

dr inż. Maciej Trojnacki  
Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów

## **MODELOWANIE, PROGRAMOWANIE I SYMULACJA WSPINANIA SIĘ ROBOTA MOBILNEGO PO SCHODACH**

*Praca dotyczy problematyki modelowania, programowania i symulacji ruchu małego robota mobilnego. W ramach niej opracowano model dynamiczny robota uwzględniający sekwencję wspinania się po schodach. Na tej podstawie przygotowano oprogramowanie symulacyjne z zastosowaniem pakietu Matlab/Simulink. Dodatkowo zrealizowano animację ruchu robota przy użyciu przybornika Virtual Reality.*

### **THE MODELING, PROGRAMMING AND COMPUTER SIMULATION OF MOBILE ROBOT CLIMBING THE STAIRS**

*This work is concerned about modeling, programming and computer simulation of a small mobile robot. In the paper a robot dynamic model was worked out. This model takes into account sequence of the robot climbing the stairs. Based on this model the simulation software using Matlab/Simulink package was prepared. Additionally, the robot animation using Virtual Reality Toolbox was realized.*

#### **1. WPROWADZENIE**

Modelowanie ruchu robotów mobilnych w zróżnicowanym terenie, w szczególności po schodach jest złożonym problemem, wymagającym zastosowania zaawansowanych metod i narzędzi. W literaturze można znaleźć nieliczne przykłady mobilnych robotów kołowych i gąsienicowych, które mogą poruszać się po schodach. Takie przykłady są opisane m.in. w pracach [1-5]. Znacznie częściej można spotkać przykłady robotów kroczących przeznaczonych do realizacji tego typu zadań.

W pracach [1, 2] omówiono szczegółowy model robota dla sekwencji ruchu po schodach. Wspinanie się omawianego robota po schodach zrealizowano poprzez zastosowanie specjalnego zawieszenia oraz uzyskanie odpowiednio dużych sił tarcia między kołami i czołem stopi (poprzez odpowiednio dużą siłę docisku). Umożliwiło to pionowe toczenie się kół po stopniu.

Niniejszy artykuł stanowi kontynuację prac opisanych w publikacji [4]. W pracy tej zaprezentowano przegląd istniejących rozwiązań robotów mobilnych o specyficznych układach jezdnych oraz rozwiązań hybrydowych. Opisano koncepcję małogabarytowego robota mobilnego do rozpoznania wewnątrz budynków oraz przebieg prac projektowych. Omówiono także najważniejsze problemy techniczne, konstrukcyjne oraz technologiczne, które wystąpiły podczas opracowywania modelu konstrukcji robota.

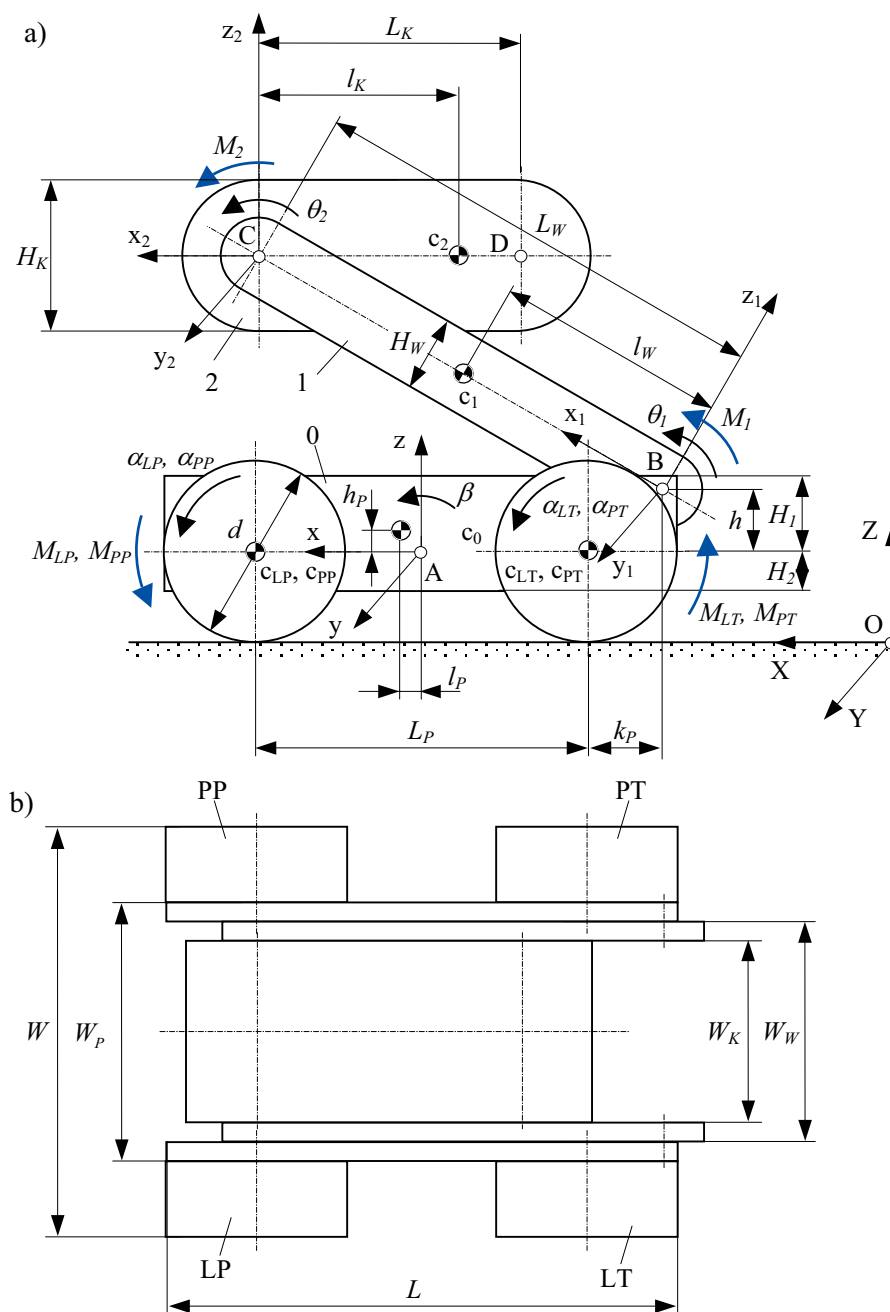
Publikacja dotyczy problematyki modelowania i programowania ruchu małogabarytowego robota mobilnego. Model robota opracowano z uwzględnieniem elementów dynamiki. Na tej podstawie przygotowano oprogramowanie symulacyjne umożliwiające zarówno symulację, jak i animację ruchu robota. Wykonano badania symulacyjne obejmujące syntezę ruchu robota dla charakterystycznych jego konfiguracji, z uwzględnieniem położenia środka masy i punktu środka nacisku. W wyniku symulacji obliczono także siły reakcji podłoża oraz momenty napędowe.

#### **2. MODEL ROBOTA**

Do badań przyjęto strukturę kinematyczną robota pokazaną na rys. 1. Na rysunku zaznaczono oznaczenia członów, charakterystyczne punkty, układy współrzędnych związane z podwoziem, wspornikiem i korpusem oraz nieruchomy układ odniesienia (OXYZ). Pokazano także kąty

przegubowe, kąty związane z obrotem kół i pochylaniem podwozia oraz momenty napędowe. Wprowadzono oznaczenia istotnych wymiarów, w tym związanych z położeniem środków mas poszczególnych członów (założono, że rozkład mas robota jest symetryczny względem płaszczyzny  $Ax_z$ ). Robot składa się z podwozia 0, wspornika 1, korpusu 2 oraz czterech kół oznaczonych jako LP (lewe przednie), PP (prawe przednie), LT (lewe tylne), PT (prawe tylne). W niniejszej pracy zakłada się, że wszystkie koła są niezależnie napędzane i sterowane. W przegubach B i C umieszczone są serwonapędy realizujące obroty o kąty  $\theta_1$  i  $\theta_2$ .

Opisany w niniejszej pracy model symulacyjny robota powstał przed uszczegółowieniem konstrukcji robota i zawiera sugestie dotyczące końcowych zmian. Wstępna konstrukcja robota, opisana w pracy [4], została zaprojektowana z zastosowaniem programu ProEngineer.

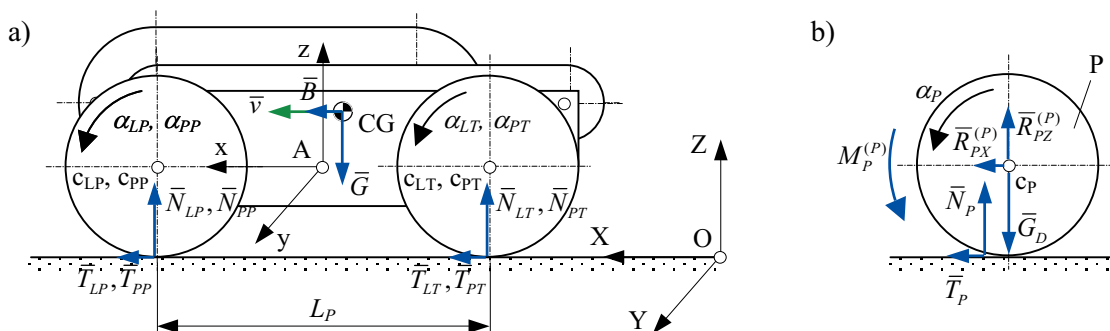


Rys. 1. Struktura kinematyczna robota w widoku z lewej strony robota (a) i z góry (b)

Robot może wspinać się po schodach wykonując odpowiednią sekwencję ruchów. Ze względu na ograniczoną objętość niniejszej publikacji, zostały w niej opisane tylko dwie wybrane charakterystyczne konfiguracje robota w trakcie jego wspinania się po schodach.

## 2.1. Charakterystyczne konfiguracje robota

Zakłada się, że początkowo robot jedzie prosto rozpędzając się od prędkości  $v = v_0 = 0$  do  $v = v_{max} = 4$  km/h (Konfiguracja 1) – rys. 2. Na wszystkich poniższych rysunkach prezentujących poszczególne konfiguracje robota zaznaczono układy współrzędnych, kąty przegubowe oraz działające na robota siły zewnętrzne. Pokazany na tych rysunkach wektor  $\vec{B}$  oznacza z kolei tzw. siłę bezwładności działającą na środek masy robota. Na rys. 2b zaznaczono dodatkowo wewnętrzne siły reakcji w przegubie  $c_p$  i moment napędowy dla przedniego koła (lewego lub prawego –  $P = \{LP, PP\}$ ). Analogiczny rozkład sił i momentów sił obowiązuje dla tylnych kół.



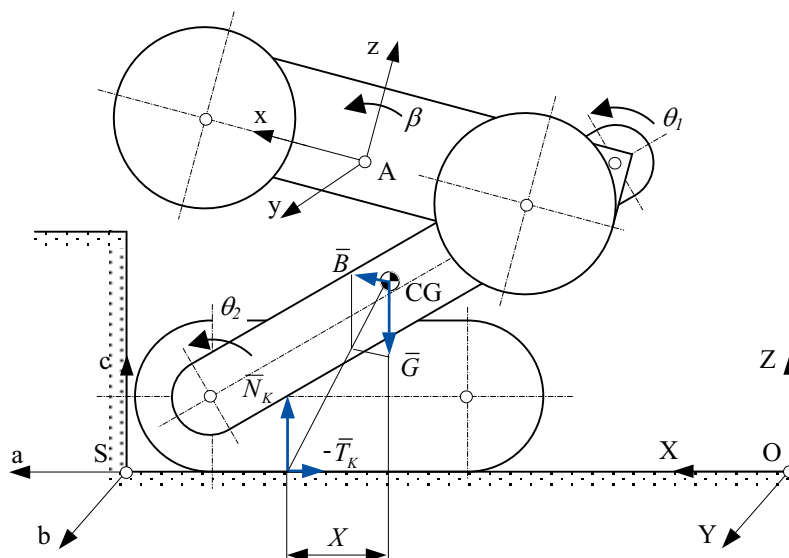
Rys. 2. Ruch robota do przodu – Konfiguracja 1

Podczas jazdy do przodu prędkości kątowe obrotu wszystkich kół są takie same i wynoszą:

$$\alpha_{LP} = \alpha_{PP} = \alpha_{LT} = \alpha_{PT} = \alpha.$$

Z chwilą wykrycia schodów robot zwalnia od prędkości  $v = v_{max} = 4$  km/h do  $v = v_k = 0$ , zatrzymując się w zadanej odległości od przeszkody.

Następnie korpus robota jest opuszczany aż do zetknięcia się z podłożem i rozpoczyna się podnoszenie podwozia, do chwili, gdy przednie koła znajdują się nad stopniem (Konfiguracja 2) – rys. 3.

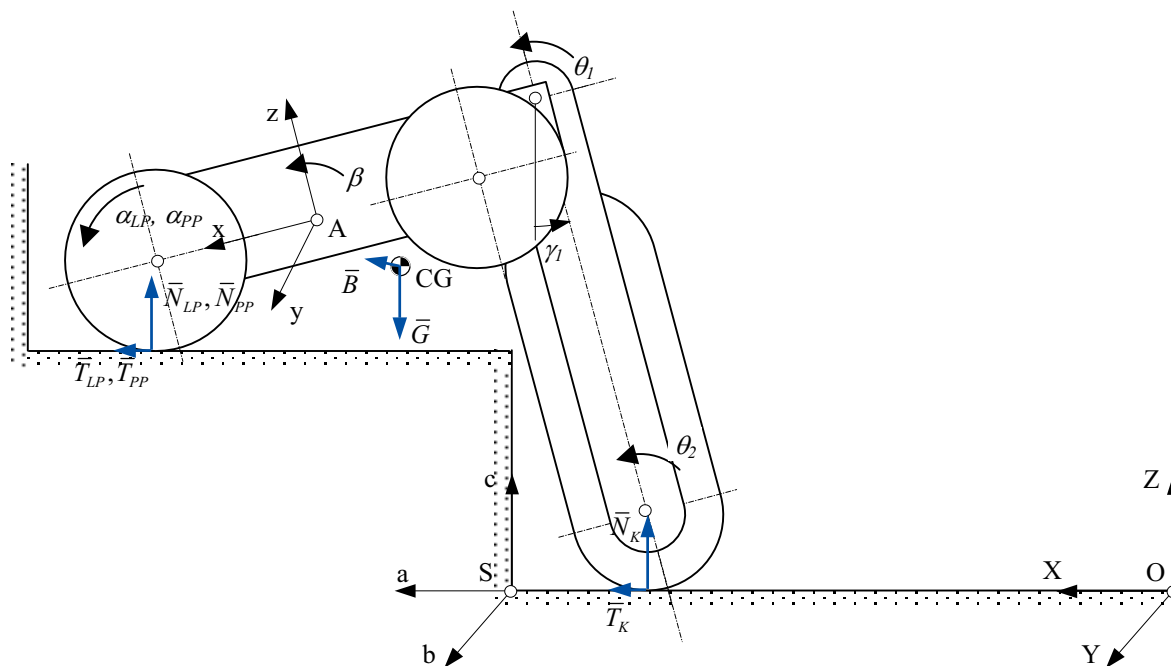


Rys. 3. Podnoszenie podwozia – Konfiguracja 2

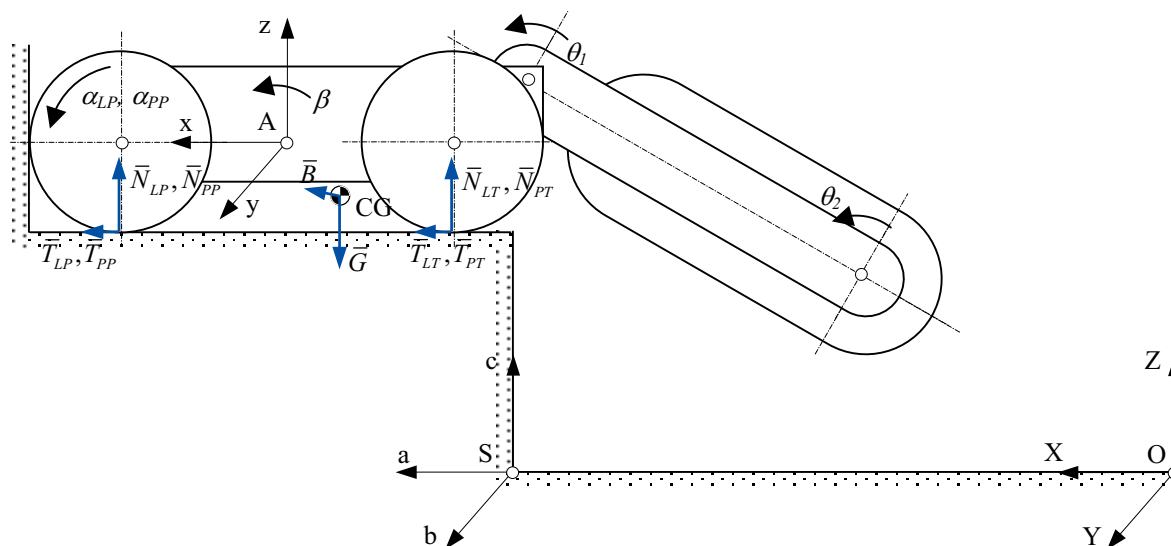
Przy pomocy czujnika odległości, zamontowanego na spodzie podwozia, mierzona jest odległość podwozia od stopnia. Przednie koła są opuszczane na stopień aż do zbliżenia się kół do stopnia. Następnie przednie koła toczą się do przodu ciągnąc podwozie, aż do uzyskania pionowego położenia wspornika (Konfiguracja 3) – rys. 4. Napęd obracający człon 1 może być wtedy wyłączony.

W dalszej części wspinania się robota po stopniu, korpus robota obraca się w kierunku wspornika aż do pokrycia się z nim (przednie koła są wówczas napędzane/zahamowane, aby zapobiec ruchowi robota do tyłu) (Konfiguracja 4) – rys. 5.





Rys. 6. Podnoszenie wspornika i korpusu oraz toczenie się przednich kół po stopniu – Konfiguracja 5



Rys. 7. Obracanie się wspornika wraz z korpusem aż do uzyskania pozycji wyjściowej – Konfiguracja 6

## 2.2. Charakterystyczne punkty robota

Położenie charakterystycznych punktów robota w układzie związanym z jego podwoziem (Axyz) określa się korzystając z zależności wynikających z jego geometrii i bieżącej konfiguracji zależnej od kątów przegubowych  $\theta_1$  i  $\theta_2$ .

Położenie środka masy robota w tym samym układzie wyznacza się z zależności:

$$\begin{aligned} x_{CG} &= \left[ m_p l_p + m_1 (-L_p/2 - k_p + l_w \cos \theta_1) + m_2 (-L_p/2 - k_p + L_w \cos \theta_1 - l_k \cos(\theta_1 + \theta_2)) \right] / m, \\ y_{CG} &= 0, \quad z_{CG} = \left[ m_p h_p - m_1 l_w \sin \theta_1 + m_2 (-L_w \sin \theta_1 + l_k \sin(\theta_1 + \theta_2)) \right] / m, \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie:  $m_p$ ,  $m_1$  i  $m_2$  to masy odpowiednio podwozia (wraz z kołami), wspornika i korpusu.

Położenie charakterystycznych punktów robota w układzie nieruchomym (OXYZ) wyznacza się z kolei z poniższych równań:

$$X_P = X_A + x_P \cos \beta + z_P \sin \beta, Y_P = y_P, Z_P = Z_A - x_P \sin \beta + z_P \cos \beta, \quad (2)$$

gdzie:  $P = \{LP, PP, LT, PT, B, C, D, CG\}$  – charakterystyczne punkty robota.

Położenie punktu środka nacisku (Centre of Pressure) w nieruchomym układzie odniesienia (OXYZ) określa się z zależności:

$$X_{CP} = X_{CG} - \ddot{X}_{CG} (Z_{CG} - kH_S) / (g + \ddot{Z}_{CG}), Y_{CP} = 0, Z_{CP} = kH_S, \quad (3)$$

gdzie:  $k, H_S$  – nr i wysokość stopnia, na którym znajduje się robot,  $g$  – przyspieszenie ziemskie.

Jeżeli tak obliczona współrzędna  $X_{CP} > X_S$  ( $X_S$  – współrzędna „x” punktu S stopnia), to wówczas należy zwiększyć  $k$  o 1 i powtórzyć obliczenia wg wzoru (3).

### 2.3. Model dynamiczny robota

Dla robota został opracowany przybliżony model dynamiczny uwzględniający najważniejsze zjawiska i wielkości fizyczne. W niniejszej pracy, ze względu na jej ograniczone rozmiary opisano tylko dwie wybrane konfiguracje związane ze wspinaniem się robota po schodach, tj. Konfiguracje 2 i 5.

Analizuje się symetryczne wspinanie robota, zakłada się także symetryczne względem płaszczyzny  $Axz$  rozmieszczenie mas robota, w związku z czym przyjmuje się, że działające siły i momenty napędowe są takie same dla odpowiednich lewych i prawych kół, czyli spełnione są zależności:

$$N_{LP} = N_{PP} = N_P, N_{LT} = N_{PT} = N_T, T_{LP} = T_{PP} = T_P, T_{LT} = T_{PT} = T_T, \quad (4a)$$

$$M_{LP} = M_{PP} = M_P, M_{LT} = M_{PT} = M_T, \quad (4b)$$

gdzie:  $N_P, N_T, T_P, T_T, M_P, M_T$  to odpowiednio: siły normalne (nacisku), siły styczne (tarcia) oraz momenty napędowe dla przednich i tylnych kół jezdnych.

Wyznaczając siły reakcji podłoża oraz położenie punktu środka nacisku rozpatruje się robota jako całość, natomiast określając momenty napędowe rozpatruje się osobno poszczególne człony robota. W równaniach zakłada się, że wszystkie siły reakcji i momenty napędowe mają zwroty zgodne ze zwrotami osi przyjętego układu odniesienia.

Aby w Konfiguracjach 1, 3 - 6 (rys. 2, 4 - 7) nie wystąpił poślizg kół robota względem podłoża, a w Konfiguracjach 2 - 5 (rys. 3 - 6) nie wystąpił ruch korpusu robota, współczynniki tarcia ślizgowego między kołami/korpusem a podłożem powinny być większe od wartości minimalnych. Znając wartości sił stycznych (tarcia) i normalnych (nacisku), wymagane (minimalne) wartości współczynników tarcia ślizgowego określa się z zależności:

$$|T_P| \leq T_{P\max} = \mu_P |N_P| \Rightarrow \mu_P \geq \mu_{P\min} = |T_P / N_P|, \quad (5a)$$

$$|T_T| \leq T_{T\max} = \mu_T |N_T| \Rightarrow \mu_T \geq \mu_{T\min} = |T_T / N_T|, \quad (5b)$$

$$|T_K| \leq T_{K\max} = \mu_K |N_K| \Rightarrow \mu_K \geq \mu_{K\min} = |T_K / N_K|. \quad (5c)$$

#### 2.3.1. Podnoszenie podwozia – Konfiguracja 2

Dynamiczne równania ruchu środka masy robota dla Konfiguracji 2 (rys. 3) mają postać:

$$m\ddot{X}_{CG} = T_K, m\ddot{Z}_{CG} = N_K - G, \quad (6)$$

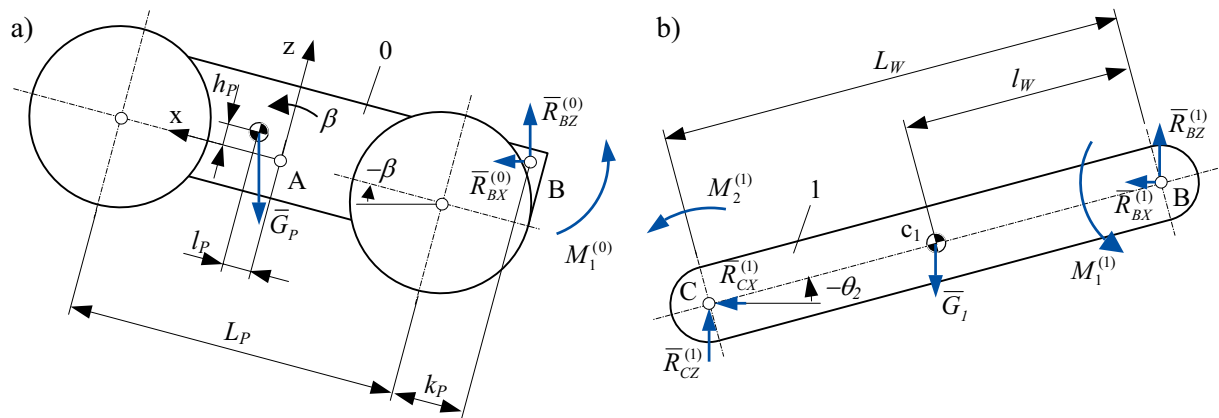
gdzie:  $G$  – siła ciężkości robota.

Na podstawie równań (6) otrzymuje się rozwiązanie:

$$N_K = m(g + \ddot{Z}_{CG}), T_K = m\ddot{X}_{CG}. \quad (7)$$

W tej konfiguracji umowny punkt styczności korpusu robota z podłożem (K) pokrywa się z wyznaczonym punktem środka nacisku (CP).

Momenty napędowe w przegubach robota wyznacza się rozpatrując osobno podstawowe zespoły robota i uwzględniając siły wewnętrzne. Działające na podwozie (wraz z kołami) i wspornik robota siły i momenty sił dla Konfiguracji 2 pokazano na rys. 8.



Rys. 8. Siły i momenty sił działające na podwozie i wspornik robota w Konfiguracji 2

Ze wzajemnego oddziaływania na siebie zespołów robota oraz z dynamicznych równań ruchu dla tych zespołów wynikają następujące zależności:

$$M_1^{(1)} = -M_1^{(0)}, M_2^{(2)} = -M_2^{(1)}, \tag{8}$$

$$R_{BX}^{(0)} = -R_{BX}^{(1)} = m_P \ddot{X}_P = (m_0 + 4m_D) \ddot{X}_P, R_{BZ}^{(0)} = -R_{BZ}^{(1)} = m_P \ddot{Z}_P + G_P = (m_0 + 4m_D) (\ddot{Z}_P + g).$$

Z kolei z geometrii wynika, że między kątami przegubowymi i kątem pochylenia podwozia dla Konfiguracji 2 zachodzi zależność:  $\beta = -\theta_1 - \theta_2$ .

Momenty napędowe w przegubach robota określa się z zależności:

$$M_1^{(1)} = -M_1^{(0)} = I_B^{(P)} \ddot{\theta}_1 + G_P [(L_P/2 + k_P + l_P) \cos \beta + h_P \sin \beta] \tag{9a}$$

$$M_2^{(2)} = -M_2^{(1)} = I_C^{(1)} \ddot{\theta}_2 - [G_1 (L_W - l_W) - R_{BZ}^{(1)} L_W] \cos \theta_2 - R_{BX}^{(1)} L_W \sin \theta_2 + M_1^{(1)} \tag{9b}$$

gdzie:  $G_1 = m_1 g$ ,  $G_P = m_P g = (m_0 + 4m_D) g$  - siły ciężkości odpowiednio wspornika i podwozia,  $I_B^{(P)}, I_C^{(1)}$  - masowe momenty bezwładności podwozia/wspornika względem osi obrotu w punkcie B/C.

### 2.3.2. Podnoszenie wspornika i korpusu oraz toczenie się przednich kół – Konfiguracja 5

Z geometrii robota dla Konfiguracji 5 (rys. 6) wynikają następujące zależności:

$$\gamma_1 = \theta_1 + \beta - \pi/2, \theta_2 = 0. \tag{10}$$

Dynamiczne równania ruchu środka masy robota mają w tym przypadku postać:

$$m \ddot{X}_{CG} = 2T_P + T_K, m \ddot{Z}_{CG} = 2N_P + N_K - G. \tag{11}$$

Dodatkowo zapisuje się równanie równowagi momentów sił względem punktu S:

$$\sum M_S = N_K (X_S - X_C) + 2T_P H_S - 2N_P (X_P - X_S) + (G - B_Z) (X_{CG} - X_S) + B_X (Z_{CG} - kH_P) = 0. \tag{12}$$

Równanie ruchu toczących się po stopniu przednich kół ma postać (rys. 2b):

$$I_D \ddot{\alpha} = M_P - T_P d/2 - N_P f, \tag{13}$$

gdzie:  $f$  – tzw. ramię tarcia toczenia,  $I_D$  – masowy moment bezwładności względem osi obrotu kół.

W celu wyznaczenia ostatecznego rozwiązania wprowadza się również założenie upraszczające, że pomiędzy siłami tarcia dla przednich kół i dla korpusu zachodzi zależność:

$$T_K = 2T_P. \quad (14)$$

W wyniku rozwiązania wyznacza się szukane wielkości w następującej kolejności:

$$T_P = m\ddot{X}_{CG}/4, T_K = m\ddot{X}_{CG}/2, \quad (15a)$$

$$N_P = m \left[ 2(g + \ddot{Z}_{CG})(X_{CG} - X_C) + \ddot{X}_{CG}H_S(1 + 2k) - 2\ddot{X}_{CG}Z_{CG} \right] / \left[ 4(X_P - X_C) \right], \quad (15b)$$

$$N_K = m(g + \ddot{Z}_{CG}) - 2N_P, M_P = I_D\ddot{\alpha} + T_P d/2 + N_P f. \quad (15c)$$

Współrzędne punktu K wynoszą:

$$X_K = X_C + (H_K/2 - H_W/2)\cos\theta_2, Z_K = kH_S. \quad (16)$$

Wyznaczenie momentów napędowych w przegubach robota przebiega analogicznie jak poprzednio. Działające na korpus i wspornik robota siły i momenty sił pokazano na rys. 9. Ze wzajemnego oddziaływania na siebie poszczególnych brył robota oraz z dynamicznych równań ruchu dla tych brył wynikają następujące zależności:

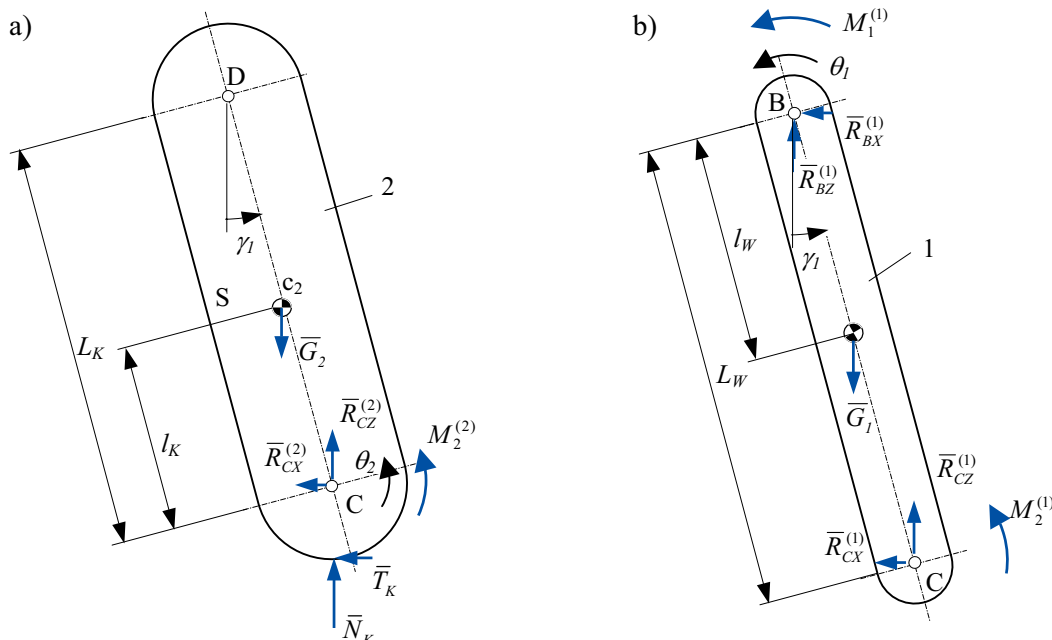
$$M_1^{(1)} = -M_1^{(0)}, M_2^{(2)} = -M_2^{(1)}, R_{CX}^{(2)} = -R_{CX}^{(1)} = m_2\ddot{X}_2 - T_K, R_{CZ}^{(2)} = -R_{CZ}^{(1)} = m_2\ddot{Z}_2 - N_K + G_2. \quad (17)$$

Momenty napędowe w przegubach robota wyznacza się ostatecznie z zależności:

$$M_2^{(2)} = -M_2^{(1)} = I_C^{(2)}\ddot{\theta}_2 - G_2l_K \sin\gamma_1 + T_K(Z_C - kH_S) + N_K(X_K - X_C), \quad (18a)$$

$$M_1^{(1)} = -M_1^{(0)} = I_B^{(1)}\ddot{\theta}_1 + R_{CX}^{(1)}L_W \cos\gamma_1 + (G_1l_W - R_{CZ}^{(1)}L_W)\sin\gamma_1 - M_2^{(1)}, \quad (18b)$$

gdzie:  $G_1 = m_1g$ ,  $G_2 = m_2g$  – siły ciężkości odpowiednio wspornika i korpusu,  $I_B^{(1)}$ ,  $I_C^{(2)}$  – masowe momenty bezwładności wspornika i korpusu względem osi obrotu w punktach B i C.



Rys. 9. Siły i momenty sił działające na korpus i wspornik robota w Konfiguracji 5



### 3. OPROGRAMOWANIE SYMULACYJNE ROBOTA

Oprogramowanie symulacyjne robota zostało opracowane z zastosowaniem pakietu Matlab/Simulink. Zostało pomyślane w taki sposób, aby było możliwe zarówno wykorzystanie jego w badaniach symulacyjnych z zastosowaniem pakietu Matlab/Simulink, jak i na rzeczywistym sterowniku robota. Całość oprogramowania została napisana w języku C. Na tej podstawie została stworzona s-funkcja programu Matlab. Zadaniem oprogramowania jest ostatecznie wyznaczenie wartości sterowań napędami robota. W trakcie symulacji wyznaczane są m.in. kąty i prędkości kątowe w przegubach robota, położenie jego środka masy oraz reakcje podłoża i momenty napędowe.

#### 3.1. Badania symulacyjne

Do badań symulacyjnych przyjęto następujące wartości wymiarów robota w milimetrach (rys. 1):

$L = 320$ ,  $W = 270$ ,  $d = 100$ ,  $w = 50$ ,  $W_P = 170$ ,  $L_P = 220$ ,  $l_P = 30$ ,  $h_P = 5$ ,  $k_P = 40$ ,  $H_1 = 50$ ,  $H_2 = 25$ ,  $h = 30$ ,  $L_W = 260$ ,  $l_W = 100$ ,  $W_W = 150$ ,  $H_W = 30$ ,  $L_K = 210$ ,  $l_K = 186$ ,  $W_K = 130$ ,  $H_K = 60$ .

Z kolei masy w gramach poszczególnych członów robota przyjęto jako:  $m_0 = 2340$ ,  $m_D = m_i = 100$  ( $i = LP, PP, LT, PT$ ),  $m_1 = m_W = 500$ ,  $m_2 = m_K = 1450$ .

Pozostałe istotne wielkości wynoszą:  $f = 2$  mm,  $g = 9,81$  m/s<sup>2</sup>.

O maksymalnej wysokości stopnia, na jaki może wspiąć się robot, decydują m.in. wymiary  $L_W$ ,  $H_K$ ,  $h$  i  $H_2$ . Minimalna długość stopni wynosi  $L_P + d/2 = 270$  mm. Minimalna wysokość stopni jest równa zero. Maksymalna wysokość stopni wynosi ok. 200 mm. W symulacji przyjęto wymiary nominalne stopni, tj.:  $L_S = 320$  mm,  $H_S = 160$  mm.

Symulację ruchu robota wykonano dla charakterystycznych konfiguracji robota opisanych w punkcie 2.1. Początkowo robot rozpędził się do prędkości 4 km/h i jechał prosto zbliżając się do schodów, następnie zahamował i rozpoczął wspinanie (po czasie ok. 1.7 s od początku symulacji), które realizował przez dwa cykle, z których każdy trwał ok. 10,4 s.

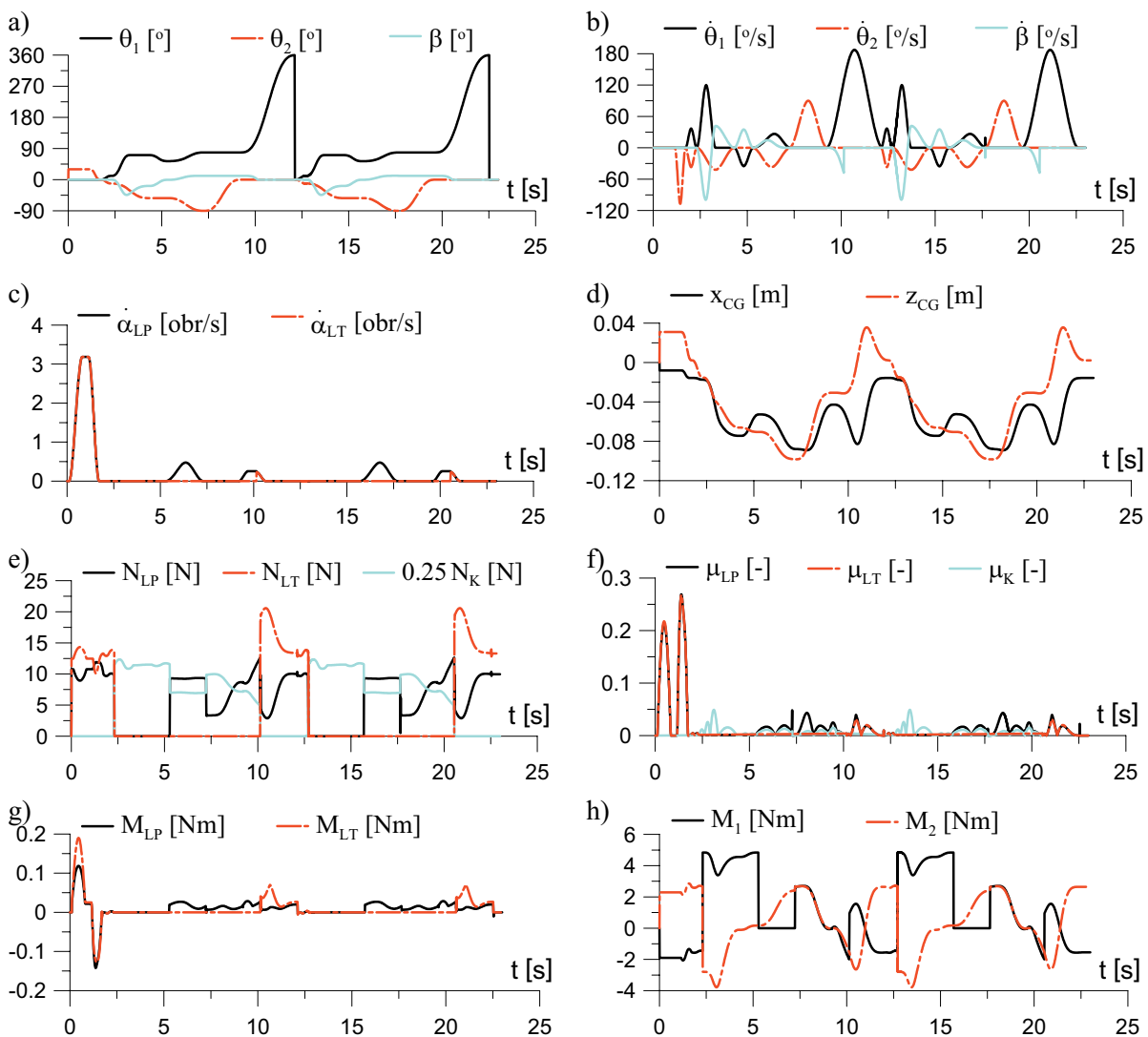
W wyniku symulacji uzyskano przebiegi czasowe pokazane na rys. 10. Kąt przegubowy  $\theta_1$  (rys. 10a) zmienia się podczas wspinania się robota po schodach w zakresie od  $-90^\circ$  do  $30^\circ$ , natomiast  $\theta_2$  w każdym cyklu wspinania zmienia się od  $0^\circ$  do  $360^\circ$ , zatem człon 2 względem członu 1 wykonuje za każdym razem pełny obrót. Wymaga to zastosowania w punkcie B (rys. 1) przegubu umożliwiającego nieograniczony obrót. Z kolei kąt pochylania podwozia (rys. 10a) zmienia się w zakresie od ok.  $-44^\circ$  do ok.  $11^\circ$ . Prędkość kątowa związana z obrotem członu 1 zmienia się w zakresie od  $-107^\circ/s$  do  $90^\circ/s$ , a członu 2 od ok.  $-35^\circ/s$  do ok.  $187^\circ/s$  (rys. 10b). Prędkości obrotowe kół przy maksymalnej prędkości jazdy robota równej 4 km/h wynoszą ponad 3 obr/s (rys. 10c).

Zmianę w czasie współrzędnych środka masy robota w układzie związanym z podwoziem pokazano na rys. 10d. Z przebiegów tych wynika, że ze względu na współrzędną  $x_{CG}$  krytyczną jest ostatnia Konfiguracja 6, w której przy poziomym ustawieniu zarówno wspornika, jak i korpusu, współrzędna  $x_{CG}$  wynosi ok.  $-0,083$  m, czyli środek masy jest przesunięty do tyłu blisko osi obrotu tylnych kół. Oś ta jest przesunięta do tyłu o  $-0,110$  m od początku układu związanego z podwoziem. Z kolei Konfiguracja 2 jest niebezpieczna ze względu na wysoko podniesione nad podłożem podwozie. W tej konfiguracji środek masy robota jest położony najwyżej, co przy stosunkowo wąskim korpusie może, przy niewielkim przechyleniu podłoża/stopnia, spowodować niekontrolowane boczne przepadnięcie robota.

Na rys. 10e pokazano składowe normalne siły reakcji (siły nacisku) odpowiednio dla lewego przedniego koła, lewego tylnego koła oraz korpusu. Tę ostatnią siłę zmniejszono na wykresie czterokrotnie w celu łatwiejszego porównania z pozostałymi. Ponieważ w pracy założono

symetryczny względem płaszczyzny Axz rozkład mas robota, dlatego wartości sił reakcji podłoża dla lewych i prawych kół są teoretycznie sobie równe.

Wymagane (minimalne) wartości współczynników tarcia ślizgowego (rys. 10f) wynikają z wartości bezwzględnej ilorazu składowych stycznych i normalnych sił reakcji podłoża. Maksymalne wartości tych współczynników dla współpracy kół jezdnych z podłożem występują podczas rozpędzania (ponad 0,2) i hamowania robota (ponad 0,25) w trakcie jego jazdy do przodu. W pozostałych fazach ruchu robota wszystkie współczynniki tarcia osiągają maksymalną wartość równą około 0.05. Ze względu na wartości współczynników tarcia krytyczną jest zatem Konfiguracja 1. Ponieważ w rzeczywistych warunkach jazdy współczynniki tarcia dla współpracy kół jezdnych z podłożem mogą przekroczyć wyliczoną maksymalną wartość 0,25, może zajść konieczność zmniejszenia maksymalnej wartości prędkości i przyspieszenia w trakcie jazdy robota.



Rys. 10. Uzyskane w symulacji przebiegi czasowe: kątów przegubowych i kąta pochylenia podwozia (a), prędkości kątowych w przegubach i pochylenia podwozia (b), prędkości obrotowych kół jezdnych (c), współrzędnych środka masy robota w układzie związanym z podwoziem (d), składowych normalnych sił reakcji podwozia dla kół LP i LT oraz korpusu (e), wymaganych współczynników tarcia dla kół LP i LT oraz korpusu (f) a także momentów napędowych dla kół jezdnych i w przegubach robota (g i h)

Obliczone wartości momentów napędowych dla kół jezdnych pokazano na rys. 10g. Maksymalne wartości występują podczas rozpędzania robota (około 0,2 Nm) i jego hamowania (około -0,15 Nm). W pozostałych fazach ruchu ich wartości są wyraźnie mniejsze. Wartość wynoszącą około 0,075 Nm osiągają napędy tylnych kół podczas ostatniej fazy ruchu związanej z podnoszeniem korpusu i wspornika (w ich poziomym położeniu). Podczas tej fazy ruchu napędy tylnych kół zapobiegają ruchowi robota do tyłu wskutek ruchu środka masy robota do przodu. W ten sposób zabezpieczają one robota przed upadkiem ze stopnia.

Przebiegi czasowe momentów napędowych związanych z obrotem członów 1 i 2 pokazano na rys. 10h. Wyznaczając te momenty założono, że napęd obracający człon 1 (wspornik) jest umieszczony w podwoziu, a człon 2 (korpus) w członie 1. W przypadku innego umiejscowienia tych napędów wartości momentów napędowych zmieniają znaki na przeciwne. Wartość momentu napędowego  $M_1$  zmienia się w zakresie od ok. -2,065 Nm do ok. 4,838 Nm, natomiast  $M_2$  od ok. -3,782 Nm do ok. 2,855 Nm.

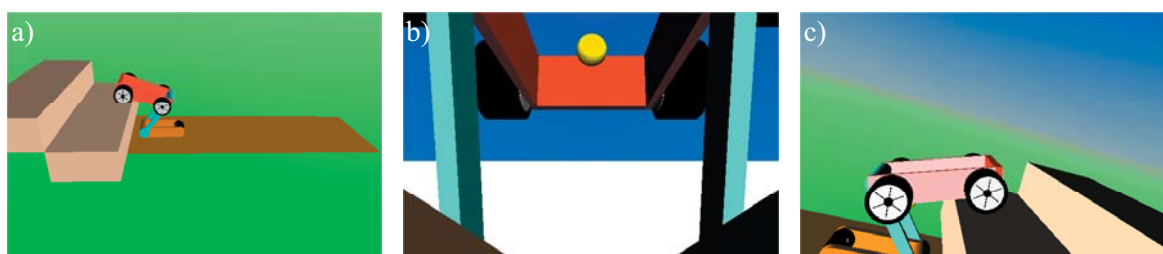
### 3.2. Animacja ruchu robota

Równoległe z symulacją ruchu robota realizowana była animacja jego ruchu wykonana z zastosowaniem przybornika Virtual Reality pakietu Matlab/Simulink. Przybornik ten pozwala tworzyć realistycznie trójwymiarowe animacje. Umożliwia zadawanie ruchu układu podczas symulacji. Dzięki temu można w bardzo szybki i wygodny sposób zrozumieć działanie projektowanego układu. W trakcie animacji, która odbywa się w osobnym oknie można manipulować animowaną sceną, w tym przełączać się pomiędzy zdefiniowanymi widokami z różnych kamer. Przy pomocy przybornika Virtual Reality animowane są zarówno proste modele fizyczne, jak i złożone, które mogą być zaprojektowane w programach CAD.

Do animacji niezbędnymi danymi były: współrzędne punktu A podwozia w układzie nieruchomym, pochylenie podwozia  $\beta$  oraz kąty przegubowe  $\theta_1$  i  $\theta_2$ . Rys. 11 ilustruje trzy przykładowe widoki robota w trakcie animacji. Podczas animacji ilustrowany był także ruch środka masy robota (żółty punkt) i punktu zerowego momentu (czerwony punkt).

Filmy prezentujące te animacje zamieszczone są pod następującymi adresami:

- <http://www.youtube.com/watch?v=P9Oz-pMmbGM>,
- [http://www.youtube.com/watch?v=ZH9xV3OE\\_M4](http://www.youtube.com/watch?v=ZH9xV3OE_M4),
- <http://www.youtube.com/watch?v=7BjzGk-prqc>,  
<http://www.youtube.com/watch?v=RSkC8pcoRsU> (spowolniona wersja).



Rys. 11. Animacja ruchu robota z zastosowaniem przybornika Virtual Reality pakietu Matlab/Simulink: widok z lewej (a), widok z kamery w podwoziu (b), widok z prawej (kamera przymocowana do podwozia) (c)

#### 4. PODSUMOWANIE I KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ

W pracy omówiono problematykę modelowania, programowania i symulacji ruchu małego robota mobilnego. W ramach niej opracowano model dynamiczny robota uwzględniający sekwencję wspinania się po schodach. W opisie modelu dynamicznego robota wyróżniono sześć charakterystycznych konfiguracji. Dwie wybrane z nich opisano w niniejszej pracy. Bazując na rozważaniach teoretycznych przygotowano oprogramowanie symulacyjne z zastosowaniem pakietu Matlab/Simulink. Oprogramowanie to pozwoliło wyznaczyć, jak w trakcie wspinania się robota po schodach zmieniają się m.in. kąty i prędkości kątowe w przegubach robota, położenie środka masy robota, reakcje podłoża i momenty napędowe. Dodatkowo zrealizowano animację ruchu robota przy użyciu przybornika Virtual Reality. Opisane badania zrealizowano w celu właściwego doboru napędów robota, zaprogramowania odpowiedniej sekwencji ruchu umożliwiającej jego wspinanie się po schodach oraz wprowadzenia ewentualnych modyfikacji konstrukcyjnych.

W niektórych konfiguracjach robota (gdzie podwozie i korpus tworzą z podłożem zamknięty łańcuch kinematyczny), przyjmując założenia upraszczające, wyznaczono jedno z możliwych rozwiązań na siły reakcji podłoża i momenty napędowe – rzeczywiste rozwiązanie może w niektórych przypadkach znacząco odbiegać od wyznaczonego w prezentowanej symulacji.

Z uzyskanego rozwiązania wynika, że w trakcie jednoczesnego podnoszenia korpusu i wspornika, tj. w Konfiguracji 6 środek masy robota (rys. 10d) jest blisko osi obrotu tylnych kół. Jest to, z tego względu, krytyczna konfiguracja robota. Przy niewielkim pochyleniu stopnia może to spowodować przypadnięcie robota do tyłu. Z kolei Konfiguracja 2 jest niebezpieczna ze względu na wysoko podniesione nad podłożem podwozie. W tej konfiguracji środek masy robota jest położony najwyżej, co przy stosunkowo wąskim korpusie może, przy niewielkim przechyleniu podłoża/stopnia, spowodować boczne przypadnięcie robota.

Ze zrealizowanych badań wynika, że ruch robota musi być realizowany w subtelny sposób – niewielka zmiana parametrów robota, parametrów jego ruchu lub warunków otoczenia może spowodować przypadnięcie lub nieoczekiwany ruch robota.

W trakcie jazdy robota z maksymalną prędkością występują stosunkowo duże wymagane minimalne wartości współczynników tarcia pomiędzy kołami, a podłożem. Wartości tych współczynników byłyby jeszcze większe, gdyby robot miał dwa, a nie cztery napędzane koła jezdne lub gdyby któreś z kół straciło kontakt z podłożem np. wskutek występujących nierówności.

Na podstawie wyznaczonych momentów napędowych i prędkości kątowych związanych z obrotem członów 1 (wspornika) i 2 (korpusu) robota można dokonać doboru odpowiednich napędów. Ponieważ dla obu przegubów zarówno wartości momentów, jak i prędkości kątowych są tego samego rzędu, dlatego w obu przegubach można zastosować te same napędy. Przyjmując jako kryterium wyboru maksymalny moment napędowy wynoszący co najmniej 5 Nm oraz maksymalną prędkość kątową wynoszącą co najmniej 190°/s można w robocie zastosować np. serwonapędy Robotis RX-64 [6]. Napędy te przy napięciu zasilającym 18 V pozwalają osiągnąć maksymalny moment napędowy 6,27 Nm i maksymalną prędkość kątową równą 370°/s. Pracują one w zakresie kątowym 300°, mają jednak także opcję nieograniczonego obrotu.

Maksymalna wysokość schodów dla omówionej geometrii robota wynosi ok. 200 mm. Można ją zwiększyć o tyle, o ile zmniejszy się wymiar  $h$  (rys. 1). Z tego względu korzystne jest, aby wymiar  $h$  był równy zero (podwozie symetryczne w pionie). Zaletą symetrycznego podwozia byłaby także możliwość zawrócenia robota (np. w celu zejścia po schodach) bez konieczności obrotu wokół osi pionowej. Polegałoby to na podniesieniu podwozia do góry i postawieniu go dołem do góry i tyłem do przodu, a następnie kontynuacji ruchu z odwróconym podwoziem.

Z animacji ruchu robota w trakcie podnoszenia podwozia nad stopniem i jego ruchu na stopniu wynika, że, z kamery znajdującej się w korpusie nie widać, co znajduje się bezpośrednio przed podwoziem. Z tego względu korzystne byłoby umieszczenie drugiej dodatkowej kamery w przedniej części podwozia.

Kierunki dalszych badań mogą dotyczyć: syntezy ruchu robota podczas zawracania i schodzenia ze schodów oraz w trakcie wychodzenia z przepadnięcia (bocznego lub do przodu/tyłu) a także podania warunków, przy których nie powinno nastąpić przepadanie robota.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Chun-Kyu Woo, Hyun Do Choi, Sukjune Yoon, Soo Hyun Kim, Yoon Keun Kwak: *Optimal Design of a New Wheeled Mobile Robot Based on a Kinetic Analysis of the Stair Climbing States*, Journal of Intelligent and Robotic Systems, Volume 49, Number 4 / August, 2007, 325-354.
- [2] Hyun Do Choi, Chun KyuWoo, Soohyun Kim, Yoon Keun Kwak, Sukjune Yoon: *Independent traction control for uneven terrain using stick-slip phenomenon: application to a stair climbing robot*, Autonomous Robots, Volume 23 , Issue 1 (July 2007), 3–18.
- [3] Paillat, J.-L., Lucidarme, P., and Hardouin, L.: *Variable geometry tracked vehicle (VGTV) prototype: Conception, capability and problems*. In Proceedings of the first conference on Humans Operating Unmanned Systems (HUMOUS'08), (2008), Brest, France.
- [4] Różycki Ł., Trojnacki M.: *Małogabarytowy robot mobilny do rozpoznania wewnątrz budynku*, Pomiary Automatyka Robotyka 2/2009, dodatek na CD.
- [5] Trojnacki M., Szykarczyk P., Andrzejuk A.: *Tendencje rozwoju mobilnych robotów lądowych (1). Przegląd robotów mobilnych do zastosowań specjalnych*, Pomiary Automatyka Robotyka 6/2008, 11-14.
- [6] Portal internetowy firmy Robotis: <http://www.robotis.com>