

# Chwytek wielopalczasty dla robota usługowego – planowanie chwytów

Wojciech Szykiewicz\*, Krzysztof Czajkowski\*, Cezary Zieliński\*, Tomasz Winiarski\*,  
Krzysztof Mianowski\*\*, Konrad Banachowicz\*

\*Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej Politechniki Warszawskiej,

\*\*Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej Politechniki Warszawskiej

**Streszczenie:** W trzeciej części artykułu poświęconego konstrukcji, sterowaniu oraz planowaniu ruchów trójpalczastego chwytaka, opisano sposób planowania chwytów dla tego chwytaka. Przedstawiono również wyniki wstępnych eksperymentów z tym chwytakiem.

**Słowa kluczowe:** chwytak wielopalczasty, planowanie chwytów, sterowanie robotami

Problematyka chwytania obiektów za pomocą sztucznych wielopalczastych rąk obejmuje podstawowe zagadnienia: synteze, analizę oraz realizację chwytu [9, 14, 16]. Chwyt jest relacją jaka zachodzi pomiędzy obiektem a ręką/chwytkiem robota. Składnikami tej relacji są *kontakty*, czyli spójne zbiory w otoczeniu punktów styczności dwóch ciał. Powszechnie przyjmuje się, że wszystkie kontakty są punktowe, a takie wyidealizowane przypadki jak kontakty liniowe (krawędziowe) lub powierzchniowe (ściana) mogą być przybliżane przez dwa lub więcej kontaktów punktowych. Kontakty mogą być modelowane jako kontakt *punktowy bez tarcia*, kontakt *punktowy z tarcie* lub kontakt typu *miękki palec* [14]. Kontakt bez tarcia jest definiowany jako kontakt, w którym palec sztucznej dłoni (szczeka chwytaka) może wywierać siłę tylko wzdłuż wspólnej normalnej w punkcie kontaktu. Model ten jest stosowany wtedy, gdy obszar kontaktu palca z obiektem jest bardzo mały a tarcie jest pomijalne. W punkcie kontaktu z tarcie, poza siłą normalną, wywierane są siły styczne, zaś kontakt miękki umożliwia ponadto wywieranie momentu skręcającego wokół wspólnej normalnej w punkcie kontaktu. Model „twardego palca” (punktowy z tarcie) ma zastosowanie wówczas, gdy siły tarcia są na tyle duże, że nie można ich pominąć. Model „miękkiego palca” jest używany wtedy, gdy zarówno tarcie jak i powierzchnia kontaktu są duże. Typy kontaktów i ich rozmieszczenie decydują o tym, czy obiekt jest całkowicie unieruchomiony w palcach, czy też końcówki palców mogą przemieszczać się względem obiektu, np. ślizgać lub toczyć się po jego powierzchni. W istocie kontakty reprezentują pary kinematyczne różnej postaci między obiektem i kontaktującym się z nim elementem ręki. Wyróżnia się dwa podstawowe rodzaje chwytów [9, 14]:

- chwyt domknięty kształtowo (ang. *form-closure grasp*),
- chwyt domknięty siłowo (ang. *force-closure grasp*).

W chwycie domkniętym kształtowo dłoń i palce ręki zamykają się na obiekcie dopasowując do jego kształtu w taki sposób, że obiekt nie może się poruszyć w żadnym kierunku. W domknięciu siłowym istotną rolę odgrywają siły

działające na obiekt. Wymaga się, aby obiekt pozostawał w równowadze pod działaniem zewnętrznych sił zakłócających. Należy zatem zauważyć, że wszystkie chwyt domknięte kształtowo są również domknięte siłowo. Innym kryterium klasyfikacji jest podział ze względu na cel chwytu, gdzie wyróżnia się dwa podstawowe rodzaje chwytów: *mocne* i *precyzyjne*. Chwyt mocny zwykle charakteryzuje się dużą powierzchnią kontaktów i są stosowane przy zadaniach wymagających utrzymania obiektu w niezmiennym położeniu względem ręki przy dużych siłach zewnętrznych działających na obiekt. Przykładem takiego chwytu jest trzymanie młotka podczas wbijania gwoździ. Chwyt precyzyjny są stosowane w zadaniach wymagających zmiany położenia obiektu względem ręki. Charakteryzują się niewielkimi powierzchniami kontaktów przez co zmniejsza się tarcie i umożliwia ślizganie się obiektu względem palców, co z kolei umożliwia manipulację obiektem.

Możliwe do wykonania chwyt spełniają trzy typy ograniczeń [5]. Są to ograniczenia zadania (np. ruch i siły jakie muszą działać na obiekt), ograniczenia obiektu (np. kształt i kruchość) i ograniczenia ręki (np. maksymalna siła jaką można przyłożyć i maksymalny kąt rozwarcia palców). Do wyznaczenia statycznych własności chwytu trzeba określić:

- Jakie siły/momenty mogą być zastosowane (przyłożone) do obiektu przez kontakty danego chwytu?
- Jakie są spodziewane zakłócenia, które będą oddziaływać na obiekt?
- Miarę jakości chwytu – dobrą miarą jest wielkość skalarna, która opisuje odporność chwytu na spodziewane zakłócenia.

Schwycenie obiektu wymaga zastosowania algorytmu syntezy chwytu, czyli zaplanowania właściwego chwytu dla danego obiektu, a następnie jego stabilne uchwycenie. Do rozwiązania zadania syntezy chwytu są stosowane dwa ogólne podejścia: *analityczne*, bazujące na modelu, i *empiryczne*, wykorzystujące wiedzę o chwytach stosowanych przez ludzi. W podejściu analitycznym problem syntezy chwytu jest zazwyczaj formułowany jako zadanie poszukiwania lokalizacji punktów kontaktu na powierzchni obiektu w celu optymalizacji miary jakości chwytu. Do syntezy chwytu zazwyczaj wykorzystuje się dokładne modele geometryczne obiektów oraz zakłada się znajomość ich fizycznych własności, np. współczynników tarcia. W teorii, przy założeniu dokładnych modeli, możliwe jest określenie optymalnego chwytu dla danego obiektu. W wielu wczesnych algorytmach syntezy chwytu nie uwzględniano własności geometrycznych

i kinematycznych ręki, obiekty miały proste kształty a liczba kontaktów była ograniczona [16]. Obliczone punkty kontaktu mogą być nieosiągalne dla danej ręki. Ponadto, przy realizacji zaplanowanych chwytów, zazwyczaj wymaga się, aby palce chwytaków precyzyjnie osiągnęły punkty kontaktowe i wywierały dokładnie zadane siły/momenty, co w warunkach rzeczywistych jest często nierealistycznym założeniem.

Obecnie najszybciej rozwijającym się podejściem do syntezy chwytów są algorytmy bazujące na wiedzy (ang. *knowledge-based/data-driven grasp planning*) [7]. Podejście polega na gromadzeniu wiedzy o chwytach stosowanych do chwytania już znanych obiektów. Baza trójwymiarowych modeli obiektów służy do tworzenia bazy chwytów obiektów. Podczas planowania chwytu dla nowego obiektu są znajdowane chwyt analogiczne do tych jakie już znaleziono dla znanych obiektów. Algorytm planowania chwytu bazuje na intuicyjnym założeniu, że obiekty o podobnym kształcie będą w podobny sposób chwywane. Pojawiły się też propozycje przechowywania informacji semantycznej o obiektach [17], takiej jak możliwość odkręcenia korka butelki czy nie chwytania za brzeg filiżanki, który może stykać się z ustami pijącego z niej człowieka.

W podejściu empirycznym stosuje się metody, w których imituje się chwyt wykonywane przez ludzi używając heurystyk do wyboru postury ręki ze zbioru podstawowych konfiguracji zależnych od zadania i geometrii obiektu [13]. Pomysł ten wywodzi się ze spostrzeżenia, że człowiek ma pewien zestaw układów dłoni stosowany przy chwytaniu każdego obiektu o typowych kształtach, zwanych kształtami podstawowymi lub prymitywami. Przy syntezie chwytów wykorzystuje się metody symulacyjne z użyciem modeli 3D obiektów, ręki i przeszkód [12]. Metoda planowania chwytu zastosowana w niniejszej pracy należy do tej grupy i bazuje na tzw. algorytmie brutalnej siły.

Wybór odpowiedniego kryterium do oceny jakości chwytów często zależy od celu chwytu (np. uchwyt mocny dla zachowania stabilnej pozycji obiektu albo precyzyjny chwyt w celu zręcznej manipulacji). Większość proponowanych w literaturze kryteriów oceny chwytów wykorzystuje własność domknięcia siłowego. Proponowane miary jakości chwytu można podzielić na dwie grupy: miary związane z położeniem punktów kontaktu oraz miary związane z konfiguracją ręki. Do pierwszej grupy zalicza się kryteria bazujące na algebraicznych własnościach macierzy chwytu [2, 10], geometrycznych relacjach między punktami kontaktu [15] oraz kryteria uwzględniające ograniczenia sił wywieranych przez palce [3, 6, 13, 16]. Z praktycznego punktu widzenia najbardziej przydatne okazały się te ostatnie. Ocena jakości chwytu polega na obliczeniu maksymalnej wartości zewnętrznej siły uogólnionej działającej w kierunku największego wysiłku, która może być zrównoważona przez jednostkowe siły kontaktowe wywierane przez palce [6]. Opracowano szereg testów tej własności przy użyciu różnych technik modelowania chwytu, takich jak macierz chwytu [2], przestrzeń sił uogólnionych chwytu (ang. *Grasp Wrench Space (GWS)*) [6] lub macierzy liniowych nierówności [8]. Do miar jakości chwytu związanych z konfiguracją ręki można zaliczyć: odległość do konfiguracji osobliwych ręki, objętość elipsoidy manipulowalności [16].

## 1. Algorytm planowania chwytu dla trójpalczastej ręki

System planowania chwytu powinien realizować następujące funkcje:

- Generować kontakty dla danego obiektu.
  - Dla danego zbioru kontaktów obliczać konfigurację ręki (dopuszczalną konfigurację przegubów palców ręki).
  - Sprawdzać możliwość wystąpienia kolizji (unikanie wnikanía ręki w głąb obiektu).
  - Oceniać jakość chwytu na podstawie zadanego kryterium.
- Zastosowany w niniejszej pracy algorytm planowania chwytu wykorzystuje bazę kształtów podstawowych, dla których są znane:
- kierunki, z których można chwycić obiekty o danym kształcie,
  - posturę (konfigurację) ręki, przy której należy chwycić obiekt z danego kierunku.

Do opisu chwytu należy określić pozycję ręki w inercjalnym układzie współrzędnych, konfigurację palców chwytaka, punkty kontaktu oraz siły działające na obiekt.

Konfigurację palców ręki opisuje wektor zmiennych przegubowych  $\mathbf{q}_d = [q_{d[1]}, \dots, q_{d[k]}]^T$ , zaś wektor  $\boldsymbol{\tau}_m = [\tau_{m[1]}, \dots, \tau_{m[k]}]^T$  momenty sił w przegubach, gdzie dla rozważanej trójpalczastej ręki  $k = 8$  (dwa palce mają trzy stopnie swobody a jeden palec ma dwa stopnie swobody). Zakładamy, że chwyt składa się z  $n$  kontaktów punktowych z tarcie. Wprowadzamy następujące układy współrzędnych kartezjańskich:  $O$  – inercjalny układ odniesienia,  $H$  – układ związany z ręką,  $G$  – układ związany z obiektem. Wektor  $\mathbf{r} \in \mathbb{R}^3$  określa położenie układu  $H$  w układzie  $O$ , gdzie  $\mathbb{R}^3$  oznacza trójwymiarową przestrzeń euklidesową. Orientacja obiektu jest wyrażona przez parametryzację oś-kąt  $(\mathbf{u}, \varphi)$ , gdzie wektor  $\mathbf{u}$  wyznacza oś obrotu, zaś  $\varphi$  kąt obrotu wokół tej osi. Konfigurację ramienia manipulatora opisuje wektor jego współrzędnych przegubowych  $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \dots, \theta_6]^T$ . Wektor  $\mathbf{c}_i$  określa punkt kontaktu w układzie  $G$ . W algorytmie syntezy chwytu zakłada się znajomość pozycji obiektu, czyli pozycji układu  $G$  względem układu  $O$ . W proponowanym podejściu pozycję obiektu wyznacza się z odczytów czujnika PCBird, który mierzy trzy składowe położenia i trzy składowe orientacji [4]. Dokładność pomiarów to około 2 mm dla położenia i około 1° dla orientacji. We wstępnych eksperymentach założono, że czujnik jest przymocowany do obiektu. Pozwala to na śledzenie pozycji obiektu również podczas chwytania i sprawdzenie, czy przed zaciśnięciem palców obiekt nie jest przesuwany przez palce. W dalszych badaniach pozycja obiektu będzie wyznaczana na podstawie analizy obrazu z kamery stacjonarnej obserwującej scenę oraz kamery zamontowanej na chwytaku.

W  $i$ -tym punkcie kontaktu jest wywierana siła  $\mathbf{f}_i = [f_{in}, f_{it}, f_{io}]^T$ , gdzie  $f_{in}$  jest składową normalną wektora siły, a  $f_{it}$  i  $f_{io}$  są składowymi stycznymi wzajemnie ortogonalnymi. Ponadto każda siła działająca na obiekt w punkcie kontaktu wytwarza moment sił względem punktu odniesienia będącym początkiem układu  $G$ , którym w rozważanym przypadku, jest środek masy obiektu. Moment  $\mathbf{m}_i$  odpowiadający sile  $\mathbf{f}_i$  jest obliczany jako  $\mathbf{m}_i = \mathbf{c}_i \times \mathbf{f}_i$ . Siły i momenty sił są wyrażone w układzie  $G$  związanym

z obiektem. Dla zwartości zapisu siła i moment sił są przedstawione jako wektor sił uogólnionych  $\mathbf{w}_i \in \mathbb{R}^6$  w punkcie kontaktu  $i$ :

$$\mathbf{w}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_i \\ \lambda \mathbf{m}_i \end{bmatrix},$$

gdzie  $\lambda$  jest współczynnikiem skalującym niezbędnym do wprowadzenia metryki w przestrzeni sił uogólnionych. Należy zwrócić uwagę na różne wymiary siły i momentu sił składających się na wektor sił uogólnionych.

W dalszych rozważaniach przyjmuje się model tarcia Coulomba, dla którego stożek tarcia jest zwartym podzbiorem  $\mathbb{R}^3$ :

$$\mathcal{F}_i = \left\{ (f_{in}, f_{it}, f_{io}) : \sqrt{f_{it}^2 + f_{io}^2} \leq \mu_i f_{in} \right\}, \quad (1)$$

gdzie  $\mu_i$  jest współczynnikiem tarcia w punkcie kontaktu  $i$ .

Wykorzystując program Blender [1] do budowy geometrycznych modeli 3D stworzono model chwytaka i środowiska rys. 1. Modele geometryczne obiektów wykorzystywane w symulacjach pokazano na rysunku 2.

Oprócz modeli geometrycznych, jako dane wejściowe do symulacji, są podawane: współczynniki tarcia, środek masy i materiał, z którego wykonano obiekt [12]. Działanie algorytmu polega na wyznaczaniu wielu kierunków podejścia i konfiguracji ręki wokół obiektu przybliżonego jednym z podstawowych kształtów (walec, sfera, stożek, prostopadłościan). Do generacji zbioru chwytów dla danego kształtu wykorzystuje się heurystyki [12]. Modele obiektów można generować automatycznie ze znanych kształtów podstawowych na podstawie obrazu z kamery lub odczytów z innych czujników. Ponieważ dla każdego kształtu podstawowego znamy najlepszą posturę początkową ręki oraz kierunki, z których można próbować go chwytać, wyznaczamy zestaw kierunków podejścia i punktów początkowych (startowych) w małej odległości od obiektu. Przykładowy zestaw kierunków i pozycji początkowych przedstawiono na rysunku 3. Kule obrazują punkty początkowe do chwytu, przy czym środek kuli określa położenie początku układu współrzędnych ręki  $H$ , zaś wektory poszczególne osie tego układu. Linie wyznaczają wybrane kierunki podejścia do obiektu. Liczba i ustawienie punktów startowych chwytu są parametrami dobieranymi dla danego obiektu i zależą od jego kształtu i rozmiarów.

Następnie są sprawdzane po kolei wszystkie wyznaczone pozycje początkowe. Ręka jest zbliżana z tych pozycji w kierunku obiektu aż do uzyskania kontaktu. W trakcie zbliżania ręki do obiektu i zaciskania palców są wykorzystywane algorytmy ciągłego wykrywania kolizji, które wskazują nie tylko kolizje statycznych obiektów, ale również biorą pod uwagę względny ruch obiektów i wykrywają chwilę pierwszego kontaktu [12]. Ostatnim krokiem jest zaciśnięcie palców na obiekcie i ocena chwytu.

Jakość chwytu jest obliczana zgodnie z miarą wprowadzoną w pracy [6]. W tym celu wykorzystuje się pojęcie przestrzeni sił uogólnionych chwytu (GWS) będącej zbiorem sił i momentów działających na obiekt przy założeniu normalizacji siły w punktach kontaktu,  $\|\mathbf{f}_i\| \leq 1$ ,  $i = 1, \dots, n$ . Do wyznaczenia tej przestrzeni konieczna jest znajomość sił uogólnionych  $\mathbf{w}_i$  w każdym kontakcie.

Stożek tarcia w punkcie kontaktu  $c_i$  jest przybliżany ostrosłupem foremnym o  $m$  krawędziach – wektorach sił

rozłożonych równomiernie na powierzchni stożka tarcia. Siła wywierana na obiekt przez palec jest wyrażona jako kombinacja liniowa jednostkowych sił  $\mathbf{f}_{ij}$ ,  $j = 1, \dots, m$ . Biorąc pod uwagę przyjęty model tarcia w punkcie kontaktu, moment siły generowany przez palec jest momentem skręcającym. Moment wypadkowy jest kombinacją momentów sił  $\mathbf{m}_{ij}$ ,  $j = 1, \dots, m$ . Wypadkowa siła uogólniona  $\mathbf{w}$  wywierana przez palce w  $n$  kontaktach jest obliczana jako:

$$\mathbf{w} = \sum_{i=1}^n \mathbf{w}_i = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} \mathbf{w}_{ij}, \text{ gdzie} \quad \alpha_{ij} \geq 0, \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} \leq 1 \quad (2)$$

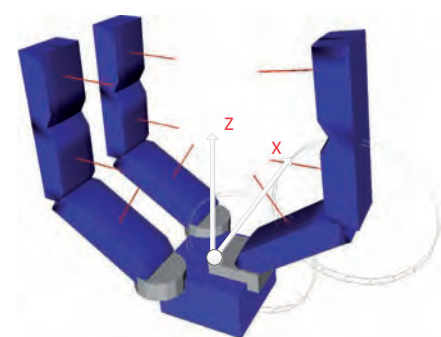
Biorąc pod uwagę wszystkie możliwe wartości  $\alpha_{ij}$  zbiór  $\mathcal{W}$  (przestrzeń sił uogólnionych chwytu) wypadkowych sił uogólnionych, jakie mogą być wywierane na obiekt jest ograniczony przez powłokę wypukłą daną jako

$$\mathcal{W}_{Q_\varepsilon} = \text{ConvexHull} \left( \bigcup_{i=1}^n \{\mathbf{w}_{i1}, \dots, \mathbf{w}_{im}\} \right) \quad (3)$$

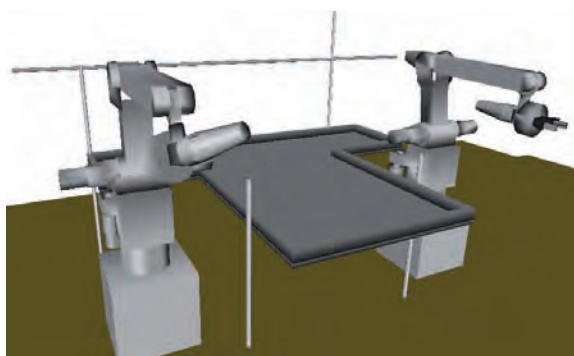
Jest to sześciowymiarowa powłoka wypukła, składająca się z wartości sił uogólnionych dla każdego z punktów kontaktu. Jeśli początek przestrzeni GWS jest zawarty wewnątrz tej powłoki, to chwyt jest stabilny. Jako miara jakości chwytu  $Q_\varepsilon$  jest przyjmowany promień  $\varrho$  największej sześciowymiarowej sfery, o środku w początku układu związanego z obiektem, zawartej wewnątrz powłoki wypukłej (3). Można wyobrazić sobie, że sfera ta ma na początku minimalny promień, który jest zwiększany aż do jej zetknięcia się z powierzchnią powłoki. Im wartość  $\varrho$  jest bliższa 1, tym lepszy jest chwyt. Należy jednak zauważyć, że ta miara jakości chwytu nie jest inwariantna względem wyboru początku układu przestrzeni sił uogólnionych [11].

Algorytm brutalnej siły do syntezy chwytu składa się z następujących kroków:

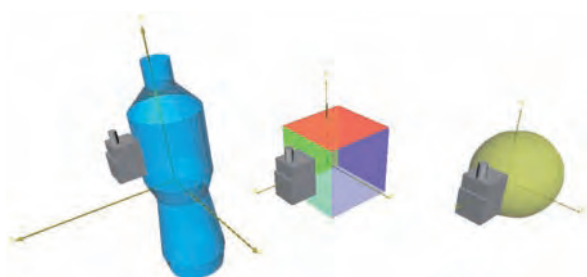
- 1) Wczytaj dokładne modele 3D ręki, obiektu i środowiska.
- 2) Przybliż model chwytanego obiektu jednym z kształtów podstawowych.
- 3) Dla wybranego kształtu podstawowego wyznacz zestaw kierunków  $D = (d_1, \dots, d_N)$  podejścia do obiektu.
- 4) Dla  $i = 1, \dots, N$  wybierz kierunek  $d_i$  i wykonaj kroki, 5, 6, 7.
- 5) Ustaw rękę w pozycji początkowej i przesun ją w wybranym kierunku do zadanej pozycji końcowej. Jeżeli nie jest możliwe dojście do obiektu z danego kierunku, ze względu na kolizje z przeszkodami, to odrzuć ten kierunek i wróć do kroku 4. Jeśli wszystkie kierunki zostały sprawdzone, to przejdź kroku 7.
- 6) Spróbuj zaciśnąć place. Jeśli nie jest możliwe zaciśnięcie wszystkich palców na obiekcie ze względu na kolizję z przeszkodami, to odrzuć ten kierunek i wróć do 4.
- 7) Oblicz jakość chwytu korzystając funkcji oceny chwytu. Porównaj wynik z najlepszym dotychczasowym chwytem i jeśli aktualny jest lepszy zapamiętaj go.



a)

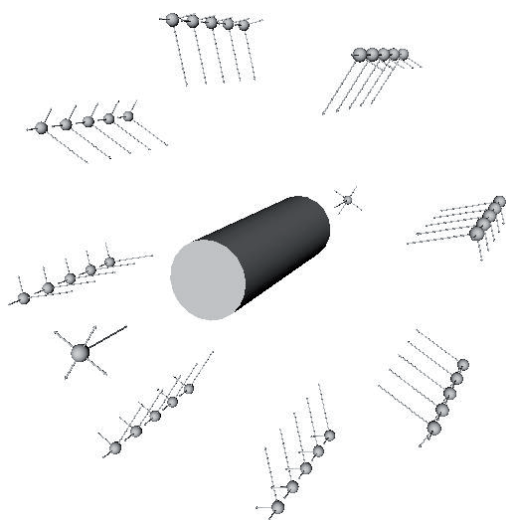


b)

**Rys. 1.** Modele symulacyjne: a) trójpalczastej ręki, b) środowiska**Fig. 1.** Simulation models: a) a three-fingered gripper model, b) an environment model

a)

b)

**Rys. 2.** Modele geometryczne obiektów: a) dokładne, b) przybliżone**Fig. 2.** Geometric models of objects: a) exact models, b) rough models**Rys. 3.** Kierunki podejścia i punkty startowe dla walca**Fig. 3.** Approach directions and starting points for the cylinder

Algorytmy planowania i wykonania chwytów zaimplementowano z wykorzystaniem dwóch środowisk programistycznych: symulatora GraspIt oraz programowej struktury ramowej MRR0C++. Do planowania oraz wstępnej weryfikacji chwytów wykorzystano symulator GraspIt [12]. Symulator umożliwia wizualizację chwytu oraz sił i momentów sił kontaktowych a także ocenę jakości chwytu. Do realizacji obliczonych chwytów napisano sterowniki z użyciem struktury ramowej MRR0C++ [18, 19].

## 2. Implementacja algorytmu chwytania

Ogólną strukturę systemu sterującego ramieniem robota wraz z chwytakiem przedstawiono w drugiej części niniejszego artykułu. W procesie koordynatora MP są pobierane z symulatora GraspIt dane opisujące zaplanowany chwyt. Komunikacja między symulatorem GraspIt a procesem MP jest realizowana w architekturze serwer-klient z użyciem protokołu TCP/IP. Serwerem jest GraspIt, który po wybraniu odpowiedniej opcji z interfejsu użytkownika zaczyna nasłuchiwać połączeń przychodzących. Komunikację procesu MP z GraspIt zrealizowano za pomocą czujnika wirtualnego VSP. Stworzono nową klasę czujnika, której metody umożliwiają nawiązanie połączenia i pobranie danych z symulatora. Jako wynik planowania chwytu są obliczane pozycje początkowa i końcowa chwytaka oraz konfiguracja końcowa palców. Konfiguracja początkowa palców jest stała i odpowiada maksymalnemu ich rozwarciu. Pozycję początkową chwytaka opisuje wektor położenia  $r^p$  i orientacja oś-kąt  $(u^p, \varphi^p)$  wyrażone w układzie  $O$  i odpowiadająca jej początkowa konfiguracja manipulatora  $\theta^p$ . Pozycja końcowa chwytaka, po wykonaniu chwytu, jest określona przez  $r^k$  i  $(u^k, \varphi^k)$ , zaś konfiguracja końcowa przegubów palców jest dana jako wektor  $q_d^k$ .

Proces MP pobiera dane i wysyła polecenia ustawienia ramienia w pozycji początkowej a następnie ustawienie chwytaka w konfiguracji początkowej. Dwa procesy ECP generują trajektorie ruchu ramienia manipulatora (ECP<sub>1</sub>) i trójpalczastego chwytaka (ECP<sub>2</sub>). Ich rola sprowadza się do odbierania poleceń z procesu MP oraz przekazywania ich do wykonania przez procesy sterowników manipulatora EDP<sub>1</sub> i trójpalczastego chwytaka EDP<sub>2</sub>. W dalszej

kolejności MP zleca  $ECP_1$  wykonanie przejścia ramienia do pozycji końcowej, a następnie procesowi  $ECP_2$  ustawienie palców chwytka w konfiguracji  $q_d^k$ , co spowoduje zaciśnięcie palców na obiekcie. Bezpośrednie sterowanie ramieniem robota oraz chwytakiem jest realizowane w procesach EDP. Odpowiednie pozycje do wykonania w procesach EDP są zadawane w postaci bezwzględnej, parametry polecenia dla EDP są następujące:  $m_t = \text{bezwzględnie}$ ,  $B = B_{const}$ ,  $\tau_d = 0$ ,  $n_s = \hat{n}_s$  – czyli realizowane jest zachowanie pośrednie wymuszające ruch z jednoczesnym monitorowaniem wywieranej siły.

### 3. Realizacja chwytów

Zakładamy dla uproszczenia, że chwytak znajduje się w pozycji początkowej podejścia chwytu. Jest to pozycja w pobliżu chwytanego obiektu. Jak wspomniano powyżej, wybór odpowiedniego punktu początkowego podejścia do obiektu jest jednym z elementów algorytmu planowania chwytu. W ogólnym przypadku obliczenie trajektorii dojścia do punktu początkowego może być nietrywialnym zadaniem ze względu na ograniczoną przestrzeń roboczą ramienia i konieczność ominięcia przeszkód. Od punktu początkowego chwytak przemieszcza się ze stałą prędkością w kierunku obiektu. Po osiągnięciu zadanej pozycji końcowej chwytaka są zaciskane wszystkie palce, do chwili przekroczenia wartości progowej  $\tau_i^*$  momentu siły  $\tau_i$  w przegubach palców. W trakcie zamykania się palców na obiekcie mierzone są momenty sił w przegubach. Do sterowania poszczególnymi przegubami wykorzystuje się regulator pozycyjno-siłowy realizujący zachowanie przejściowe, gdzie zadawane jest położenie, ale regulator uwzględnia mierzony moment siły. Dla wybranych obiektów chwyt zaplanowane i wykonane są przedstawione na rys. 4, rys. 5 i rys. 6.

Porównując chwyt zaplanowany i wykonany można zauważyć stosunkowo dużą ich zgodność dla każdego obiektu. Pewne różnice między chwytami zaplanowanymi i rzeczywistymi wynikają m.in. z niedokładności kalibracji systemu i przyjętych wartości parametrów, które mogą różnić się istotnie od wartości rzeczywistych, np. przyjętych wartości współczynników tarcia. To oczywiście może skutkować tym, że jakość wykonanych chwytów może różnić się od jakości chwytów planowanych. Zakresy wartości miary jakości chwytów są zróżnicowane, co wynika z położenia punktów kontaktu na powierzchni obiektu. Co z kolei zależy od złożoności kształtów tych obiektów i ich rozmiarów.

Na rysunkach 4a, 5a, 6a zobrazowano rzut 3D sześciowymiarowej powłoki wypukłej sił uogólnionych odpowiednio dla składowych momentów sił (lewa strona) i składowych sił (prawa strona). Ilustrują one odporność danego chwytu na działanie sił i momentów zakłócających względem poszczególnych osi. Przykładowo, dla butelki znaleziony chwyt ma najniższą jakość. Analizując odpowiednie rzuty powłoki sił uogólnionych (rys. 6a) można zauważyć, że stosunkowo niewielkie momenty zewnętrznych sił zakłócających mogą powodować przemieszczanie się obiektu względem palców chwytaka. Dla zaplanowanych chwytów wartości momentów sił w pierwszym przegubie każdego z palców mieściły się w przedziale od 0,3 Nm do 0,72 Nm, dla drugiego przegubu przedział osiągniętych wartości był szerszy, od 0,18 Nm do 1,05 Nm. Wartości progowe momentów sił  $\tau_i^*$  w przegubach

palców zostały dobrane eksperymentalnie, aby zapewnić odpowiednią odporność chwytu na zakłócenia.

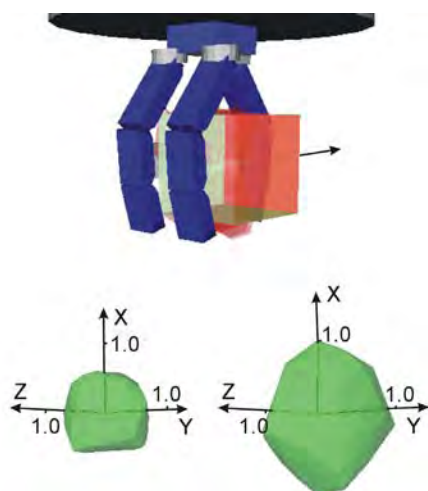
## 4. Podsumowanie

### Podziękowania

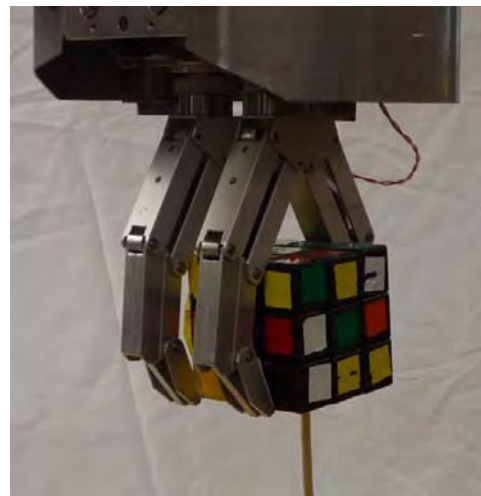
Praca finansowana przez grant Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego N514 1287 33.

### Bibliografia

- (2010): *Blender – otwarte środowisko do modelowania i animacji grafiki trójwymiarowej*. <http://www.blender.org>.
- Bicchi, A. (1995): *On the closure properties of robotic grasping*. International Journal Robotics Research 14(4), 19–44.
- Borst, C., Fischer, M., Hirzinger, G. (1999): *A fast and robust grasp planner for arbitrary 3D objects*. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1890–1896.
- Corporation, A. T. (2000): *PCbird - Installation and Operation Guide*.
- Cutkosky, M. R. (1989): *On Grasp Choice, Grasp Models, and the Design of Hands for Manufacturing Tasks*. IEEE Transactions on Robotics and Automation 5(3), 269–279.
- Ferrari, C., Canny, J. (1992): *Planning optimal grasps*. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2290–2295, Nice, France.
- Goldfeder, C., Ciocarlie, M., Dang, H., Allen, P. K. (2009): *The Columbia Grasp Database*. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, Kobe, Japan.
- Han, L., Trinkle, J., Li, Z. (200): *Grasp analysis as linear matrix inequality problems*. IEEE Transactions on Robotics and Automation 16(6), 663–674.
- Khatib, O., Siciliano, B. (Eds.) (2008): *Springer Handbook of Robotics*. Springer, chapters: 15, 27, 28.
- Li, Z., Sastry, S. S. (1988): *Task-oriented optimal grasping by multifingered robotic hands*. IEEE Journal of Robotics and Automation 4(1), 32–44.
- Miller, A. T., Allen, P. K. (1999): *Examples of 3D grasp quality computations*. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1240–1246.
- Miller, A. T., Allen, P. K. (2004): *GraspIt!: A Versatile Simulator for Robotic Grasping*. IEEE Robotics and Automation Magazine 11(4), 110–122.
- Miller, A. T., Knoop, S., Christensen, H. I., Allen, P. K. (2003): *Automatic grasp planning using shape primitives*. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1824–1829.
- Murray, R. M., Li, Z., Sastry, S. S. (1994): *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*. CRC Press.
- Park, Y., Starr, G. (1992): *Grasp synthesis of polygonal objects using a three-fingered robotic hand*. Int. Journal of Robotics Research 11(3), 163–184.
- Shimoga, K. (1906): *Robot grasp synthesis algorithms: A survey*. Int. Journal of Robotics Research 15(3), 230–266.

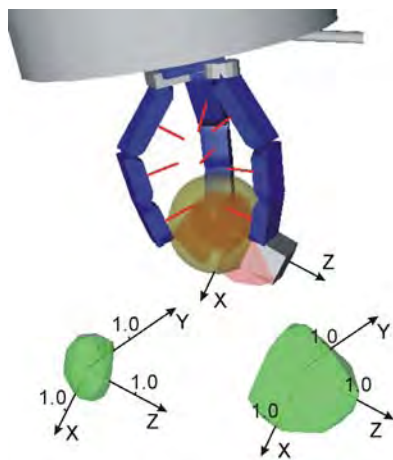


a)

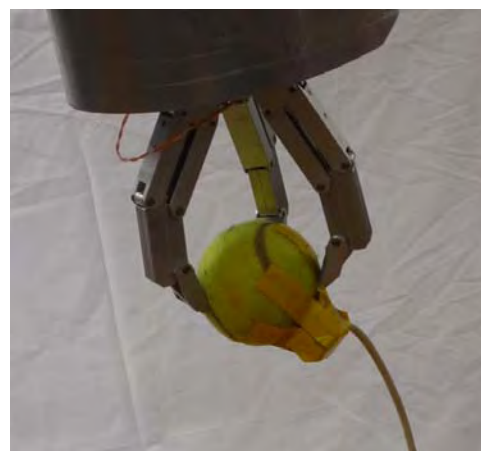


b))

**Rys. 4.** Chwyt kostki Rubika: a) zaplanowany – jakość  $\varrho = 0.520$ , b) wykonany  
**Fig. 4.** The Rubik's Cube grasp: a) planned – quality  $\varrho = 0.520$ , b) executed

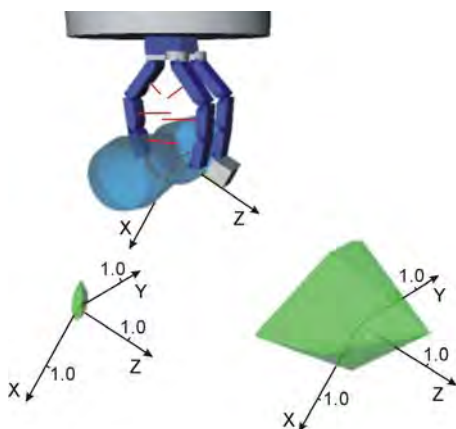


a)



b))

**Rys. 5.** Chwyt piłki tenisowej: a) zaplanowany – jakość  $\varrho = 0.411$ , b) wykonany  
**Fig. 5.** The tennis ball grasp: a) planned – quality  $\varrho = 0.411$ , b) executed



a)



b))

**Rys. 6.** Chwyt butelki: a) zaplanowany – jakość  $\varrho = 0.059$ , b) wykonany  
**Fig. 6.** The bottle grasp: a) planned – quality  $\varrho = 0.059$ , b) executed

17. Xue, Z., Kasper, A., Zoellner, J. M., Dillmann, R. (2009): *An automatic grasp planning system for service*

*robots*. In: 14th International Conference on Advanced Robotics.

18. Zieliński, C. (1999): *The MRROC++ System*. In: First Workshop on Robot Motion and Control (RoMoCo'99), pp. 147–152, Kiekrz, Polska.
19. Zieliński, C., Winiarski, T. (2010): *Motion Generation in the MRROC++ Robot Programming Framework*. International Journal of Robotics Research 29(4), 386–413. ■

## Multifingered gripper for a service robot – grasp planning

**Abstract:** The third part of the paper devoted to the construction, control and motion planning for a three fingered gripper, describes the method of planning grasps. Moreover, the results of experiments with grasping diverse objects using the designed multi-fingered gripper have been presented.

**Keywords:** multifingered gripper, grasp planning, robot control

### dr inż. Wojciech Szynkiewicz

Jest adiunktem na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej. W latach 1999-2003 był zastępcą dyrektora i sekretarzem rady naukowej Centrum Automatyki i Technik Decyzyjnych. Jego zainteresowania badawcze dotyczą problematyki planowania ruchu robotów mobilnych i manipulatorów, a także manipulacji robotów.

e-mail: W.Szynkiewicz@elka.pw.edu.pl



### mgr inż. Krzysztof Czajkowski

W 2010 roku ukończył Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej. Napisał pracę magisterską zatytułowaną: System planowania i realizacji chwytów zapomocą robotycznych rąk. W czasie studiów współpracował przy projektach badawczych prowadzonych przez Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej (IAiIS).

e-mail: k.czajkowski.1@gmail.com



### prof. nzw. dr hab. inż. Cezary Zieliński

Jest profesorem nadzwyczajnym Politechniki Warszawskiej na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych. W latach: 2002-2005 sprawował na tym wydziale funkcję prodziekana ds. nauki i współpracy międzynarodowej, 2005-2008 zastępcy dyrektora Instytutu Automatyki i Informatyki Stosowanej (IAiIS) ds. naukowych, a od 2008 pełni funkcję dyrektora tego instytutu. Od uzyskania habilitacji w roku 1996 pełni rolę kierownika Zespołu Robotyki w IAiIS. Od 2007 roku jest członkiem i sekretarzem Komitetu Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk. Od 2008 roku współpracuje z Przemysłowym Instytutem Automatyki i Pomiarów. Jego zainteresowania badawcze koncentrują



się na zagadnieniach związanych z programowaniem i sterowaniem robotów.

e-mail: c.zielinski@ia.pw.edu.pl

### dr inż. Tomasz Winiarski

Jest adiunktem w Instytucie Automatyki i Informatyki Stosowanej Politechniki Warszawskiej. Sprawuje funkcje kierownika laboratorium robotyki w macierzystym instytucie, a także opiekuna studenckiego koła naukowego Bionik, które współtworzył. W 2010 roku otrzymał za osiągnięcia naukowe nagrodę indywidualną drugiego stopnia rektora PW. Jego zainteresowania badawcze dotyczą z jednej strony konstrukcji i nawigacji robotów mobilnych z drugiej strony specyfikacji zadań manipulatorów i chwytaków ze szczególnym uwzględnieniem sterowania pozycyjno-siłowego.

e-mail: tmwiniarski@gmail.com



### dr inż. Krzysztof Mianowski

Jest adiunktem i nauczycielem akademickim w Zakładzie Teorii Maszyn i Robotów w Instytucie Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. Jest wynalazcą i konstruktorem wielu nowych rozwiązań manipulatorów robotów do badań laboratoryjnych, jak: robota RNT – Robota Nowego Typu o szeregowo równoległej strukturze ramienia i o dużej sztywności opracowanego we współpracy z dr inż. Kazimierzem Nazarczukiem, robota POLYCRANK – szybkiego robota o napędzie bezpośrednim i nieograniczonych obrotach w przegubach rozsprężonego dynamicznie opracowanego we współpracy z dr inż. Kazimierzem Nazarczukiem, lekkiego manipulatora o konstrukcji kompozytowej dla robota wspinającego Robug III opracowanego we współpracy z prof. Edwardem Jezierskim z Politechniki Łódzkiej, POLMAN – grupy manipulatorów równoległych o sześciu stopniach swobody i rozsprężonej kinematyce, platformy Stewarta o uproszczonej kinematyce do pomiarów kalibracyjnych, małego manipulatora do montażu na platformach mobilnych, robota RobIn Heart-2 do zastosowań kardiochirurgicznych opracowanego i wykonanego we współpracy z Fundacją Rozwoju Kardiochirurgii w Zabrze i wielu innych.

e-mail: kmianowski@meil.pw.edu.pl



### Konrad Banachowicz

Jest studentem Wydziału Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej oraz członkiem koła robotyki "Bionik", w ramach którego zajmuje się konstrukcją układów elektronicznych na potrzeby robotów. Współpracuje przy projektach badawczych prowadzonych przez Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej (IAiIS) Politechniki Warszawskiej.

e-mail: konradb3@gmail.com

