

Badania symulacyjne i doświadczalne ruchu wzdłużnego robota czterokołowego na piasku

Simulation and experimental investigations of longitudinal motion of the four-wheeled mobile robot on sand

MACIEJ TROJNACKI
PRZEMYSŁAW DĄBEK*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.10.449
Artykuł z Forum ProCAx 2016

Praca dotyczy badań ruchu wzdłużnego mobilnego robota czterokołowego na piasku w zależności od zadanej prędkości. Omówiono konstrukcję robota oraz przyjętą metodykę modelowania. Zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych i doświadczalnych ruchu robota.

SŁOWA KLUCZOWE: mobilny robot kołowy, modelowanie, ruch wzdłużny, poślizg kół jezdnych

Paper concerns the study of longitudinal motion of a four-wheeled mobile robot on sand for various desired velocities. Design of the robot and assumed modeling methodology were described. Results of simulation and experimental research of robot motion were presented.

KEYWORDS: wheeled mobile robot, soft ground, modeling, longitudinal motion, wheel slip

Mobilne roboty kołowe to bezzałogowe pojazdy, których ruch jest wynikiem przede wszystkim interakcji kół jezdnych z podłożem. W opisie ruchu tego typu układów niezbędne jest zatem przyjęcie odpowiedniego modelu współpracy kół jezdnych z podłożem [2, 3]. W przypadku ruchu po podłożu odkształcalnym oprócz zjawiska poślizgu kół jezdnych należy także wziąć pod uwagę odkształcenie podłoża. Badaniem ruchu pojazdów na podłożu odkształcalnym zajmuje się terramechanika, której twórcą był prof. M.J. Bekker [1]. Ponieważ większość prac koncentruje się na badaniach pojazdów samochodowych (np. [6]), niewiele zaś dotyczy lekkich robotów mobilnych, dlatego jako cel szczegółowy niniejszej pracy obrano badania wpływu prędkości robota na poślizg kół jezdnych w ustalonym ruchu wzdłużnym na piasku.

Robot i jego model

Obiektem badań jest robot mobilny z niekierowanymi kołami PIAP GRANITE. Jego strukturę kinematyczną pokazano na rys. 1a. W modelu robota wyróżniono następujące główne zespoły: 0 – platformę mobilną oraz 1–4 – koła jezdne. Koła przednie mogą być sprzężone z tylnymi za pomocą pasków zębatych (5 i 6), które na potrzeby bieżących badań zostały usunięte – zastosowano niezależny napęd na wszystkie cztery koła jezdne.

Podstawowe parametry robota są następujące:

- wymiary: $L = 0,425$ m, $W = 0,59$ m (zgodnie z rys. 1a: $A_1A_3 = A_2A_4 = L$, $A_1A_2 = A_3A_4 = W$), $r_i = r = 0,097$ m, $b_i = 0,064$ m;
- masy członów: $m_0 = 36,54$ kg, $m_i = 1,64$ kg,

gdzie: r_i , b_i , m_i – odpowiednio promień, szerokość części jezdnej i masa i -tego koła jezdnej ($i = 1, \dots, 4$).

Zadaniem parametrem ruchu robota jest prędkość charakterystycznego punktu R , tj. ${}^0v_{Rd} = {}^0v_{Rxd}$. Robot wykonuje ruch wzdłużny, więc prędkości środków geometrycznych kół jezdnych, tj. ${}^0v_{Ai} = {}^0v_{Aix}$, powinny być równe prędkości ${}^0v_{Rd}$. Zadane prędkości kątowne obrotu kół jezdnych dla ruchu robota bez poślizgu wyznaczono z zależności:

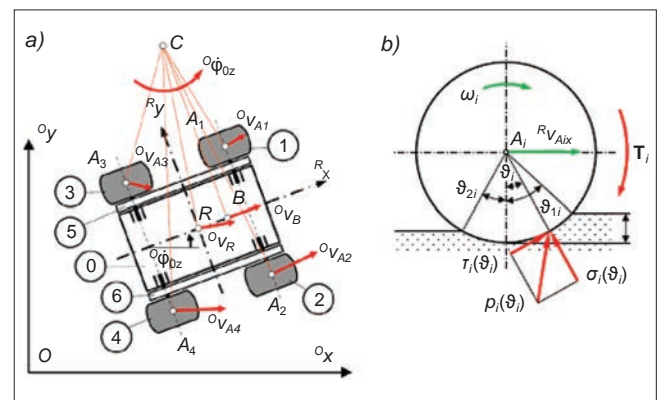
$$\omega_{id} = \dot{\theta}_{id} = {}^0v_{Rd} / r$$

Podczas ruchu robota może wystąpić poślizg kół jezdnych. Miarami tego poślizgu są współczynnik chwilowego poślizgu wzdłużnego λ_i dla kół jezdnych oraz współczynnik poślizgu wzdłużnego robota λ_R :

$$\lambda_i = \begin{cases} 0 & \text{dla } v_{oi} = 0 \\ (v_{oi} - {}^Rv_{Aix}) / v_{oi} & \text{dla innych } v_{oi} \end{cases}$$

$$\lambda_R = (s_{Rxd} - s_{Rx}) / s_{Rxd}$$

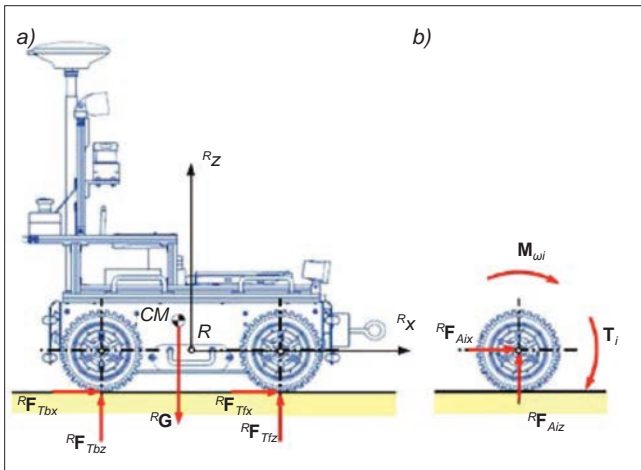
gdzie: $v_{oi} = \omega_i r$ – prędkość obwodowa koła; s_{Rx} – długość drogi, jaką pokonał robot w kierunku wzdłużnym; s_{Rxd} – długość zadanej drogi (toczenie się kół jezdnych bez poślizgu).



Rys. 1. Modelowanie robota: a) struktura kinematyczna, b) obciążenie koła jezdnego poruszającego się na podłożu odkształcalnym

Dla robota został wyprowadzony model dynamiki układu wielocłonowego. Założono, że na robota działają siły reakcji podłoża ${}^R\mathbf{F}_{Ti} = [{}^R F_{Tix}, {}^R F_{Tiy}, {}^R F_{Tiz}]^T$ ($i = 1, \dots, 4$) i siła ciężkości ${}^R\mathbf{G} = m_R {}^R\mathbf{g}$ (rys. 2a), gdzie m_R jest masą całkowitą robota, a ${}^R\mathbf{g} = [{}^R g_x, {}^R g_y, {}^R g_z]^T$ – wektorem przyspieszenia grawitacyjnego. Dla poszczególnych par kół wprowadzono następujące indeksy: f – koła przednie ($f = 1, 2$),

* Dr hab. inż. Maciej Trojnecki (mtrjnecki@piap.pl), mgr inż. Przemysław Dąbek (pdabek@piap.pl) – Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP



Rys. 2. Siły i momenty działające w płaszczyźnie R_{xx} : a) na robota, b) na koła jezdne po redukcji do środka geometrycznego

b – koła tylne ($b = 3, 4$). Oprócz siły ciężkości i sił współpracy z podłożem na każde koło jezdne działają momenty napędowe $\mathbf{T}_i = [0, T_i, 0]^T$ i oporów ruchu $\mathbf{M}_{\omega i} = [0, M_{\omega i}, 0]^T$ (rys. 2b). W wyniku redukcji sił ${}^R\mathbf{F}_{T_i}$ do osi obrotu kół jezdnych otrzymuje się siły: ${}^R\mathbf{F}_{A_i} = {}^R\mathbf{F}_{T_i} = [{}^R F_{A_{ix}}, {}^R F_{A_{iy}}, {}^R F_{A_{iz}}]^T$.

Opracowany model umożliwia rozwiązanie zadania prostego dynamiki dla robota. W kolejnych krokach czasowych obliczeń wyznaczane są:

- współczynniki poślizgu λ_i oraz λ_R ;
- maksymalny zgniot z_{0i} oraz kąty ϑ_{1i} i ϑ_{2i} charakteryzujące opasanie koła jezdnego przez glebę (rys. 1b);
- deformacja styczna $j_i(\vartheta_{1i})$ według [6] oraz zgniot $z_i(\vartheta_{1i})$;
- opór zgniotu $p_i(\vartheta_{1i})$ według Bekkera [1], naprężenia normalne $\sigma_i(\vartheta_{1i}) \approx p_i(\vartheta_{1i})$, maksymalne naprężenia styyczne $\tau_{imax}(\vartheta_{1i})$ (dla zmodyfikowanego równania Coulomba [4], tj. uwzględniającego spójność gleby c , kąt tarcia wewnętrznego ϕ i współczynnik tarcia statycznego μ_s dla pary opona–piasek) oraz naprężenia styyczne według hipotezy Janosi-Hanamoto [7];
- siły i momenty składowe: siła napędzająca F_i , siła oporu ruchu R_{ti} , statyczne obciążenie normalne W_i , siła wynikająca z tłumienności układu opona–grunt F_{di} , moment oporu ruchu $M_{\omega i}$ dla znanego rozkładu naprężeń na

obwodzie koła jezdnego zgodnie z [6] oraz siły wypadkowe, tj. siła wzdłużna ${}^R F_{T_{ix}} = F_i + R_{ti}$ oraz siła normalna ${}^R F_{T_{iz}} = W_i + F_{di}$;

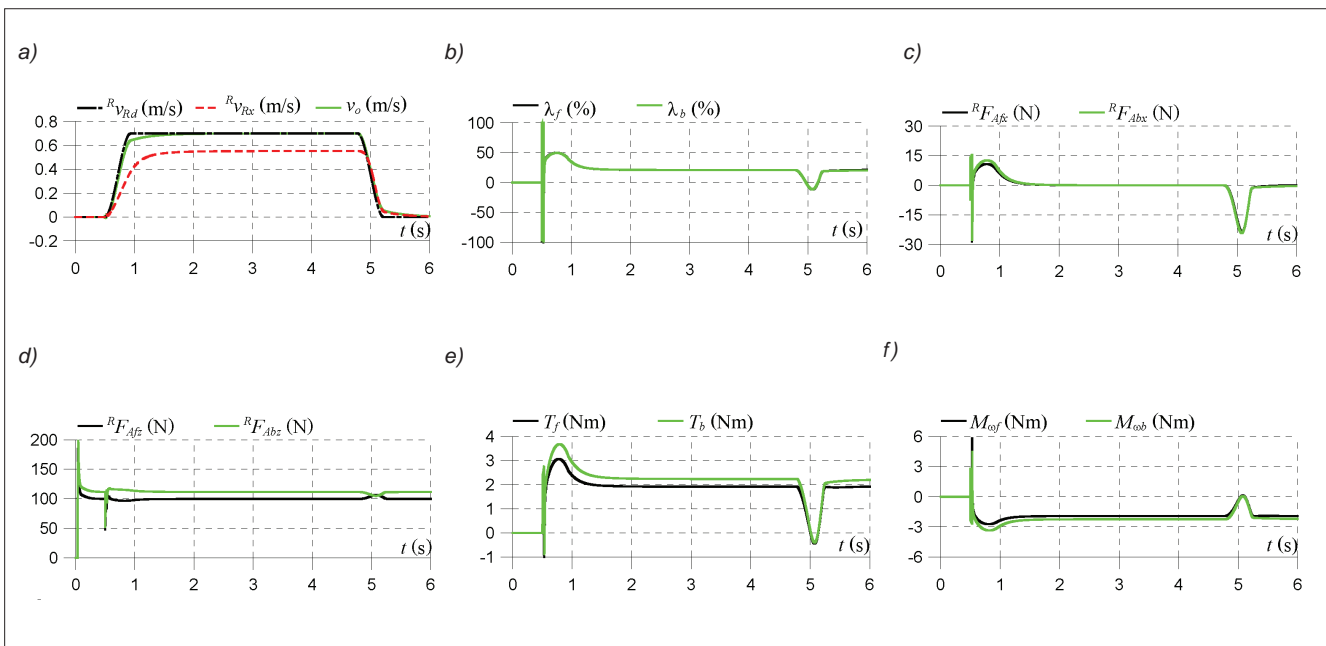
- przyspieszenia liniowe i kątowe, tj. ${}^R a_{CMx}$, ${}^R a_{CMy}$, $E = \ddot{\Theta}$ i $\varepsilon_i = \ddot{\theta}_i$ dla układu wielocłonowego robota.

Dla opisanego modelu przyjęto parametry gruntu dla suchego piasku według [5].

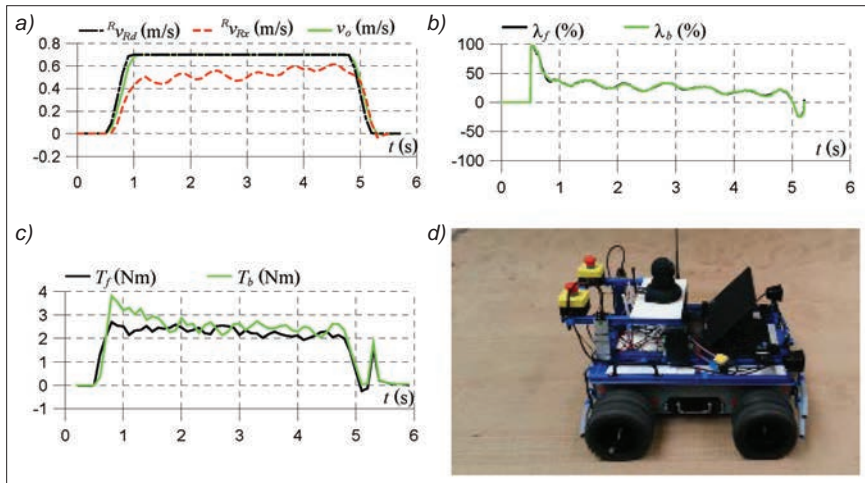
Badania symulacyjne i doświadczalne

Badania symulacyjne zostały zrealizowane w środowisku Matlab/Simulink. Analizowano ruch wzdłużny robota dla zadanej prędkości maksymalnej v_{Ru} z zakresu od 0,2 do 1 m/s. Dalej zaprezentowano wybrane wyniki badań symulacyjnych ruchu robota na piasku z prędkością 0,7 m/s. Można zaobserwować, że rzeczywista prędkość wzdłużna ${}^R v_{Rx}$ jest wyraźnie mniejsza od wartości zadanej ${}^R v_{Ru}$ i wynosi ok. 0,55 m/s (rys. 3a). Zarówno współczynniki chwilowego poślizgu wzdłużnego λ_i (rys. 3b), jak i współczynnik uśrednionego poślizgu wzdłużnego robota λ_R osiągają wartości ok. 21%. Widać także zróżnicowanie składowych normalnych sił reakcji podłoża ${}^R F_{A_{iz}}$ dla przednich i tylnych kół (rys. 3d) i wynikające z niego analogiczne zróżnicowanie składowych wzdłużnych (rys. 3c), zauważalne zwłaszcza w trakcie rozpędzania i hamowania, a także różnice w wartościach momentów napędowych T_i (rys. 3e) i oporów ruchu $M_{\omega i}$ (rys. 3f).

Przeprowadzono analogiczne badania doświadczalne ruchu wzdłużnego robota na piasku. Pokazano wyniki badań doświadczalnych dla prędkości 0,7 m/s. W przypadku przebiegów czasowych prędkości (rys. 4a) uzyskano dużą zgodność z wynikami badań symulacyjnych (rys. 3a), przy czym podczas ruchu robota zaobserwowano oscylacje rzeczywistej prędkości robota ${}^R v_{Rx}$. Takie oscylacje nie wystąpiły na przebiegach prędkości obwodowej kół v_{oi} , zatem można wykluczyć, że było to spowodowane działaniem zespołów napędowych lub regulatora. Współczynniki chwilowego poślizgu wzdłużnego λ_i kół (rys. 4b) oraz współczynnik uśrednionego poślizgu wzdłużnego robota λ_R osiągnęły ok. 23%, tj. wartości zbliżone do wyników symulacyjnych (rys. 3b).



Rys. 3. Przebiegi czasowe uzyskane w wyniku symulacji ruchu robota z prędkością $v_{Ru} = 0,7$ m/s



Rys. 4. Badania doświadczalne ruchu robota: a)–c) uzyskane przebiegi czasowe dla prędkości $v_{Ru} = 0,7$ m/s, d) robot podczas badań

Podsumowanie

Zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych i doświadczalnych ruchu robota, przy czym koncentrowano się na analizie wpływu zadanej prędkości na poślizgi kół jezdnych. Wnioski:

- uzyskano stosunkowo dużą zgodność wyników dla zadanej prędkości maksymalnej w przedziale 0,2–0,7 m/s,
- zaobserwowano, że wraz ze wzrostem zadanej prędkości ruchu zwiększa się zapadanie kół jezdnych w piasku,
- w przypadku ruchu wzdłużnego robota na piasku poślizgi kół jezdnych rosną ze wzrostem zadanej prędkości ruchu.

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. Bekker M.G. “Off-the-road locomotion”. *Research and development in terramechanics*. The University of Michigan Press, 1960.
2. Dąbek P. „Stanowisko do identyfikacji parametrów ogumienia robota mobilnego Scout”. *Pomiary, Automatyka, Robotyka* 14.2 (2010): s. 380–385.
3. Dąbek P., Trojnecki M. “Requirements for Tire Models of the Lightweight Wheeled Mobile Robots”. *Mechatronics: Ideas, challenges, solutions and applications, Series: Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer International Publishing. Vol. 414 (2016): pp. 33–51.
4. Harnish C. et al. “A new tyre–soil interaction model for vehicle simulation on deformable ground”. *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*. 43: sup1 (2005): pp. 384–394.
5. Iagnemma K., Dubowsky S. “Mobile robots in rough terrain. Estimation, motion planning, and control with application to planetary rovers”. *Springer Tracts in Advanced Robotics*. Vol. 12 (2004).
6. Taheri S. et al. “A technical survey on terramechanics models for tire-terrain interaction used in modeling and simulation of wheeled vehicles”. *Journal of Terramechanics*. Vol. 57 (2015): pp. 1–22.
7. Wong J.Y. “*Theory of Ground Vehicles*”. Wiley-Interscience, 2001. ■