

Góra Marta, dr inż.  
email: mgora@m6.mech.pk.edu.pl  
Pietruszka Krzysztof, inż.  
email: krzysztof.pietruszka88@gmail.com  
Trzmiel Adam, mgr inż.  
email: trzmiel.adam@gmail.com  
Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny

## MODEL OŚMIONOŻNEGO ROBOTA SAPERSKIEGO W ŚRODOWISKU CATIA v5

**Streszczenie:** Wykorzystując wzorce biologiczne opracowano model robota saperskiego jako robota kroczącego, ze względu na większe możliwości przemieszczeń w trudnym i zmiennym terenie. Przyjęto strukturę odnóży robota o ruchliwości 3. Opracowano analizę kinematyczną i analizę chodu robota kroczącego. Przeprowadzono symulację i wygenerowano charakterystyki ruchu kończyny robota w środowisku CATIA. Model robota saperskiego zaprojektowano wyróżniając oprzyrządowanie do wykrywania i usuwania min oraz pracy w trybie transportowym i poszukiwawczym.

## MODEL OF OCTOPOD SAPPER ROBOT IN CATIA v5 ENVIROMENT

**Abstract:** Model of octopod robot for sapper applications is formulated as stepping machine, that has great potential of motion in hard terrain. The robot legs are described as 3 degrees of mobility serial structure. Kinematic analysis considering robot pace modes is carried out. The model is formulated in Catia environment. Project of the robot design is considered for different sapper tools and modes of operation including searching, removing and transportation of the mines.

### 1. Wprowadzenie

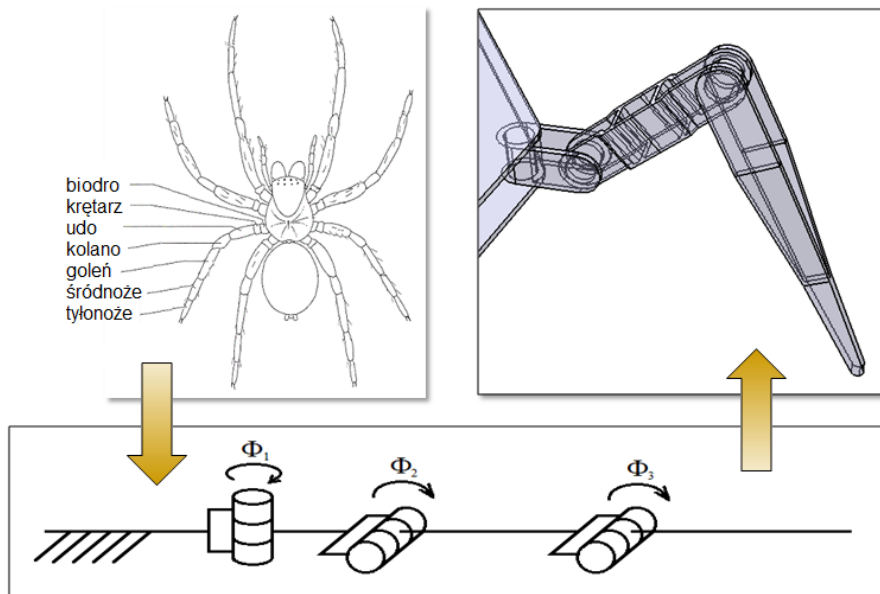
Istotnym zagrożeniem zdrowia i życia człowieka jest występowanie pól minowych i niewybuchów jako pozostałości po konfliktach zbrojnych. W wielu państwach ludność cywilna jest zmuszona do życia na terenach, gdzie wciąż tkwią w ziemi setki tysięcy min. Według statystyk na całym świecie spoczywa w ziemi ok. 110 milionów min, które co roku są przyczyną ponad 20 tys. ofiar, z czego prawie połowa to przypadki śmiertelne. Oprócz tego miny wykazują bardzo długi okres zdolności bojowej – w dobrych warunkach mogą być sprawne nawet po 50 latach od zakopania w ziemi. W celu rozwiązania tego problemu organizacje humanitarne współpracują z inżynierami i specjalistami wojskowymi, opracowując coraz lepsze konstrukcje, pozwalające zneutralizować to zagrożenie.

Proces identyfikacji i unieszkodliwienia ładunków wybuchowych polega na identyfikacji podejrzanego obiektu (np. samochodu), lokalizacji i identyfikacji materiału wybuchowego, a następnie rozbrojeniu ładunku wybuchowego lub przeniesieniu go do kontenera detonacyjnego, gdzie zostaje zdetonowany. Kiedyś wszystkie te czynności musiał wykonać człowiek, obecnie we wszystkich tych zadaniach jest w stanie wyręczyć go robot [5].

Większość robotów saperskich wykorzystuje napęd kołowy lub gąsienicowy. Spowodowane jest to tym, że roboty takie działają zazwyczaj na terenach miejskich, gdzie ruch wykonywany jest po płaskim terenie. Jednak na całym świecie pozostały setki tysięcy min przeciwpiechotnych na terenach trudnodostępnych, dlatego inżynierowie zaczynają konstruować saperskie roboty kroczące.

## 2. Analiza strukturalna i kinematyczna kończyny robota

Projektując robota ośmionóżnego wzorowano się na strukturze pajęczaków (rys. 1). W odnóży pajaka ptasznika [3] można wyróżnić segmenty takie jak: biodro (łac. *coxa*), udo (łac. *femur*) kolano (łac. *Patella*), goleń (łac. *tibia*), śródnoże (łac. *metatarsus*), tyłonoże (łac. *tarsus*). Pomiedzy biodrem a udem znajduje się krętarz (łac. *trochanter*) element połączony stawami, za pomocą którego wprowadzona zostaje ruchliwość biodra względem dolnej części nogi. Tyłonoże (łac. *tarsus*) można porównać do stopy robota. W strukturze mechanizmu robota kroczącego można wyróżnić korpus jako platformę ruchomą do której połączone są odnóży. Na rys. 1 przedstawia budowę kończyny pajaka, schemat strukturalny kończyny robota składającej się z 3 ogniw połączonych 3 parami kinematycznymi obrotowymi i model kończyny opracowany w środowisku CATIA.



Rys. 1. Wzorce biologiczne w procesie modelowania kończyny robota

Struktura robota kroczącego zależy przede wszystkim od zadań, jakie dany robot ma spełniać. Z racji szerokiego wachlarza zastosowań niezbędne jest uwzględnienie dodatkowych parametrów, jak masa robota, zasięg działania, środowisko pracy, wymagany udźwig lub niezawodność. Projektując robota kroczącego na początku określamy liczbę kończyn. Mniejsza liczba kończyn sprawia, że cała konstrukcja jest lżejsza, ale jednocześnie bardziej ograniczona w możliwościach ruchowych. Kolejny wybór stanowi liczba stopni swobody odnóży. W celu osiągnięcia dowolnego punktu w przestrzeni roboczej odnóże powinno mieć, co najmniej trzy stopnie swobody [9].

Ruchliwość mechanizmu można wyznaczyć na podstawie wzoru Kutzbacha – Grublera [6], czyli zależności:

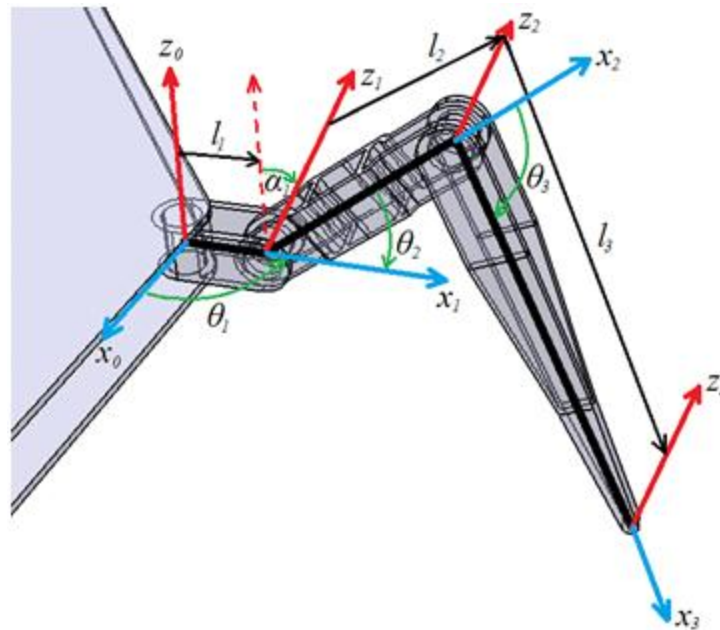
$$w = 6n - \sum_{i=0}^5 ip_i \quad (1)$$

gdzie:  $w$  – ruchliwość mechanizmu,  $n$  – liczba członów ruchomych,  $p_i$  – liczba par kinematycznych  $i$  – tej klasy.

Przyjmując korpus robota jako nieruchomy, ruchliwość kończyny (rys. 1) na podstawie (1) wynosi 3 (gdzie:  $n = 3$ ,  $p_5 = 3$ ). W przypadku robota ośmionóżnego ruchliwość wynosi 24 ( $n = 24$ ,  $p_5 = 24$ ).

W celu jednoznacznego opisu położenia, uwzględniając dodatkowo prędkości i przyspieszeń każdego członu mechanizmu kończyny robota względem korpusu wykonano analizę kinematyczną. W przypadku odnóża opisano ruch wykorzystując współrzędne Denavita-Hartenberga i współrzędne jednorodne [6].

Rozwiązując zadanie proste kinematyki ustalono pozycję końcówki łańcucha kinematycznego względem bazowego układu współrzędnych. W przypadku robotów kroczących wynikiem jest pozycja i orientacja końcówki odnóża, która bezpośrednio styka się z podłożem względem korpusu. Na rys. 2 umieszczono schemat kinematyczny kończyny robota z zaznaczonymi układami współrzędnych, kątami obrotów i długościami ogniw. Układy  $Ox_0y_0z_0$ ,  $Ox_1y_1z_1$  i  $Ox_2y_2z_2$  są układami związanymi z kolejnymi ogniwami odnóża a obrót wokół osi  $z_0$ ,  $z_1$ ,  $z_2$  oznaczono odpowiednio  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ .



**Rys. 2.** Schemat kinematyczny kończyny robota ośmionóżnego z zaznaczonymi współrzędnymi D-H

Ostatni układ współrzędnych  $Ox_3y_3z_3$  jest związany z końcówką odnóża. Długości ogniw wynoszą odpowiednio  $l_1, l_2, l_3$ . Współrzędne D-H kończyny umieszczono w tab. 1.

**Tab. 1.** Współrzędne D-H dla kończyny robota

$i$	$\theta_i$	$\alpha_i$	$\lambda_i$	$l_i$
1	$\theta_1$	$-\pi/2$	0	$l_1$
2	$\theta_2$	0	0	$l_2$
3	$\theta_3$	0	0	$l_3$

Rozwiązując zadanie proste kinematyki otrzymano macierz  $T_{3,0} = A_1 A_2 A_3$ , gdzie  $A_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) - macierz przekształcenia jednorodnego z układu  $i$  do  $i-1$  wykorzystująca współrzędne D-H. Macierz  $T_{3,0}$  określa pozycję i orientację końca odnóża względem korpusu robota dla określonych wartości kątowych.



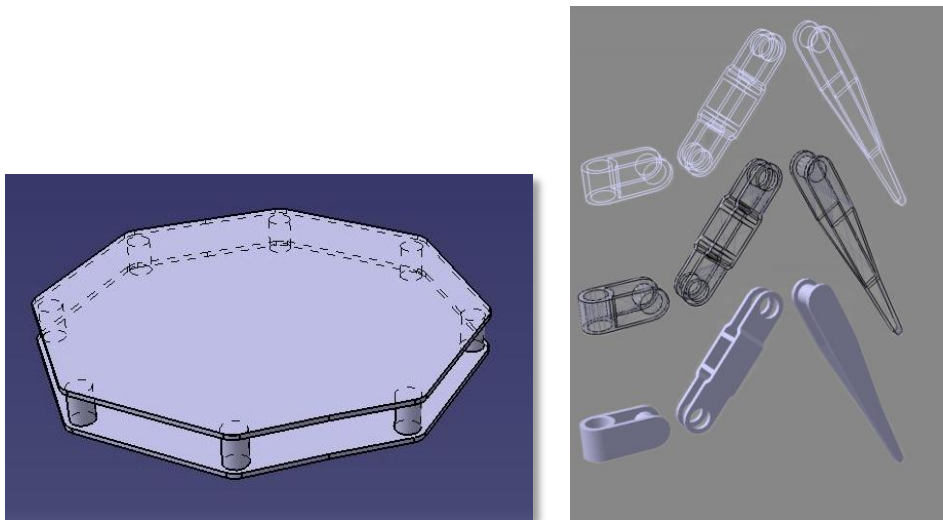
charakteryzuje się ciągłym wyborem, którą kończynę należy przełożyć w danym momencie. Zastosowanie chodu swobodnego dla robotów mobilnych jest szczególnie trudnym zadaniem ze względu na dużą liczbę szybkozmiennych parametrów. Ważne jest określenie priorytetowych kryteriów, które muszą być zachowane w pierwszej kolejności podczas chodu swobodnego, np. utrzymanie stabilności.

## 5. Model robota w środowisku CATIA v5

Model robota saperskiego zaprojektowano w środowisku CATIA v5. Wykorzystywanie programów do projektowania wspomaganego komputerowo (ang. computer aided design - CAD) jest obecnie bardzo powszechne w prawie każdej dziedzinie techniki, szczególnie przy konstrukcjach mechanicznych. Gotowe modele można łatwo edytować, generować na ich podstawie dokumentację techniczną oraz różnego rodzaju charakterystyki np. wytrzymałościowe, kinematyczne, itp.

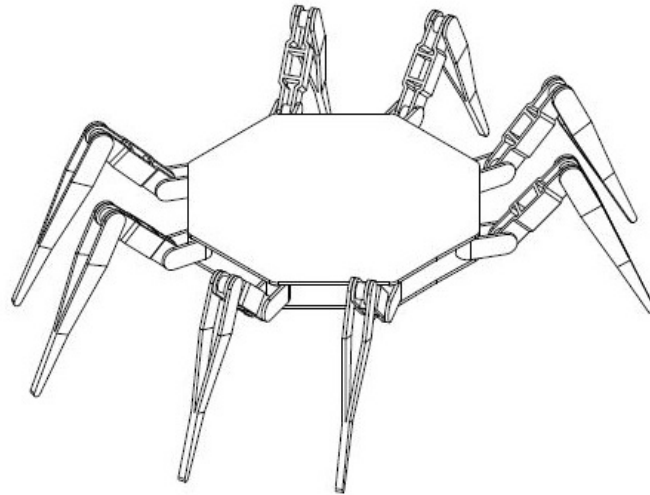
Pierwszym krokiem budowy makiety cyfrowej było opracowanie poszczególnych części robota. Odbywa się to w modułach modelowania bryłowego (Part Design) i powierzchniowego (Shape Design) [7].

Jako pierwsze zamodelowano kończyny i korpus (rys. 4). W tym celu wykorzystano moduły modelowania bryłowego (Part Design) oraz powierzchniowego (Shape Design).



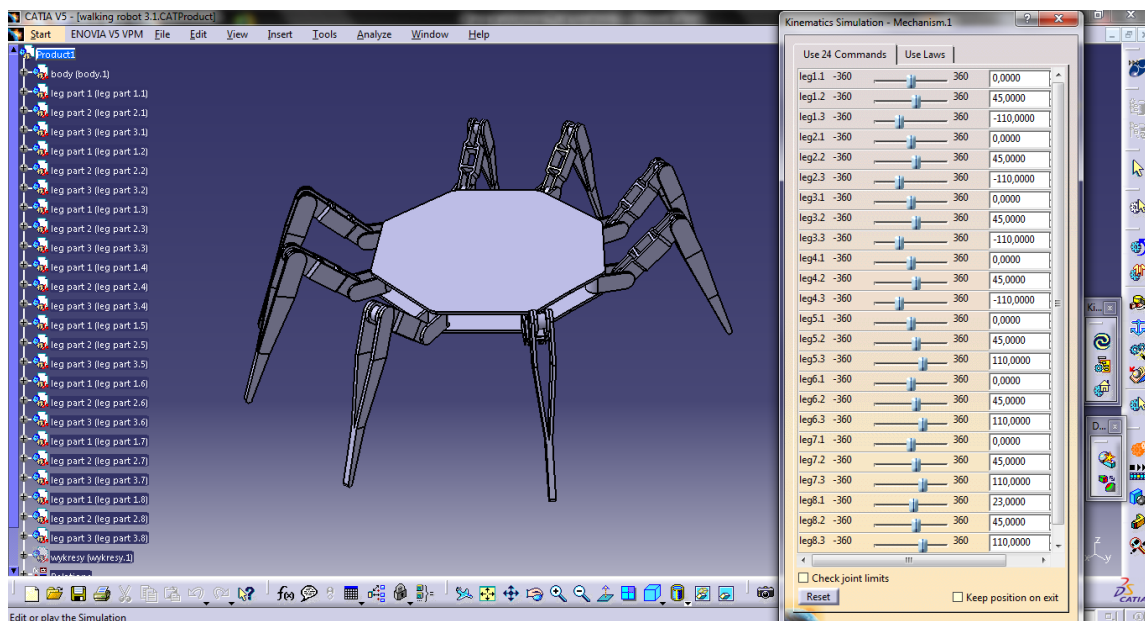
**Rys. 4.** Modele korpusu i kończyny wykonane w środowisku CATIA v5

Opracowane detale połączono w pary kinematyczne za pomocą modułu Assembly Design. Po opracowaniu kompletnej platformy kroczącej (rys. 5) wygenerowano dokumentację techniczną za pomocą modułu Drafting. Jest to niezwykle przydatna funkcja oprogramowania CATIA, gdyż pozwala opracować znormalizowane rysunki techniczne w dowolnej liczbie rzutów, a następnie automatycznie zwymiarować poszczególne elementy.



**Rys. 2.** Model robota kroczącego opracowanej w środowisku CATIA v5

Definiowanie zakresu ruchu w poszczególnych parach kinematycznych, określenie które pary kinematyczne są czynne, a które bierne i przeprowadzenie symulacji ruchu wraz z wygenerowaniem charakterystyk umożliwia moduł DMU Kinematics [8]. Na rys. 6 po prawej stronie widoczny jest panel komend określających przemieszczenia kątowe każdego ogniwa.



**Rys. 3.** Platforma cyfrowa opracowana w środowisku CATIA v5

Przeprowadzenie analizy prędkości i przyspieszeń jest niezwykle istotnym elementem przy projektowaniu robota. Otrzymane wyniki decydują m. in. o doborze odpowiednich typów napędów.

Analiza chodu modelu pozwala określić m. in. zakresy kątowe dla poszczególnych ogniw, prędkości i przyspieszenia kątowe i liniowe końcówki kończyny względem korpusu, trajektorię kończyny oraz jej przestrzeń roboczą. Na rys. 7 umieszczono przykładowe

charakterystyki ruchu dla przesunięcia kończyny z jednego do drugiego punktu w przestrzeni. Analiza została przeprowadzona dla kończyny ósmej (przednia prawa). Przyjęte wartości dla przebiegu symulacji wynoszą:

- zakresy ruchu w poszczególnych parach kinematycznych, dobrane na potrzeby symulacji,

$$\theta_1 = 0^\circ \div 23^\circ$$

$$\theta_2 = 45^\circ \div 55^\circ$$

$$\theta_3 = 100^\circ \div 110^\circ$$

- wartości początkowe,

$$\theta_1 = 0^\circ$$

$$\theta_2 = 45^\circ$$

$$\theta_3 = 110^\circ$$

- długości ogniw,

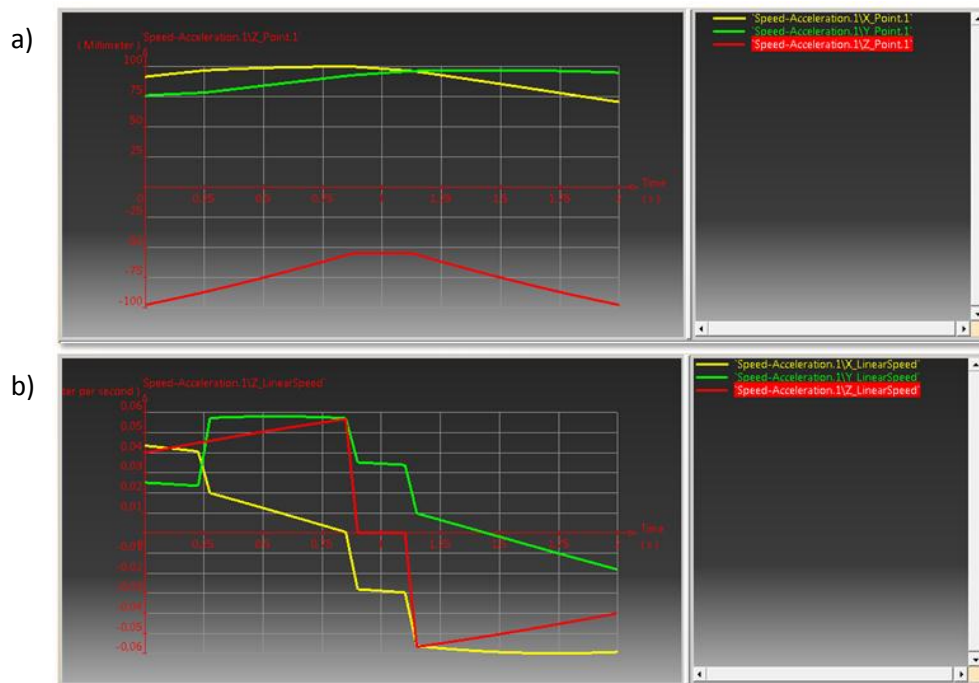
$$L_1 = 30 \text{ [mm]}$$

$$L_2 = 80 \text{ [mm]}$$

$$L_3 = 170 \text{ [mm]}$$

- czas symulacji

$$t = 2 \text{ [s]}$$



**Rys. 4.** Przykładowe charakterystyki ruchu kończyny względem korpusu wygenerowane w środowisku CATIA v5

Wynikiem rozwiązania zadania prostego kinematyki dla położenia początkowego i końcowego oraz zadania odwrotnego dla całego zakresu było przeprowadzenie symulacji ruchu kończyny w programie CATIA v5 i wygenerowanie charakterystyk ruchu (rys. 7). Na rys. 7a wygenerowano trajektorię końcówki odnóża (układ współrzędnych  $\{Ox_3y_3z_3\}$ ) w osi  $x$ ,  $y$ ,  $z$  względem korpusu robota (układ współrzędnych  $\{Ox_0y_0z_0\}$ ). Zależności prędkości linowych w czasie umieszczono na rys. 7b. Łatwo można wyodrębnić moment unoszenia kończyny, jej obrót względem korpusu a następnie opuszczenie do określonego punktu.

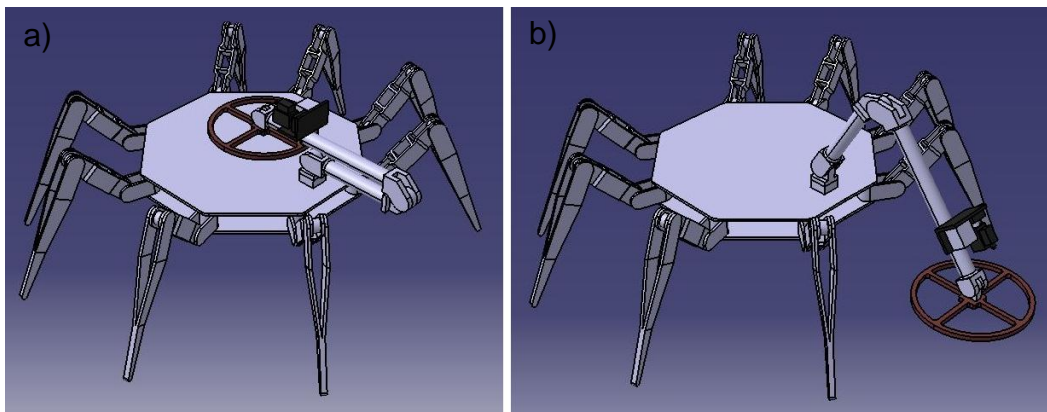
Zebrane wyniki stanowią bardzo ważne źródło informacji dotyczących planowania chodu. Na ich podstawie określić można m. in. jak wpłynie zadany kąt obrotu wału mechanizmu napędowego na położenie kończyny lub jakie położenie wału należy zadać, by dane położenie uzyskać.

## 6. Model robota saperskiego

Opracowanie modelu robota saperskiego wymagało przyjęcia kilku założeń. Przede wszystkim oprzyrządowanie przenoszone przez robota powinno być możliwie najlżejsze [1]. Dlatego zdecydowano się na opracowanie dwóch modeli robotów:

- do wykrywania min,
- do usuwania min.

Model robota do wykrywania ładunków wybuchowych przedstawiony został na rys. 8. Robot ten posiada cewkę detekcyjną o średnicy 120 mm, która zamocowana jest na ramieniu manipulacyjnym o czterech stopniach swobody. Liczba stopni swobody ramienia jest wystarczająca, gdyż nie ma potrzeby, by detektor obracał się wokół osi prostopadłej do płaszczyzny detektora ani osi równoległej do kierunku ruchu.

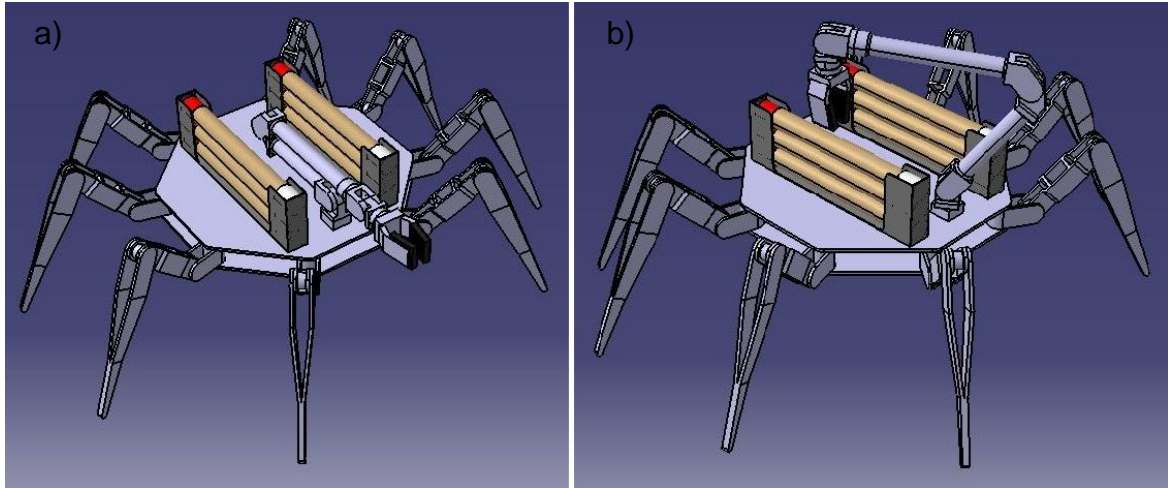


**Rys. 5.** Model robota do wykrywania min w trybie: a) transportowym, b) poszukiwawczym

Na ramieniu robota zamontowany został również detektor cząstek FIDO wykrywający obecność materiałów wybuchowych w powietrzu na zasadzie zakłócenia fluorescencji polimeru pomiarowego przez cząsteczki materiału wybuchowego. Są to urządzenia niezwykle czułe – potrafią wykrywać śladowe ilości materiałów wybuchowych (nawet poniżej 1 nanogramy) [4]. Potrafią wykrywać materiały wybuchowe bez kontaktu bezpośredniego, co jest niezwykle istotne w przypadku improwizowanych ładunków wybuchowych IED (ang. *improvised explosive device*), np. bomb ukrytych w elementach infrastruktury (zabetonowanych w krawężnikach, ukrytych w samochodach itd.).



Na rys. 9 przedstawiony został model robota do usuwania min. Wyposażenie robota stanowią dwa zasobniki z ładunkami DRAGON (po 3 szt. w zasobniku) oraz manipulator z chwytakiem. W przeciwieństwie do poprzedniego ramienia manipulacyjnego, w robocie tym zastosowano ramię manipulacyjne o sześciu stopniach swobody, gdyż konieczne jest ustawienie ładunku DRAGON w odpowiedniej pozycji nad miną.



**Rys. 6.** Model robota do usuwania min: a) w trybie transportowym, b) w momencie pobierania ładunku DRAGON

DRAGON opracowany został przez brytyjską organizację Disarmco [3]. Budową i działanie przypomina flarę sygnalizacyjną, jednakże mieszanka pirotechniczna (składająca się m.in. z termitu) pozwala uzyskać płomień o temperaturze przekraczającej 2000 stopni Celsjusza. Temperatura taka umożliwia przepalenie płaszcza miny, a następnie wypalenie znajdującego się w niej materiału wybuchowego bez ryzyka detonacji. Poniższy rysunek przedstawia testy poligonowe DRAGONA – urządzenia przepala płytę stalową o grubości  $\frac{1}{4}$ .



**Rys. 7.** Dragon podczas testów w Wielkiej Brytanii [3]

## 7. Podsumowanie

W opracowaniu modelu robota saperskiego wykorzystano analizę strukturalną i kinematyczną oraz analizę chodu robotów kroczących. W kolejnych krokach projektowania można uwzględnić bezkolizyjność robota uwzględniając brak zderzeń kończyn z otoczeniem. Uwzględniając bardzo szerokie możliwości środowisko CATIA w zakresie projektowania i symulacji mechanizmów można wprowadzić „tor przeszkód”, który mógłby symulować zachowanie się maszyny w różnych sytuacjach. Umożliwi to szybką weryfikację i korektę ewentualnych błędów jeszcze na etapie projektowania, co przekłada się na zaoszczędzenie czasu i jak umożliwić opracowanie konstrukcji spełniającej stawiane kryteria.

## Literatura

- [1] Antoni D., Ban Ž., Žagar M.: *Demining Robots – Requirements and Constraints*. 9TH Mediterranean Conference on Control and Automation, 27 - 29 June 2001.
- [2] Cieślak P.: *Pająki ptaszniki*. Agencja Wydawnicza EGROS, Warszawa.
- [3] *Disarmco „Dragon” flair*. <http://www.dtw.org.kh/Templates/disarmco.html>
- [4] *FIDO OnBoard. Robot integrated explosives vapor detection*. Product overview.
- [5] Hrishikesh T.: *Robots for demining*. Technical presentation, Department of Mechanical Engineering, Vasavi College of Engineering, 30 June 2010.
- [6] Morecki A., Knapczyk J. (red. nauk.): *Podstawy robotyki*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1999.
- [7] Węlczyk A.: *CATIA v5 Przykłady efektywnego zastosowania systemu w projektowaniu mechanicznym*. Wydawnictwo HELION, Gliwice 2005.
- [8] Wyleżoł M.: *CATIA v5 Modelowanie i analiza układów kinematycznych*. Wydawnictwo HELION, Gliwice 2007.
- [9] Zielińska T.: *Maszyny kroczące*. PWN, Warszawa 2003.