

mgr inż. Łukasz Różycki, dr inż. Maciej Trojnacki
Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów

MAŁOGABARYTOWY ROBOT MOBILNY DO ROZPOZNANIA WEWNĄTRZ BUDYNKU

Praca dotyczy małego robota mobilnego przeznaczonego do rozpoznania wewnątrz budynku. Zaprezentowano w niej przegląd istniejących rozwiązań robotów mobilnych o specyficznych układach jezdnych oraz rozwiązań hybrydowych. Opisano koncepcję robota oraz przebieg prac projektowych. Omówiono także najważniejsze problemy techniczne, konstrukcyjne oraz technologiczne, które wystąpiły podczas opracowywania modelu konstrukcji robota.

SMALL-DIMENSION MOBILE ROBOT FOR INDOOR RECONNAISSANCE

This work is concerned about small mobile robot for indoor reconnaissance. A review of existing mobile robots with specific driving systems and with hybrid solutions is presented. Robot idea and designing process are described. Most important technical, designing and technological problems which appeared during drawing up robot construction model are discussed.

1. WPROWADZENIE

Gąsienicowe lub kołowe roboty mobilne o klasycznym układzie podwozia i niewielkich wymiarach mają ograniczone możliwości trakcyjne w środowisku, w którym normalnie i bezproblemowo porusza się człowiek. Zwykły krawężnik może być trudną przeszkodą do pokonania, a schody znacznie wyższe od krawężnika mogą okazać się nie do przebycia. Budowa niewielkich pojazdów rozpoznawczych działających dyskretnie w środowisku naturalnym człowieka wymaga przemyślanych rozwiązań konstrukcyjnych znacznie podnoszących możliwości trakcyjne takiego urządzenia.

W pracy zaprezentowany jest przebieg prac nad demonstratorem niewielkiego robota mobilnego przeznaczonego do rozpoznania w obszarze zurbanizowanym. Na początku przedstawiony jest przegląd literatury i istniejących rozwiązań robotów mobilnych o specyficznych układach jezdnych oraz rozwiązań hybrydowych. Następnie opisana jest koncepcja urządzenia i przebieg prac projektowych. Omówiono także najważniejsze problemy techniczne, konstrukcyjne oraz technologiczne, które wystąpiły podczas opracowywania modelu konstrukcji robota.

Prezentowane rozwiązanie konstrukcyjne jest rozwiązaniem hybrydowym, gdyż łączy zalety rozwiązań kołowych i kroczących. Znaczny wzrost możliwości trakcyjnych robota osiągnięto poprzez ruchome połączenie między podwoziem, a jego korpusem. Dzięki temu robot może zarówno poruszać się po płaskiej powierzchni na kołach, jak i wspinać po schodach dzięki możliwości przenoszenia podwozia nad korpusem.

2. ROBOTY MOBILNE HYBRYDOWE I O SPECYFICZNYCH UKŁADACH JEZDNYCH

W literaturze dotyczącej robotów mobilnych można znaleźć nieliczne przypadki robotów hybrydowych, tj. łączących zalety robotów kołowych i kroczących. Można natomiast znacznie częściej spotkać roboty kołowe o specyficznych układach jezdnych. Takimi przykładami są roboty opisane w pracach [1, 4, 5, 6, 7, 9]. Roboty te działają na analogicznej zasadzie, tj. ich układ zawieszenia dostosowuje się do nierówności podłoża. Przykłady tego typu robotów są zilustrowane na rys. 1a-c. Prekursorem tego typu robotów był radziecki pojazd bezzałogowy Łunochod przeznaczony do badań Księżyca, którego pierwsza misja została zrealizowana pod koniec 1970 r.



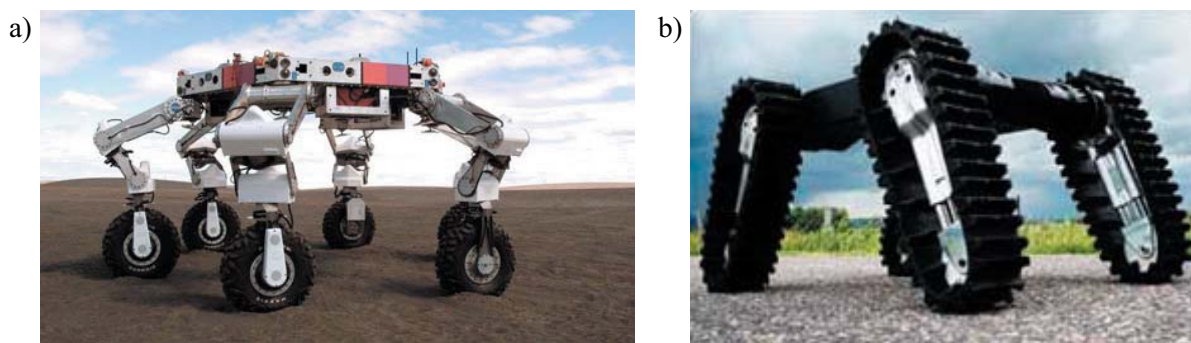
Rys. 1. Przykłady robotów o specyficznych układach jezdnych oraz robotów hybrydowych: robot opracowany przez KAIST [1] (a), robot zaprojektowany w Tohoku University [6] (b), robot IBIS produkcji PIAP (c), PackBot firmy iRobot (d), Micro VGTV (Laboratoire d'Ingenierie des Systèmes Automatisés Angers) (e), robot Roller Walker opracowany w Tokyo Institute of Technology i rozwiązanie techniczne jego stopy [2,3] (f)

Innym, specyficznym rozwiązaniem technicznym umożliwiającym poruszanie się robota w zróżnicowanym terenie jest zastosowanie gąsienic o zmiennej geometrii. Tego typu rozwiązania są opisane w pracach [8, 9, 10] i zilustrowane na rys. 1d-e.

Innowacyjnym rozwiązaniem technicznym jest robot Roller Walker [2, 3] (rys. 1f). Jest to robot jeżdżąco-kroczący, który jest wyposażony w rolki-stopy, które umożliwiają zarówno kroczenie jak i jazdę robota na podobnej zasadzie, jak robią to rolnicy. W rozwiązaniu tym rolki (koła) nie są napędzane, a ich toczenie następuje wskutek odpowiedniego ruchu nóg.

W ostatnim czasie opracowano także w NASA hybrydową konstrukcję robota przeznaczonego do eksploracji planet o nazwie Athlete [11] (rys. 2a). Konstrukcja robota składa się z sześciu nóg zakończonych kołami. Możliwa jest więc zarówno jazda robota na kołach, jak i jego kroczenie.

Do rozwiązań hybrydowych można także zaliczyć ciekawą konstrukcję robota Chaos firmy Autonomous Solutions [12] (rys. 2b). Jest to robot wyposażony w cztery gąsienice, które mogą stanowić nogi robota, umożliwiając jego kroczenie.



Rys. 2. Przykłady robotów hybrydowych: robot Athlete opracowany przez NASA (a) i robot Chaos firmy Autonomous Solutions (b)

Omawiane roboty mają różne przeznaczenie i obszar zastosowań. Spora część z nich to konstrukcje eksperymentalne przeznaczone do prowadzenia badań w laboratoriach naukowych. Inne z kolei, jak robot zaprojektowany w Tohoku University [6] (rys. 1b) i robot Athlete opracowany przez NASA (rys. 2a), są przeznaczone do poruszania się w nierównym terenie i pomyślane do eksploracji obcych planet. Prekursorem tego typu robotów był wspomniany wcześniej radziecki pojazd bezzałogowy Łunochod. Są też roboty przeznaczone głównie do poruszania się po schodach. Takim przykładem jest robot opracowany przez KAIST (Korea Advanced Institute of Science and Technology) [1] (rys. 1a). Coraz częściej roboty o podwyższonej mobilności znajdują praktyczne zastosowanie w wojsku. Przykładami takich robotów są m.in. opracowany w PIAP robot IBIS (rys. 1c), czy PackBot firmy iRobot (rys. 1d). Szerokie zastosowanie ma z kolei robot Micro VGTV (Variable Geometry Tracked Vehicle) (rys. 1e), który może poruszać się w środowisku, w którym występują zarówno nierówności terenu, jak i strukturyzowane przeszkody typu schody.

Pomimo różnych rozwiązań robotów mobilnych o specyficznych układach jezdnych i rozwiązań hybrydowych, wciąż nie istnieje optymalne rozwiązanie, które może być zastosowane w dowolnie ukształtowanym terenie. Dlatego celowe jest poszukiwanie nowych, specjalizowanych rozwiązań.

3. KONCEPCJA MAŁOGABARYTOWEGO ROBOTA MOBILNEGO

W niniejszej pracy zaprezentowana jest koncepcja modelu konstrukcji małogabarytowego robota przeznaczonego do rozpoznania wewnątrz budynku. Robot został pomyślany w taki sposób, aby mógł zarówno poruszać się na kołach, jak i wspinać po schodach. Z tego względu można

powiedzieć, że jest to konstrukcja hybrydowa, tj. łącząca cechy lokomocji kołowej i kroczącej. Ponadto robot został zaprojektowany w taki sposób, aby z jednej strony miał jak najmniejsze wymiary, (co ma szczególnie duże znaczenie np. podczas badania podwozia samochodu, w którym może znajdować się potencjalnie niebezpieczny ładunek), a z drugiej strony mógł wykonywać obserwację na jak najwyższej wysokości (np. badać przedmioty znajdujące się na stole).

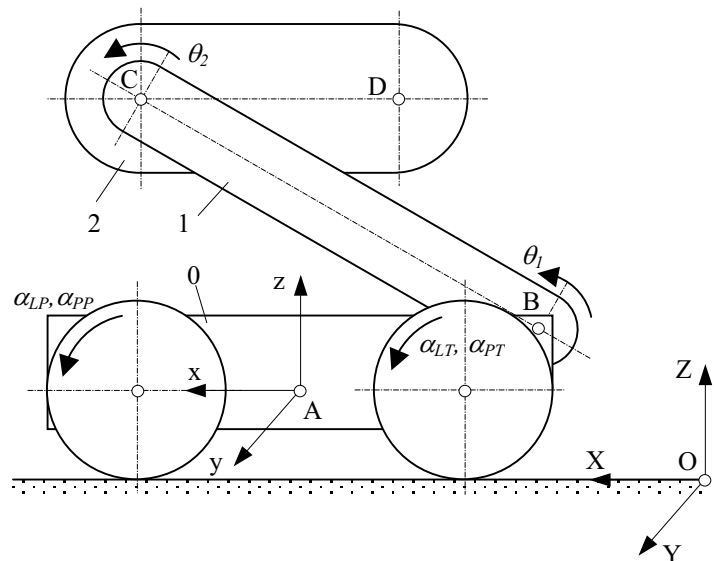
Zakłada się, że robot będzie pracował w trybie teleoperacji, natomiast wspinanie się robota po schodach będzie następowało automatycznie, pod kontrolą operatora.

Wspinanie się robota po schodach jest możliwe dzięki unikalnej strukturze kinematycznej (rys. 2).

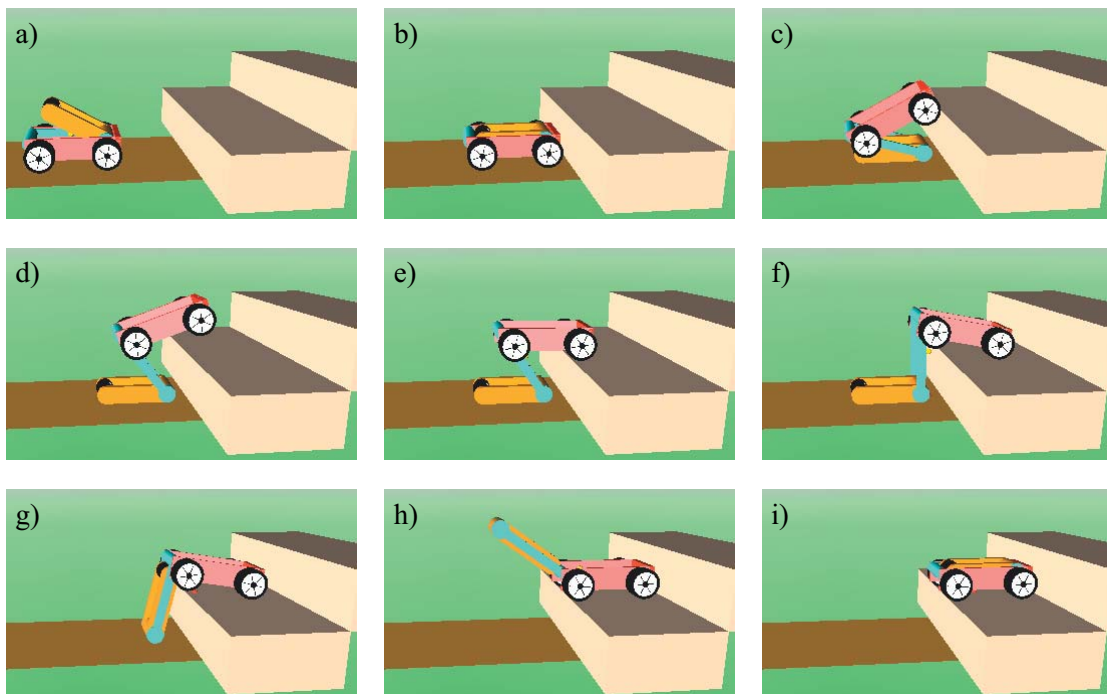
Robot składa się z podwozia 0, wspornika 1, korpusu 2 oraz czterech kół oznaczonych jako LP (lewe przednie), PP (prawe przednie), LT (lewe tylne), PT (prawe tylne). Zakłada się, że wszystkie cztery koła są niezależnie napędzane i sterowane.

Robot po złożeniu ma następujące wymiary: 320x270x100 mm (długość, szerokość, wysokość).

Wspornik 1 może w nieograniczony sposób obracać się w przegubie B względem podwozia 0 (kąt θ_1). Podobnie korpus 2 może dowolnie obracać się względem wspornika 1 (kąt θ_2). Robot może wspinąć się po schodach wykonując pokazaną na rys. 3 sekwencję ruchów.



Rys. 2. Struktura kinematyczna robota



Rys. 3. Sekwencja ruchu robota przy wspinaniu się po schodach

Wspinanie się robota następuje z uwzględnieniem położenia jego środka masy i punktu środkowego nacisku, tak, aby robot wspinał się w sposób kontrolowany i nie nastąpiło jego przepadnięcie do przodu lub tyłu. Rys. 3 stanowi ilustrację struktury kinematycznej robota w poszczególnych fazach ruchu z uwzględnieniem przyjętych istotnych wymiarów - nie jest na nim zobrazowany projekt rzeczywistej konstrukcji robota.

Typowo robot porusza się na czterech kołach, mając podniesiony korpus, w którym znajduje się obrotowa kamera umożliwiająca obserwację otoczenia pojazdu (rys. 3a). Zbliżenie do krawędzi schodów jest realizowane manualnie przez operatora lub robot zatrzymuje się automatycznie w zadanej odległości od krawędzi schodów (jest wyposażony w czujnik odległości umieszczony w przedniej części podwozia) (rys. 3b). Operator wciska odpowiedni przycisk rozpoczynający automatyczną sekwencję wspinania się robota po schodach. W pierwszej kolejności następuje opuszczenie korpusu i podnoszenie podwozia (rys. 3c). Podnoszenie podwozia jest kontynuowane aż do chwili znalezienia się jego przedniej części nad stopniem (rys. 3d). Maksymalna wysokość podniesienia przedniej części podwozia umożliwia pokonywanie stopni o maksymalnej wysokości ok. 20 cm. Z kolei odległość przednich i tylnych kół ogranicza minimalną długość stopnia do ok. 27 cm. W czasie opuszczania podwozia na stopień operator nie ma możliwości obserwacji z kamery znajdującej się w korpusie, co znajduje się bezpośrednio przed podwoziem (może za to obserwować proces opuszczania się podwozia), dlatego w przyszłości planuje się wyposażenie robota w dodatkową kamerę znajdującą się w przedniej części podwozia. Przednia część podwozia jest opuszczana aż do wykrycia zetknięcia ze stopniem (rys. 3e). Wykrycie zetknięcia ze stopniem jest realizowane za pomocą czujnika odległości umieszczonego w przedniej części podwozia i skierowanego w dół lub poprzez włączenie napędu przednich kół i pomiar zużycia prądu przez napędy (w momencie zetknięcia kół następuje szybki wzrost zużycia prądu). Później przednia część podwozia toczy się po stopniu i równocześnie następuje obrót wspornika aż do uzyskania pionowego jego położenia (rys. 3f). Następnie następuje obrót korpusu, aż do jego pokrycia się ze wspornikiem i rozpoczyna się obracanie wspornika ze złożonym korpusem (rys. 3g). Jest to kontynuowane aż do oderwania się korpusu od podłoża. Następnie podnoszony jest zarówno korpus, jak i wspornik. Jest to krytyczna konfiguracja robota, gdyż daleko wysunięty korpus wraz ze wspornikiem (rys. 3h) (szczególnie w pozycji poziomej) może spowodować przepadnięcie robota do tyłu. Wymaga to więc zastosowania odpowiednio dużej masy podwozia. Obracanie się korpusu wraz ze wspornikiem jest kontynuowane aż do uzyskania złożonej sylwetki robota (rys. 3i), tj. analogicznej jak na początku sekwencji wspinania się po schodach. Jeżeli przed robotem znajduje się kolejny schodek proces wspinania się jest kontynuowany aż do zakończenia schodów, napotkania przeszkody lub przerwania ruchu przez operatora.

4. PRZEBIEG PRAC PROJEKTOWYCH ROBOTA

W trakcie prac projektowych wykonano na początku wstępne obliczenia statyczne wymaganych momentów napędowych dla poszczególnych konfiguracji robota.

Następnie opracowano szczegółowy model obliczeniowy robota związany z jego wspinaniem się po schodach. Model ten opracowano z uwzględnieniem elementów dynamiki robota. Bazując na opracowanym modelu obliczeniowym przygotowano oprogramowanie symulacyjne umożliwiające zarówno symulację, jak i animację ruchu robota. Wykonano badania symulacyjne obejmujące syntezę ruchu robota dla charakterystycznych położań robota z uwzględnieniem położenia jego środka masy i punktu środkowego nacisku, a także obliczono siły reakcji podłoża, minimalne dopuszczalne wartości współczynników tarcia

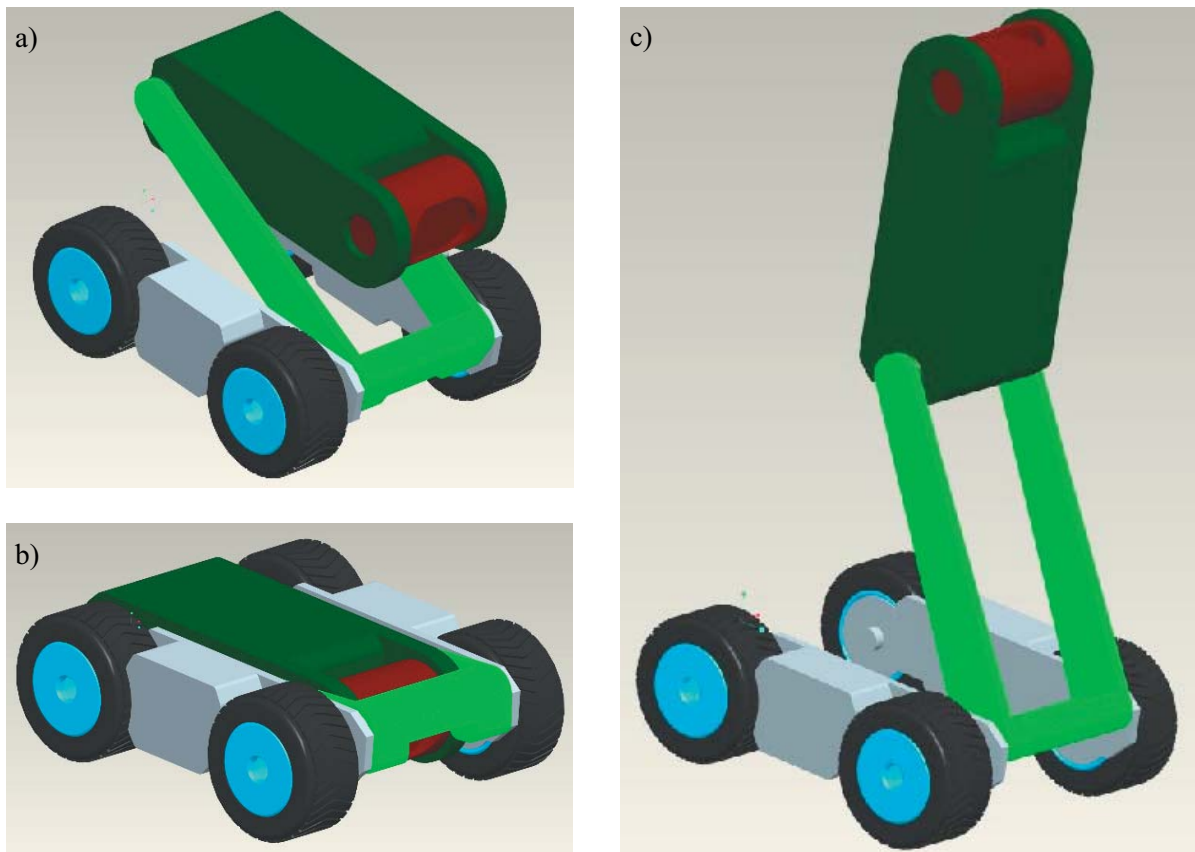
ślizgowego i momenty napędowe. Wyniki opisanych badań symulacyjnych zostaną zaprezentowane w osobnej publikacji.

Na tej podstawie wstępnych i szczegółowych obliczeń dobrano napędy robota. Konstrukcję robota zaprojektowano w programie ProEngineer. Ułatwi to opracowanie dokumentacji konstrukcyjnej robota oraz umożliwi znajomość dokładnych parametrów masowych robota. Na rys. 4 pokazano 3 różne konfiguracje robota, w szczególności konfigurację złożonego robota (rys. 4b) i konfigurację robota umożliwiającą obserwację wyżej położonych miejsc (rys. 4c).

Silniki do napędu kół są zamontowane bezpośrednio w piastach kół, natomiast napędy związane z obrotem wspornika, korpusu i kamery są umieszczone w tulei przegubu dolnego oraz w korpusie. System mikroprocesorowy, odbiornik radiowy oraz kamera wraz z nadajnikiem radiowym są umieszczone w korpusie robota, natomiast akumulator zamontowany jest w podwoziu.

W trakcie prac projektowych robota natrafiono na szereg problemów technicznych, konstrukcyjnych i technologicznych. Problemy konstrukcyjne były związane z małymi gabarytami robota oraz, w konsekwencji, z rozproszeniem układów elektroniki.

Przeznaczenie robota wymaga zastosowania dwóch przegubów obrotowych umożliwiających ich nieograniczony obrót oraz równocześnie przekazywanie zasilania i sterowań do poszczególnych napędów. Stwarza to nie tylko problemy konstrukcyjne, ale i technologiczne. Przeguby te muszą umożliwiać nieprzerwane przekazywanie zasilania o wymaganej mocy oraz sygnałów sterujących. Dodatkowo nie powinny wytwarzać dodatkowych zakłóceń.



Rys. 4. Projekt robota w programie ProEngineer

Zastosowane na robocie nadajniki i odbiorniki radiowe małej mocy oraz niewielkich rozmiarów anteny zabudowane w robocie stwarzają kolejne problemy, tym razem techniczne. Mogą wystąpić problemy w propagacji sygnału w przypadku złożonej konstrukcji robota (rys. 4b) i w innych szczególnych układach konfiguracyjnych wskutek przysłaniania anten przez elementy robota. Podobne problemy mogą także wystąpić w przypadku przesłaniania robota przez większe metalowe obiekty. Opisane problemy związane z propagacją fal elektromagnetycznych można praktycznie ocenić i wyeliminować dopiero na etapie badań eksperymentalnych.

Silniki napędowe, pozwalające zapewnić odpowiedni zapas mocy dla poszczególnych przegubów, wytwarzają podczas startu i wzmożonej pracy (w pobliżu maksymalnej mocy) prądy rzędu 10 A i więcej. Tego rzędu prądy mogą stanowić problem ze względu na wymagane niewielkie wymiary złącz obrotowych ukrytych wewnątrz poszczególnych przegubów. Mogą m.in. wystąpić problemy z bezpiecznym odprowadzeniem ciepła z takich złącz. Należy nadmienić, że w obecnej chwili nie istnieją cywilne i ogólnie dostępne złącza obrotowe o nieograniczonym kącie obrotu oraz o wymaganej obciążalności i średnicy zewnętrznej około 18 mm.

W celu pokonywania wysokich przeszkód (w stosunku do wymiarów złożonego robota) opracowano metodę polegającą na precyzyjnym, wzajemnym przemieszczaniu środków mas poszczególnych członów robota. Wymusza to nienaturalne rozłożenie mechanizmów i elektroniki wewnątrz każdego z członów. Takie podejście stwarza także problemy związane ze stabilnością poszczególnych elementów wewnątrz robota, zwiększa wymagania odnośnie precyzji wykonania poszczególnych elementów oraz wymaga wielokrokowej optymalizacji przestrzeni wewnętrznej.

Proponowana konstrukcja robota jest przewidziana do działań wewnątrz budynków. Wykorzystanie jej na zewnątrz może być utrudnione z powodu niewielkich gabarytów robota (utrudnione może być np. poruszanie się w wysokiej trawie), zwłaszcza w przypadku niekorzystnych warunków pogodowych (intensywne opady, głębokie kałuże itp.).

5. PODSUMOWANIE I KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ

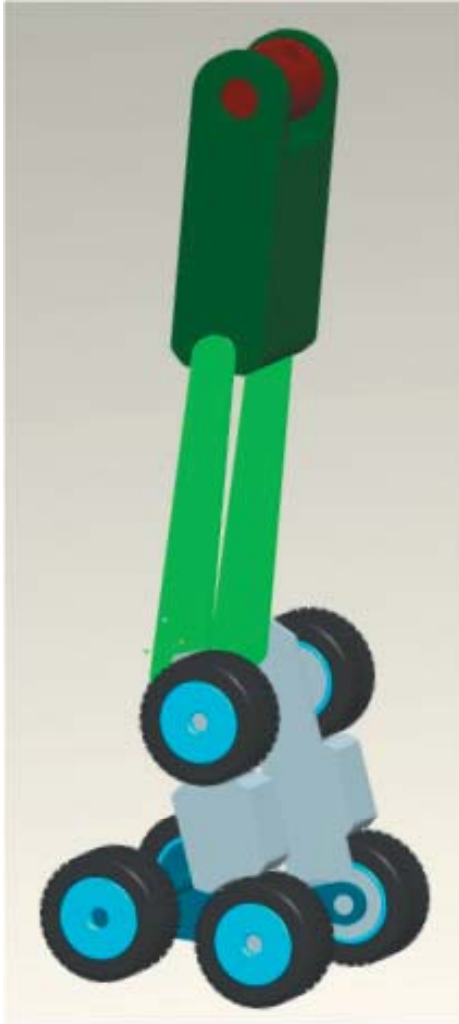
W pracy zaprezentowano przegląd istniejących rozwiązań robotów mobilnych hybrydowych i o specyficznych układach jezdnych. Opisano koncepcję robota oraz przebieg prac projektowych. Omówiono także najważniejsze problemy techniczne, konstrukcyjne oraz technologiczne, które wystąpiły podczas opracowywania modelu konstrukcji robota.

Opisany robot mobilny jest rozwiązaniem hybrydowym, łączącym cechy lokomocji kołowej i kroczącej. Łączy on dwie zazwyczaj sprzeczne cechy, tj. z jednej strony po złożeniu posiada małe wymiary, gwarantujące inspekcję w niewielkich przestrzeniach, a z drugiej strony umożliwia obserwację za pomocą kamery względnie wysoko położonych miejsc.

W ramach dotychczasowych prac projektowych wykonano szczegółowe obliczenia związane ze wspinaniem się robota po schodach, opracowano oprogramowanie symulacyjne robota oraz wykonano jego animację. Wyniki tych prac zostaną zaprezentowane w osobnej publikacji.

W ramach dalszych prac planuje się wykonanie rzeczywistego modelu konstrukcji robota, implementację oprogramowania na sterowniku robota oraz wykonanie niezbędnych badań eksperymentalnych.

Planuje się także rozważenie sześciokołowej wersji robota (rys. 5). Taki robot może zawierać zalety dotychczasowej konstrukcji, pozwalając dodatkowo na obserwację wyżej położonych miejsc (aż do wysokości ok. 80 cm), np. przedmiotów znajdujących się na stole.



Rys. 5. Koncepcja robota sześciokołowego

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] Gen Endo, Shigeo Hirose: *Study on Roller-Walker – Multi-mode Steering Control and Self-Contained Locomotion*, Journal of Robotics and Mechatronics, 2000, Vol.12, No.5 pp. 559-566.
- [3] Gen Endo, Shigeo Hirose: *Study on Roller-Walker. System Integration and Basic Experiments*, Journal of the Robotics Society of Japan, 2000, Vol.18, No.2, 270-277.
- [4] 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.
- [5] Karl Iagnemma, Steven Dubowsky: *Traction Control of Wheeled Robotic Vehicles in Rough Terrain with Application to Planetary Rovers*, The International Journal of Robotics Research, Vol. 23, No. 10–11, October–November 2004, 1029-1040.
- [6] Kazuya Yoshida, Hiroshi Hamano, Toshinobu Watanabe: *Slip-based Traction Control of a Planetary Rover*, Springer Tracts in Advanced Robotics, Volume 5/2003, 644-653.
- [7] Lamon Pierre, Krebs Ambroise, Lauria Michel, Siegwart Roland, Shooter Steven: *Wheel torque control for a rough terrain rover*, IEEE International Conference on Robotics and Automation No21, New Orleans LA, 2004, 4682-4687, ISBN 0-7803-8232-3.
- [8] 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.
- [9] Trojnecki M., Szykarczyk P., Andrzejuk A.: *Tendencje rozwoju mobilnych robotów lądowych (1). Przegląd robotów mobilnych do zastosowań specjalnych*, Pomiary Automatyka Robotyka 6/2008, 11-14.
- [10] Yamauchi Brian: *PackBot: A versatile platform for military robotics*, Unmanned ground vehicle technology. Conference No6, Orlando FL , 2004, vol. 5422, 228-237, ISBN 0-8194-5345-5.
- [11] Slideshow: Next Stop, The Moon
<http://www.spectrum.ieee.org/print/6408>.
- [12] Chaos robot is ready to tangle
http://dvice.com/archives/2007/02/chaos_robot_is_ready_to_tangle.php.