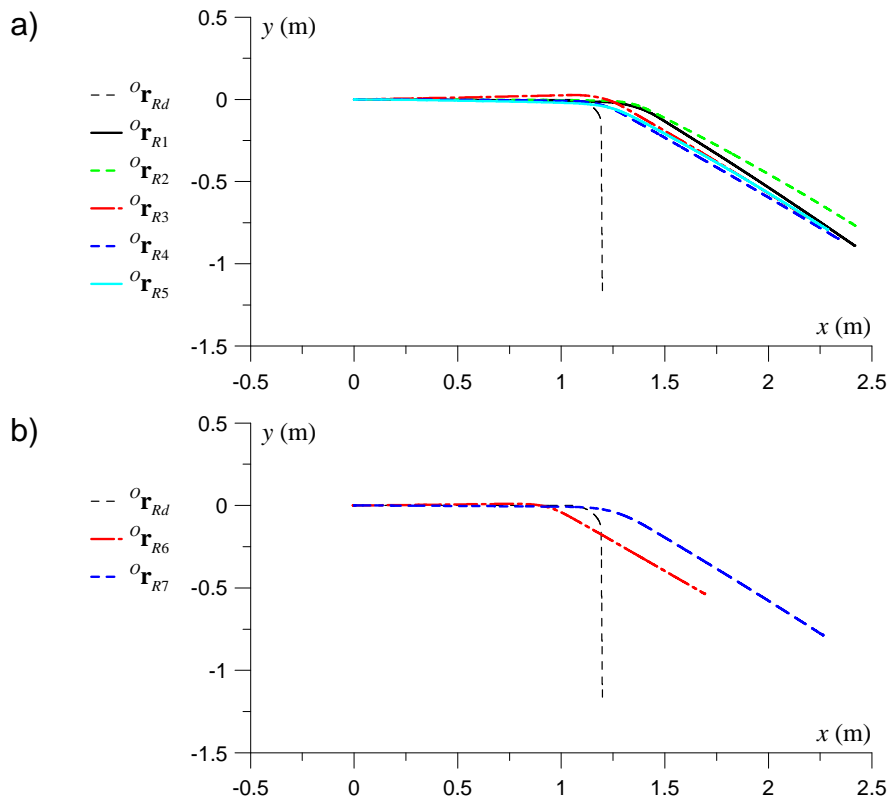


Rys. 9. Schemat układu kontrolno-pomiarowego użytego w badaniach doświadczalnych

Tab. 4. Wskaźniki jakości uzyskane w wyniku badań doświadczalnych dla poszczególnych wariantów manewru zakręcania

Nr wariantu	${}^O e_{Rmax}$ (m)	${}^O e_{\psi max}$ (rad)	${}^O e_{\theta 3 max}$ (rad)	${}^O e_{\theta 4 max}$ (rad)	E_R ($m^2 \cdot s$)	E_ψ ($rad^2 \cdot s$)	$E_{\theta 3}$ ($rad^2 \cdot s$)	$E_{\theta 4}$ ($rad^2 \cdot s$)
1	1,2855	0,9041	1,2245	0,5833	3,4618	3,1887	5,0953	0,9457
2	1,4033	1,1172	1,1610	1,3709	6,3291	6,2924	6,7802	3,4472
3	1,1617	0,9834	1,6516	0,7222	1,7553	2,4525	4,0676	1,0323
4	1,2388	0,9900	2,0737	0,7729	1,9984	2,1200	4,9833	0,8433
5	1,2726	1,1126	2,0751	1,5035	2,5026	2,6450	4,4908	2,7469
6	0,9838	1,3072	2,7141	1,1331	1,8966	3,4709	5,0955	2,4332
7	1,2481	1,0497	1,0338	1,5377	2,4399	2,5006	1,2010	2,9211

Na rys. 10 pokazano zadany tor ruchu charakterystycznego punktu R robota (oznaczony jako ${}^O\mathbf{r}_{Rd}$) oraz rzeczywiste tory ruchu tego punktu (oznaczone jako ${}^O\mathbf{r}_{Rj}$, $j = \{1, \dots, 7\}$, gdzie j to nr wariantu z tab. 1), które uzyskano w wyniku ruchu robota dla analizowanych wariantów manewru zakręcania.

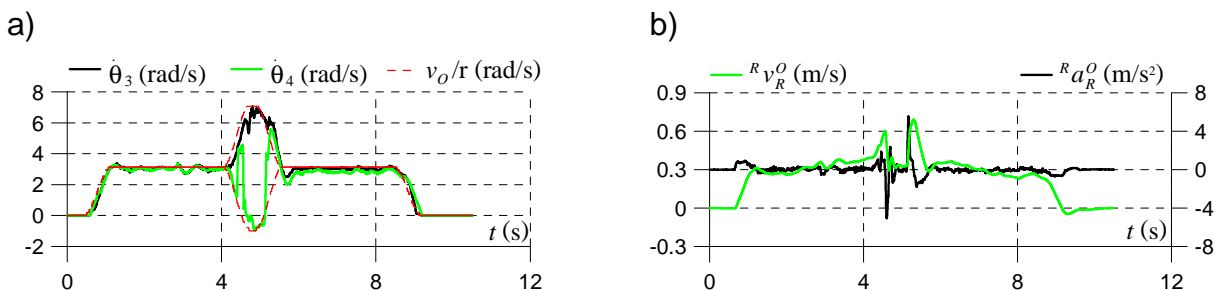


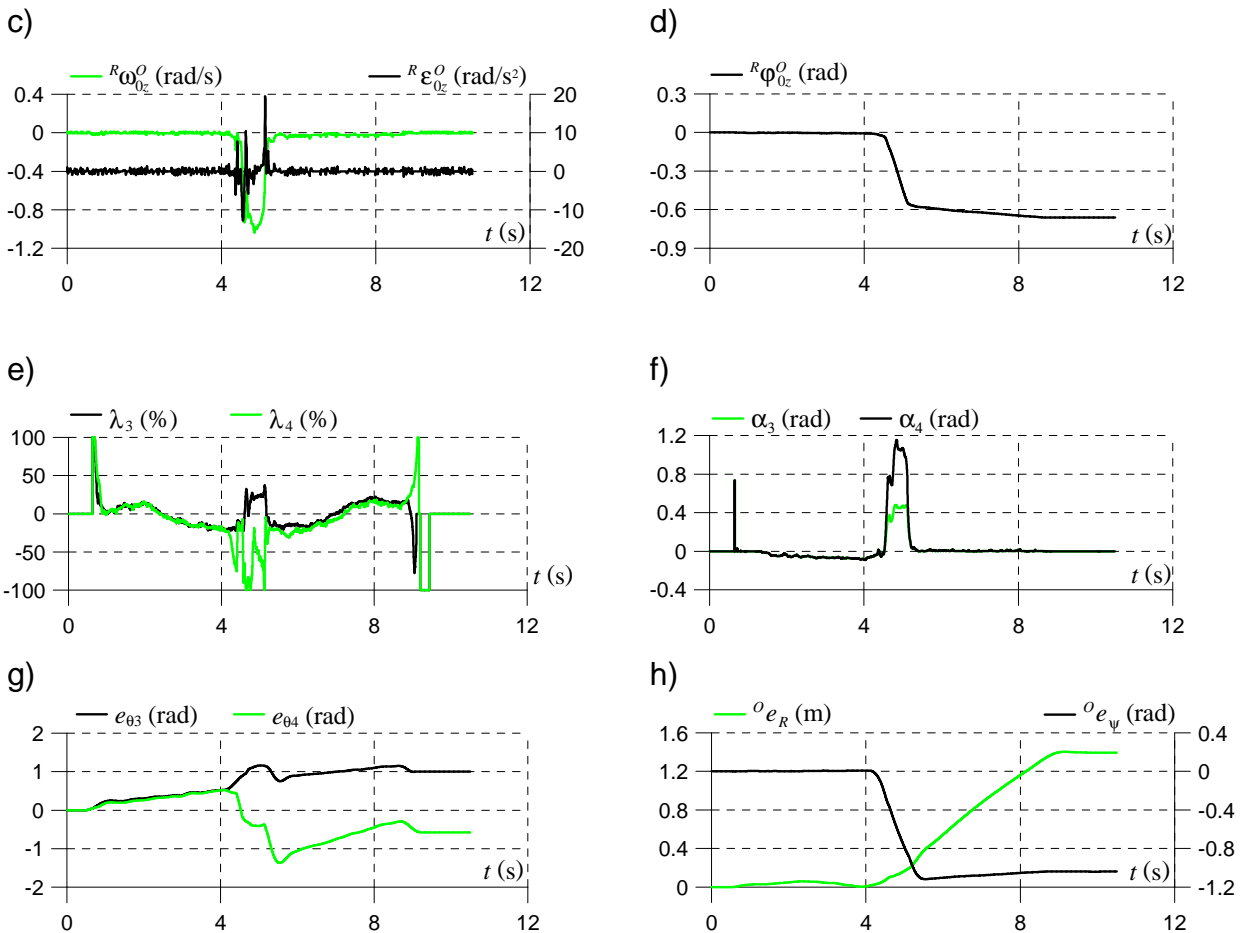
Rys. 10. Zadany tor ruchu punktu R robota oraz rzeczywiste tory ruchu tego punktu uzyskane w wyniku ruchu robota po: a – wykładzinie dywanowej, b – wykładzinie PVC

Poniżej zaprezentowano natomiast wyniki wybranych eksperymentów pomiarowych.

Eksperyment 1 – wariant 2 ($v_{Ru} = 0,3$ m/s, $\omega_{0zu} = -2$ rad/s, wykładzina dywanowa)

Pierwszy analizowany w pracy eksperyment pomiarowy dotyczył analogicznego ruchu jak w **Symulacji 1**. W badaniach doświadczalnych pod uwagę były brane te same przebiegi czasowe wybranych parametrów, co w badaniach symulacyjnych. Uzyskane wyniki pierwszego eksperymentu pomiarowego zamieszczono na rys. 11.

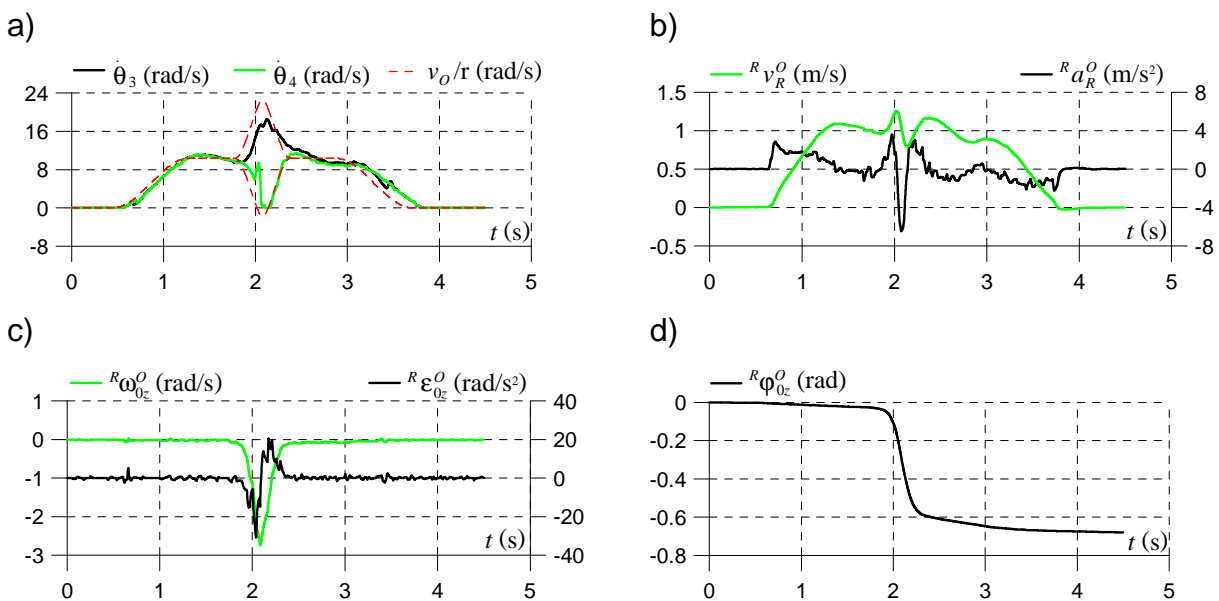


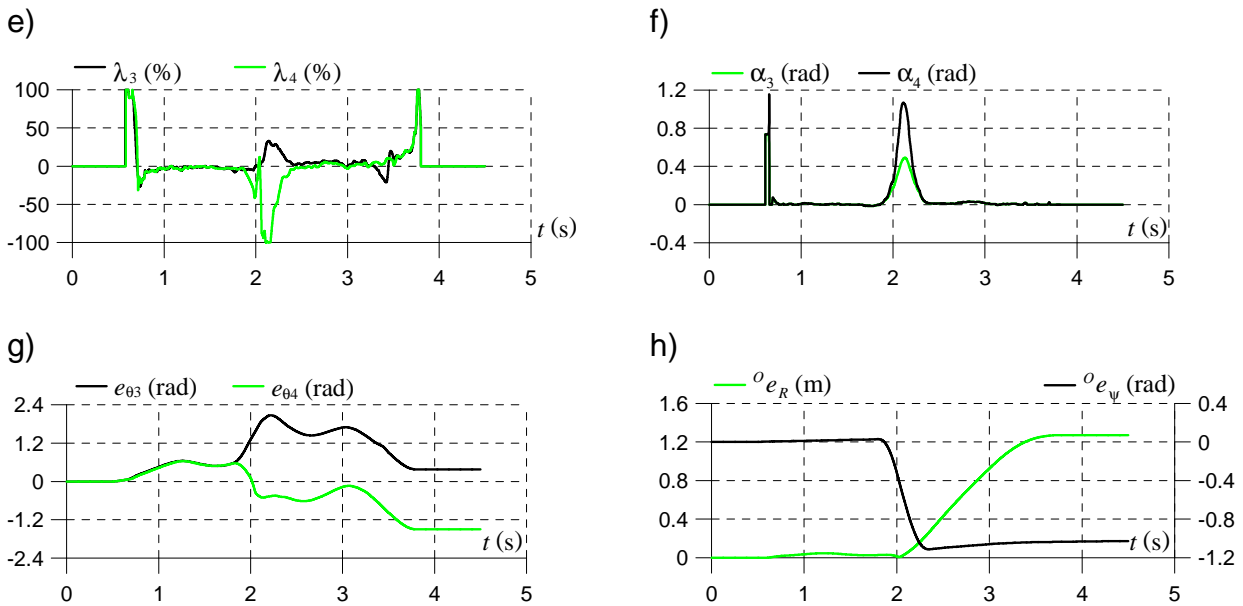


Rys. 11. Wyniki badań doświadczalnych manewru zakręcania robota na wykładzinie dywanowej dla prędkości $v_{Ru} = 0,3$ m/s, $\omega_{0zu} = -2$ rad/s

Eksperyment 2 – wariant 5 ($v_{Ru} = 1$ m/s, $\omega_{0zu} = -6,67$ rad/s, wykładzina dywanowa)

Drugi eksperyment pomiarowy był realizowany dla tych samych założeń, co **Symulacja 2**. Przebiegi czasowe otrzymane w wyniku tego eksperymentu pokazane są na rys. 12.

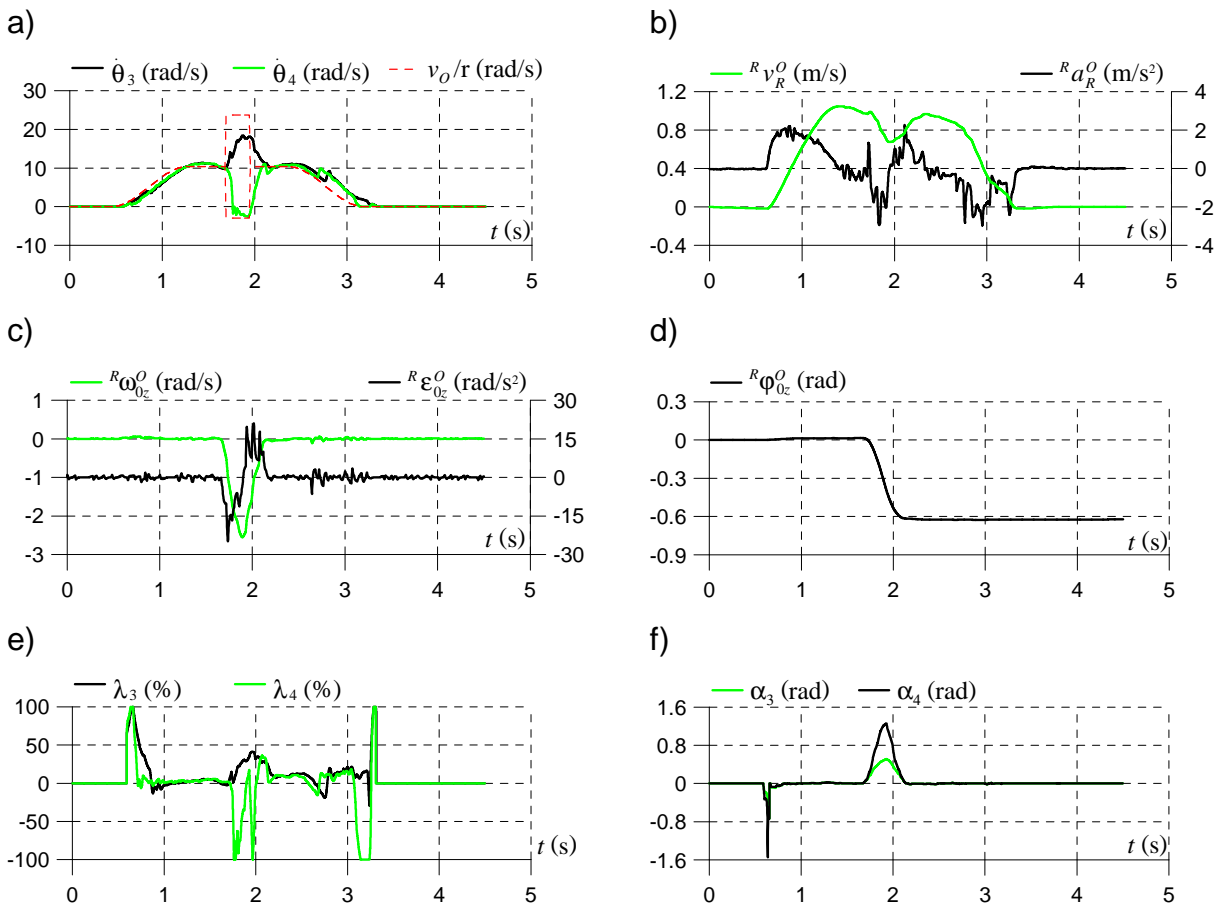


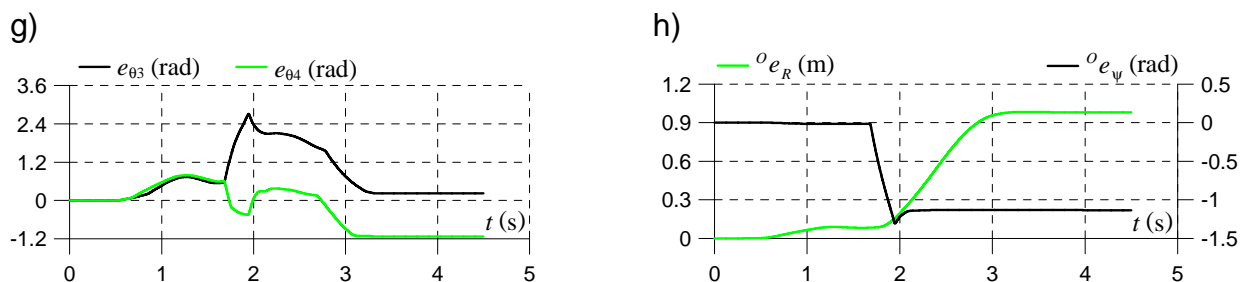


Rys. 12. Wyniki badań doświadczalnych manewru zakręcania robota na wykładzinie dywanowej dla prędkości $v_{Ru} = 1$ m/s, $\omega_{0zu} = -6,67$ rad/s

Eksperyment 3 – wariant 6 ($v_{Ru} = 1$ m/s, $\omega_{0zu} = -6,67$ rad/s, wykładzina PVC)

Ostatni, trzeci eksperyment pomiarowy odpowiada **Symulacji 3**, tj. analizowany jest ruch robota po wykładzinie PVC dla analogicznej zadanej trajektorii ruchu robota. Wyniki tego eksperymentu pomiarowego zaprezentowane są na rys. 13.





Rys. 13. Wyniki badań doświadczalnych manewru zakręcania robota na wykładzinie PVC dla prędkości $v_{Ru} = 1$ m/s, $\omega_{0zu} = -6,67$ rad/s

5. PODSUMOWANIE, WNIOSKI I KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ

W pracy zaprezentowano wyniki analizy manewru zakręcania mobilnego robota kołowego SCOUT. W ramach badań symulacyjnych i doświadczalnych zbadano wpływ poślizgu kół jezdnych na dokładność realizacji ruchu przez robota.

Z przeprowadzonych badań wynikają poniższe główne wnioski.

- Poślizg wzdłużny w przypadku skokowych zmian zadanej prędkości liniowej osiąga większe wartości niż w przypadku, gdy prędkość ta zmienia się łagodnie, tj. zadawane są niewielkie przyspieszenia.
- Poślizg poprzeczny występuje podczas zakręcania robota i na jego występowanie istotny wpływ ma fakt, że koła jezdne robota są niekierowane.
- Badania eksperymentalne dla przypadku skokowych zmian prędkości liniowych oraz kątowych pozwoliły wyznaczyć maksymalne wartości przyspieszeń możliwe do uzyskania przez robota na analizowanych podłożach.
- W związku z występowaniem poślizgów kół jezdnych realizacja zadanego ruchu jest niedokładna. Tor ruchu robota istotnie różni się od zakładanego, co jest związane z mniejszą niż zakładano prędkością kątową obrotu własnego korpusu.
- Ze względu na duże wartości momentów napędowych w trakcie zakręcania, prędkości kątowe obrotu własnego kół jezdnych w niektórych przypadkach różnią się istotnie od wartości zadanych. Różnica ta uwidacznia się szczególnie dla małych prędkości ruchu.
- W przypadku ruchu robota po wykładzinie dywanowej uzyskane tory ruchu nie zależą istotnie od zadanych parametrów ruchu, co wynika z dużej przyczepności opon robota do podłoża. Większy wpływ zadanych parametrów ruchu robota na uzyskane tory ruchu zaobserwowano w przypadku ruchu robota po wykładzinie PVC.
- Różnice wyników badań symulacyjnych i doświadczalnych wynikają ogólnie rzecz biorąc z niedokładności modelu robota, z niedokładności związanych z realizacją badań na rzeczywistym robocie (w szczególności z niedokładności pomiarów) oraz z różnic w warunkach obu rodzajów badań. Można do nich zaliczyć:
 - regulator kół jezdnych robota, który w badaniach symulacyjnych został zrealizowany w uproszczony sposób,
 - niedokładność modelu napędów robota,
 - niedokładność modelu współpracy opon z podłożem, tj. w zakresie wyznaczanych sił i momentów sił na styku opon z podłożem,
 - niedokładność parametrów modelu dynamiki robota,

- niedokładność oraz zmienność w rzeczywistych warunkach współczynników opisujących współpracę kół jezdnych z podłożem,
 - zmienne nachylenie rzeczywistego terenu mające wpływ na rejestrowane przyspieszenia liniowe ze względu na zmienny udział przyspieszenia grawitacyjnego w mierzonych przyspieszeniach,
 - błędy pomiaru poszczególnych instrumentów pomiarowych,
 - opóźnienia wynikające z działania rzeczywistego regulatora kół jezdnych oraz opóźnienia zastosowanych instrumentów pomiarowych,
 - niedokładności podstawy czasu w eksperymentach pomiarowych, co miało wpływ na uzyskane wartości wskaźników jakości.
 - numeryczne całkowanie przyspieszeń i prędkości.
- Z przeprowadzonych badań wynika konieczność uwzględnienia poślizgów kół jezdnych analizowanego robota w modelu jego dynamiki.

W ramach dalszych badań planowane jest zwiększenie dokładności realizacji ruchu robota podczas zakręcania poprzez użycie dodatkowo regulatora prędkości platformy mobilnej. W tym celu zostanie wykorzystany pomiar prędkości kątowej obrotu własnego korpusu robota z modułu czujników iNEMO.

Niniejsza praca została zrealizowana w ramach projektu pt. „Modelowanie dynamiki mobilnego robota czterokołowego i sterowanie jego ruchem nadążnym z ograniczeniem poślizgu kół jezdnych”. Projekt jest finansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2011/03/B/ST7/02532.

LITERATURA

- [1] Giergiel J., Kurc K., Cyfrowe modelowanie robota z napędem gąsienicowym, Modelowanie inżynierskie, 12, 2012, 53-60.
- [2] Giergiel J., Kurc K., Mechatronics of the inspective robot, Mechanics and Mechanical Engineering, 10(1), 2006, 56-73.
- [3] Pacejka H.B., Tire and Vehicle Dynamics, 2nd Edition, SAE International and Elsevier 2005.
- [4] Trojnacki M., Analiza wpływu charakterystyk prędkości zadanej na ruch wzdłużny robota mobilnego, Mechanik, 2013(7), 2013, 771-782.
- [5] Trojnacki M., Szykarczyk P., Andrzejuk A., Tendencje rozwoju mobilnych robotów lądowych (1). Przegląd robotów mobilnych do zastosowań specjalnych, Pomiary Automatyka Robotyka, 2008(6), 2008, 11-14.
- [6] Wołoszczuk A., Andrzejczak M., Szykarczyk P., Architecture of mobile robotics platform planned for intelligent robotic porter system–IRPS project, Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems, 1(3), 2007, 59-63.
- [7] PIAP, Mobile robots for counter-terrorism, <http://www.antiterrorism.eu>, 2013.