

KORELACJA MODELI MATEMATYCZNYCH PARAMETRÓW SENSORYCZNYCH ZE STRUKTURĄ KINEMATYCZNĄ MANIPULATORA TYPU RĘKA CZŁOWIEKA HAND-K3

Artur HANDKE*, Władysław TWARÓG*

*Zakład Teorii Maszyn i Układów Mechatronicznych, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska, ul. Łukasiewicza 7/9, 50-371 Wrocław

artur.handke@pwr.wroc.pl, wladyslaw.twarog@pwr.wroc.pl

Streszczenie: Praca dotyczy funkcyjnego powiązania zbioru modeli matematycznych sieci czujników nacisku rozmieszczonych w grupach na modułach palców manipulatora, z konfiguracją jego połączeń ruchowych w czasie. Opracowane modele matematyczne wyprowadzonych parametrów sensorycznych, w układzie współrzędnych ustalonego środka części dłoniowej manipulatora, posłużyły do przeprowadzania serii pomiarów i doświadczeń oraz wyznaczenia kluczowych kryteriów wykrytych przy optymalizacji struktur kinematycznych manipulatorów typu ręka człowieka. Celem pracy jest stworzenie zbioru funkcji i przekształceń znanych zależności z zakresu teorii manipulatorów, koniecznych do wyznaczenia reguł sterowania ruchem modułów palców prototypu manipulatora typu ręka człowieka HAND-K3 w kontakcie z badanymi obiektami.

1. WPROWADZENIE

Ludzka kończyna górna jest narzędziem manipulacyjnym o bardzo dużej ruchliwości palców, wynikającej ze złożonej i rozbudowanej struktury. Wyposażenie palców we własności mechaniczne i sensoryczne czyni ją nieocenionym manipulatorem.

W przedstawionej pracy podjęto kontynuację badań związanych z wieloparametryczną optymalizacją manipulatora typu ręka człowieka opartego na fizycznym modelu pięciopalczastej dłoni. Optymalizacja tego typu manipulatorów ma na celu przede wszystkim określenie optymalnej liczby czujników przypadających na określone stopnie swobody, rodzaj oraz liczby aktywnych połączeń ruchowych, pozwalających na wykonanie bardzo złożonych konfiguracji m. in. sferycznych.

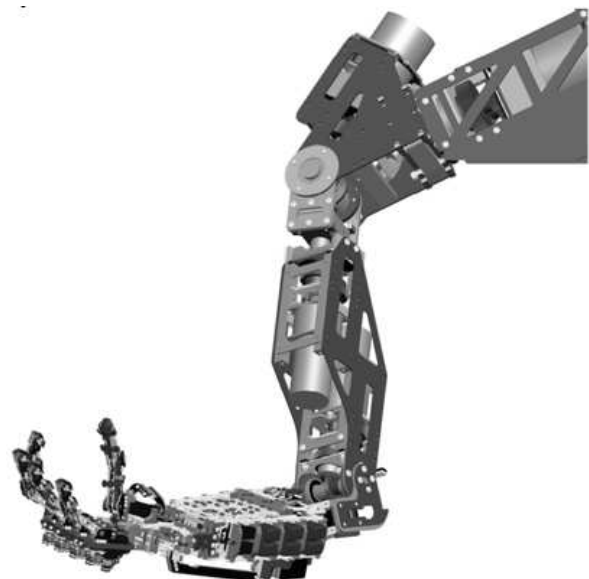
Zaprojektowany nowy prototyp manipulatora typu ręka człowieka jest zbliżony budową i ruchliwością do ludzkiej kończyny górnej.

Jego struktura kinematyczna składa się z 28 par obrotowych, z których wyróżnić można najliczniejszą grupę – stawy zginane w liczbie 15, po 3 na każdy moduł palca. Dodatkowo moduły wyposażone zostały w pojedynczy staw ruchu przywodzenia, a sprzężona rotacja śródręcza pozwala ustawiać palce w konfiguracji sferycznej (Morecki i Knapczyk, 1999). Ponadto staw nadgarstka posiada możliwość zginania oraz przywodzenia. W stawie łokciowym możliwe jest zginanie oraz rotacja wokół osi przedramienia. Ostatnie stopnie swobody w liczbie 3 znajdują się w stawie ramiennym.

Celem niniejszej pracy jest wyprowadzenie zależności wiążących – korelacji parametrów sensorycznych z przyjętym schematem kinematycznym przedmiotowego manipulatora HAND-K3, niezbędnych dla określenia kształtu chwytanego przedmiotu oraz siły nacisku palców na przedmiot. Zależności te powinny również umożliwić optymalizację liczby sensorów i określić miejsce ich mocowania.

1.1. Manipulator HAND-K3

Manipulator HAND-K3 obecnie jest obiektem prowadzonych badań nad optymalizacją struktur oraz własności sensorycznych tego typu manipulatorów, został zaprojektowany i wykonany na bazie wcześniejszej wersji z zachowaniem przyjętej koncepcji przenoszenia napędu (Handke i Krysztoforski, 2007). Obecna wersja została rozbudowana do pełnego ramienia odpowiadającego strukturą kinematyczną ludzkiej ręce od części dłoniowej aż do stawu barkowego, co pozwoliło na zwiększenie powtarzalności pomiarów, ponieważ pierwszy napęd stawu barkowego mógł zostać uznany za stały punkt odniesienia. Konstrukcja została ujednoczona pod względem technologii wykonania modelu fizycznego oraz zostały zmodyfikowane użyte źródła napędu. Model wirtualny manipulatora przedstawia Rys. 1.



Rys. 1. Wirtualny model prototypu manipulatora HAND-K3

1.2. Sieć sensoryczna

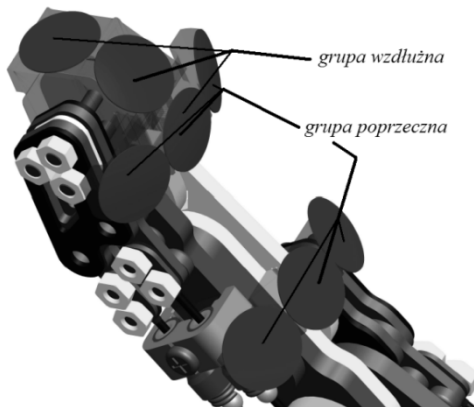
Najważniejszą modyfikacją w przedstawionej wersji manipulatora, jest obecność czujników nacisku, ułożonych w środkowych częściach każdego segmentu palca:

- trzy czujniki na segmencie pierwszym i środkowym;
- pięć czujników na segmencie ostatnim.

Zbiory tych sensorów tworzą zmodyfikowane matryce dotykowe (Heo, Chung, Lee, 2006).

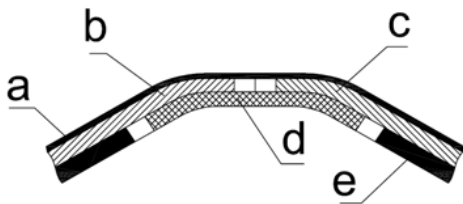
Do sieci sensorycznej manipulatora włączono również pięć czujników na powierzchni śródreżca, co sumarycznie daje 60 czujników nacisku.

Na Rys. 2 pokazano jak zostały zorientowane czujniki na środkowych oraz ostatnich segmentach każdego modułu palca.



Rys. 2. Układ czujników w grupie segmentu środkowego i dalszego modułu palca manipulatora

Ustawienie czujników na skośnie-bocznych płaszczyznach segmentu pozwala dokładniej odczytać kształt chwytanych przedmiotów oraz zabezpiecza układ mechaniczny przed niepożądaną kolizją poszczególnych elementów. Na rys. 3 pokazano uproszczony schemat rozmieszczenia czujników w płaszczyźnie poprzecznej dowolnego segmentu ruchowego modułu palca.



Rys. 3. Schemat rozmieszczenia czujników w płaszczyźnie poprzecznej segmentu ruchowego (a) powłoka kontaktowa, b),c) czujniki boczne, d) czujnik środkowy, e) podstawa grupy sensorycznej)

2. MODELE MATEMATYCZNE SIECI SENSORYCZNEJ UWZGLĘDNIAJĄCE STRUKTURĘ KINEMATYCZNĄ PROTOTYPU MANIPULATORA

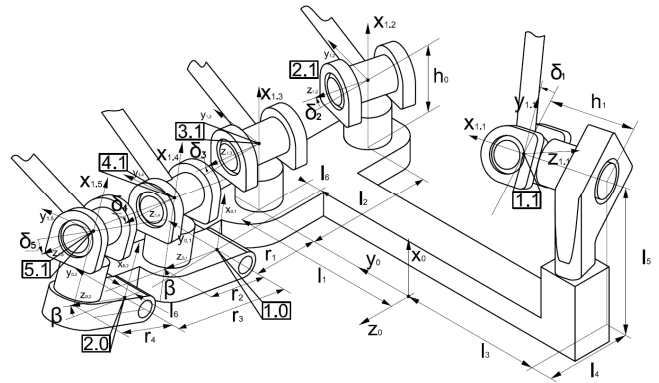
Do modeli opisujących powiązanie informacji pochodzących z sieci sensorycznej, istotnych dla określenia me-

tody optymalizacji manipulatorów typu ręka człowieka, należą:

- model oceniający kształt chwytanego obiektu;
- model umożliwiających detekcję poślizgu poprzecznego;
- model oceniający podatność chwytanego obiektu;
- model określający stopień uchwycenia obiektu danym palcem.

2.1. Określenie kształtu chwytanego przedmiotu

W celu wygenerowania przestrzeni zarejestrowanych miejsc kontaktu części chwytanych prototypu manipulatora z utrzymywanym obiektem, konieczne jest znalezienie funkcyjnej zależności pomiędzy współrzędnymi czujników względem globalnego układu współrzędnych środka modułu śródreżca (układ 0 na Rys. 4), a danymi zebranymi z sieci sensorycznej. Dlatego też, stworzono macierz wyrażającą wektory przemieszczeń czujników w przyjętym globalnym układzie współrzędnych.



Rys. 4. Pozycje stawów rotacji modułu śródreżca i przywodzenia modułów palców

Wykorzystując fakt dużego podobieństwa w strukturze kinematycznej każdego palca manipulatora, główną macierz (1) tworzą macierz przejścia z układu globalnego do układu znajdującego się w osi zginania stawu bliższego danego palca oraz macierz przejścia od tej osi do danego czujnika

$$T_{i,j,k} = A_{i,1} A_{i,j,k,i,1} = A_{i,1} \begin{bmatrix} B_{i,j,k,i,1} & P_{i,j,k,i,1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

gdzie: k – numer czujnika, j – numer segmentu palca, i – numer modułu palca

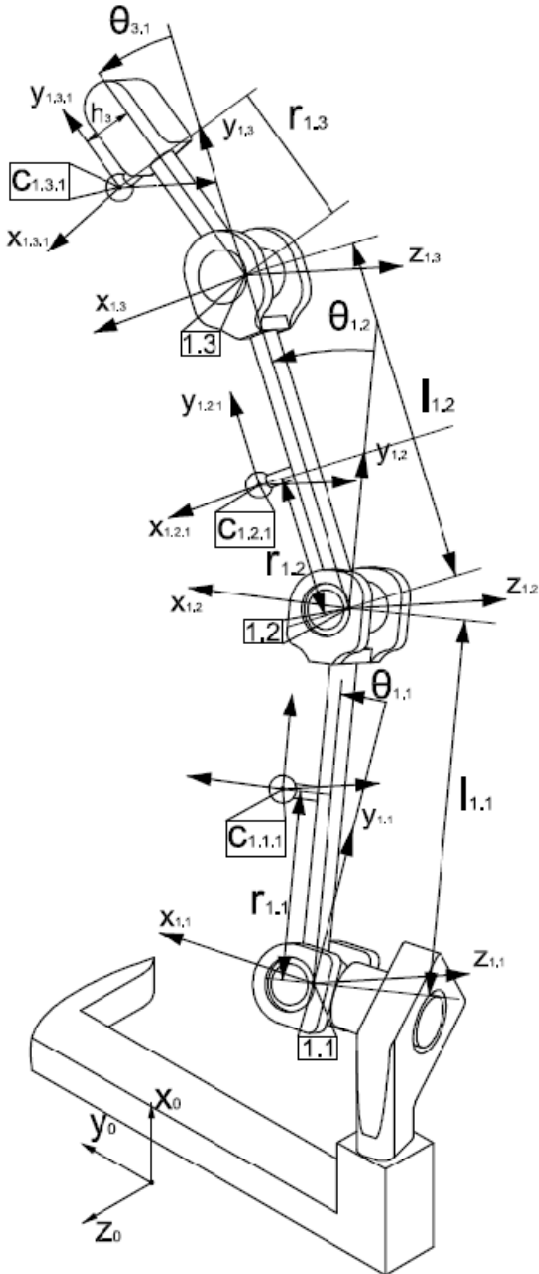
W związku z tym, iż istotne są jedynie współrzędne punktów jakimi są miejsca styku czujnika z powierzchnią chwytanego przedmiotu, odrzucone zostały elementy określające orientację kątową układu współrzędnych położenia danego czujnika.

Biorąc jedynie pod uwagę wektor pozycji $p_{i,j,k,i,1}$ względem układu osi przywodzenia każdego modułu palca, można jednoznacznie określić poszukiwane współrzędne czujników zawarte w wektorze (2).

$$\begin{bmatrix} c_{i.1.k} \\ 1 \end{bmatrix} = A_{i.1} \begin{bmatrix} p_{i.1.k,i.1} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

gdzie $p_{i.1.k,i.1}$ - wektor pozycji czujnika k segmentu 1 względem stawu bliższego modułu palca i

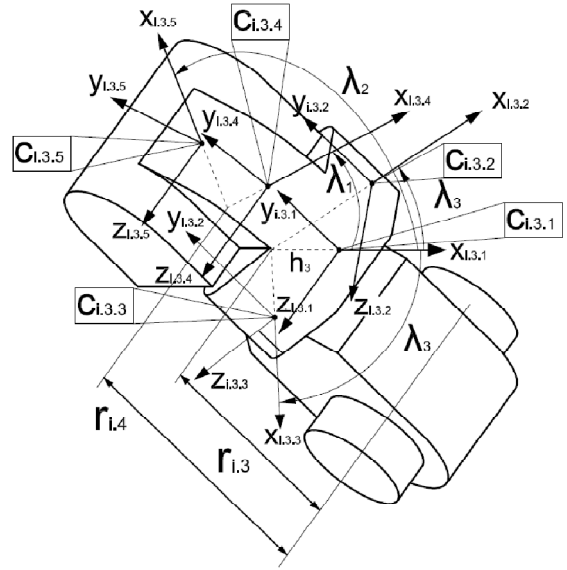
Wykorzystując macierze przekształceń jednorodnych dotyczących przesunięć i obrotów oraz współrzędne Denavit-Hartenberga (Morecki i Knapczyk, 1999), znaleziono potrzebne macierze przejścia z układu globalnego do układu osi przywodzenia – macierze $A_{i.1}$.



Rys. 5. Pozycje $\theta_{1,j}$ stawów zginanych modułu pierwszego palca

Ponieważ dla każdego czujnika poszukiwany jest jedynie jego wektor pozycji, z tego względu macierz przejścia z układu osi przywodzenia do pozycji danego czujnika, otrzymana jest przez połączenie macierzy jednorodnych przesunięć i obrotów względem osi stawów zginanych

(kąty θ_{ij}) z wektorami pozycji danego czujnika względem ostatniego stawu przed daną grupą czujników.



Rys. 6. Pozycje czujników i.3.1÷i.3.5

Na Rys. 5 i 6 przedstawiono rozłożenie układów współrzędnych określających położenie czujników w danych segmentach.

Wyznaczając wektory pozycji czujników segmentu pierwszego i -tego modułu palca (i.1.1÷i.1.3) wykorzystano zależności (2, 3).

$$C_{i.j.2} \xrightarrow{s(\lambda_3) \rightarrow -s(\lambda_3)} C_{i.j.3} \quad (3)$$

Wektor pozycji dla czujnika $i.j.3$ otrzymano z wektora $C_{i.j.2}$ przy wykorzystaniu nieparzystości funkcji sinusa kąta λ_3 (Rys. 6, wzór 3).

Na tej podstawie wyznaczono wektory pozycji czujników pierwszego segmentu dla piątego modułu palca.

$$c_{5.1.1} = \begin{bmatrix} c2\beta d_{5.1.1} + a_{5.1}d_{5.1.2} + A_1 \\ c\delta_5 d_{5.1.2} + l_1 - 2l_6 \\ a_{5.3}d_{5.1.2} - s2\beta d_{5.1.1} + A_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$A_1 = h_0 c2\beta + r_4 s2\beta + r_3 s\beta,$$

$$A_2 = -h_0 s2\beta + r_4 c2\beta + r_3 c\beta + r_1,$$

gdzie: $a_{i.1} = s2\beta s\delta_i,$
 $a_{i.2} = s2\beta c\delta_i,$
 $a_{i.3} = c2\beta s\delta_i,$
 $a_{i.4} = c2\beta c\delta_i,$
 $d_{i,j.1} = h_3 c\theta_{i,j} + r_{i,j} s\theta_{i,j},$
 $d_{i,j.2} = r_{i,j} c\theta_{i,j} - h_3 s\theta_{i,j}$

$$c_{5.1.2} = \begin{bmatrix} c2\beta d_{5.1.4} + a_{5.1}d_{5.1.3} + a_{5.2}A_3 + A_1 \\ c\delta_5 d_{5.1.3} - s\delta_5 A_3 + l_1 - 2l_6 \\ -s2\beta d_{5.1.4} + a_{5.3}d_{5.1.3} + a_{5.4}A_3 + A_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

gdzie: $A_3 = h_3 s\lambda_3,$
 $d_{i,j.3} = r_{i,j} c\theta_{i,j} - h_3 s\theta_{i,j} c\lambda_3,$
 $d_{i,j.4} = h_3 c\theta_{i,j} c\lambda_3 + r_{i,j} s\theta_{i,j}$

$$\begin{bmatrix} c_{i,2,k} \\ 1 \end{bmatrix} = A_{i,1} A_{i,2,i,1} \begin{bmatrix} p_{i,2,k,i,2} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} c_{i,3,k} \\ 1 \end{bmatrix} = A_{i,1} A_{i,2,i,1} A_{i,3,i,2} \begin{bmatrix} p_{i,3,k,i,3} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

W przypadku segmentu drugiego oraz trzeciego konieczne jest uwzględnienie macierzy przejścia $A_{i,2,i,1}$ z osi pierwszego stawu zginanego do osi stawu poprzedzającego wybrany segment – wzór (6,7).

Przykładowa postać wektorów pozycji czujników segmentu drugiego dla piątego modułu palca określają wzory poniżej.

$$c_{5,2,1} = \begin{bmatrix} b_{5,1,4} c_{5,2} + a_{5,1} e_{5,1} - b_{5,1,3} d_{5,2} + A_1 \\ c \delta_5 e_{5,1} + l_1 - 2l_6 \\ b_{5,1,1} d_{5,2} + a_{5,3} e_{5,1} - b_{5,1,2} c_{5,2} + A_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$b_{i,j,1} = s2\beta s\theta_{i,j},$$

gdzie: $b_{i,j,2} = s2\beta c\theta_{i,j},$

$$b_{i,j,3} = c2\beta s\theta_{i,j},$$

$$b_{i,j,4} = c2\beta c\theta_{i,j}$$

$$e_{i,1} = h_5 (s\theta_{i,1} - \theta_{i,2}) + r_{i,2} c(\theta_{i,1} - \theta_{i,2}) + l_{i,1}$$

$$c_{5,2,2} = \begin{bmatrix} a_{5,1} e_{5,2} + b_{5,1,4} d_{5,2,4} - b_{5,1,3} d_{5,2,3} + A_3 a_{5,2} + A_1 \\ c \delta_5 e_{5,2} - A_3 s \delta_5 + l_1 - 2l_6 \\ a_{5,3} e_{5,2} - b_{5,1,2} d_{5,2,4} + b_{5,1,1} d_{5,2,3} + A_3 a_{5,4} + A_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

gdzie: $e_{i,2} = h_5 c \lambda_3 s(\theta_{i,1} - \theta_{i,2}) + r_{i,2} c(\theta_{i,1} - \theta_{i,2}) + l_{i,1}$

Segment ostatni w odróżnieniu od poprzedzających go, posiada pięć czujników rozmieszczonych w dwóch płaszczyznach, ale podobnie jak w przypadku drugiego i trzeciego czujnika opisanych już segmentów, czujniki z grup 3.4 i 3.5 podobnie jak czujniki z grup 3.2 i 3.3, różnią się jedynie jednym parametrem λ_1, λ_2 (11).

$$c_{(3,4)} \xrightarrow{\lambda_1 \rightarrow \lambda_2} c_{(3,5)} \quad (10)$$

Postać wektora pozycji czujnika z pierwszej grupy trzeciego segmentu i -tego modułu palca określa zależność (11).

$$c_{5,3,1} = \begin{bmatrix} c2\beta f_{5,1} + a_{5,1} f_{5,2} + g_{5,1} l_{5,2} + A_1 \\ c \delta_5 (f_{5,2} + c\theta_{5,1} l_{5,2}) + l_1 - 2l_6 \\ -s2\beta f_{5,1} + a_{5,3} f_{5,2} + g_{5,2} l_{5,2} + A_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

gdzie: $f_{i,1} = h_3 c(\theta_{i,1} + \theta_{i,2} - \theta_{i,3}) - r_{i,3} s(\theta_{i,1} + \theta_{i,2} - \theta_{i,3}),$
 $f_{i,2} = h_3 s(\theta_{i,1} + \theta_{i,2} - \theta_{i,3}) + r_{i,3} c(\theta_{i,1} + \theta_{i,2} - \theta_{i,3}) + l_{i,1},$
 $g_{i,1} = s2\beta s \delta_c \theta_{i,1} - c2\beta s \theta_{i,1},$
 $g_{i,2} = s2\beta s \theta_{i,1} + c2\beta s \delta_c \theta_{i,1}$

Postać pozostałych wektorów pozycji czujników trzeciego segmentu dla piątego modułu palca określają wzory (12),(13).

$$c_{5,3,2} = \begin{bmatrix} -c2\beta f_{5,4} + a_{5,1} f_{5,3} + g_{5,1} l_{5,2} + A_3 a_{5,2} + A_1 \\ c \delta_5 (f_{5,3} + c\theta_{5,1} l_{5,2}) - s \delta_5 A_3 + l_1 - 2l_6 \\ s2\beta f_{5,4} + a_{5,3} f_{5,3} + g_{5,2} l_{5,2} + A_3 a_{5,4} + A_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

gdzie: $f_{i,3} = h_3 c \lambda_3 s(\theta_{i,1} + \theta_{i,2} - \theta_{i,3}) + r_{i,3} c(\theta_{i,1} + \theta_{i,2} - \theta_{i,3}) + l_{i,1},$
 $f_{i,4} = r_{i,3} s(\theta_{i,1} + \theta_{i,2} - \theta_{i,3}) - h_3 c \lambda_3 c(\theta_{i,1} + \theta_{i,2} - \theta_{i,3})$

$$c_{5,3,4} = \begin{bmatrix} c2\beta h_{5,2} + a_{5,1} h_{5,1} + g_{5,1} l_{5,2} + A_1 \\ c \delta_5 h_{5,1} + c\theta_{5,1} l_{5,2} + l_1 - 2l_6 \\ s2\beta h_{5,2} + a_{5,1} h_{5,1} + g_{5,2} l_{5,2} + A_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

gdzie: $h_{i,1} = h_3 s(\theta_{i,1} + \theta_{i,2} - \theta_{i,3} + \lambda_2) + r_{i,4} c(\theta_{i,1} + \theta_{i,2} - c\theta_{i,3}) + l_{i,1},$
 $h_{i,2} = r_{i,4} s(\theta_{i,1} + \theta_{i,2} - \theta_{i,3}) - h_3 c(\theta_{i,1} + \theta_{i,2} - \theta_{i,3} + \lambda_2)$

Posiadając zależne w czasie informacje o zarejestrowanych kolizjach grup czujników z powierzchnią obiektu oraz ich pozycję w przyjętym globalnym układzie współrzędnych, można utworzyć przestrzenną siatkę reprezentującą miejsca styku segmentów modułów palców z chwytanym przedmiotem. Porównując zebrane informacje z określonym kształtem przedmiotów z grupy kontrolnej, zostanie ustalone kryterium oceniające stopień określenia kształtu dla zarejestrowanej grupy aktywnych czujników.

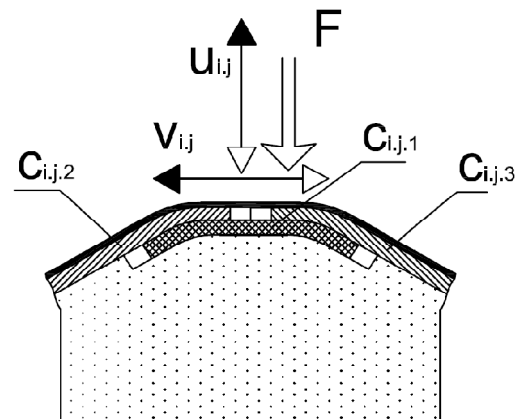
2.2. Detekcja poślizgu poprzecznego w module palca

Ocena poślizgu poprzecznego na powierzchni kontaktowej poszczególnych modułów palca manipulatora jest konieczna ze względu na potrzebę określenia skuteczności uchwycenia obiektu przez i -ty palec. W oparciu o rozmieszczenie w płaszczyźnie czołowej j -tego segmentu ruchowego czujników z grup $j.1 \div j.3$ (Rys. 7), przyjęto kierunek v propagacji punktowego kontaktu segmentu z obiektem podczas trwania poślizgu poprzecznego.

$$f_{i,j,k} = H(F_{i,j,k} - F_0) \cdot F_{i,j,k} \quad (14)$$

gdzie: h - funkcja skokowa Heaviside'a

W celu określenia zwrotu poślizgu wprowadzona została funkcja $f_{i,j,k}$ (14) odwzorowująca odczytaną wartość z danego czujnika, uwzględniając wartość progową siły F_0 w funkcji skoku jednostkowego, umożliwiając tym samym określenie czułości układu pomiarowego.



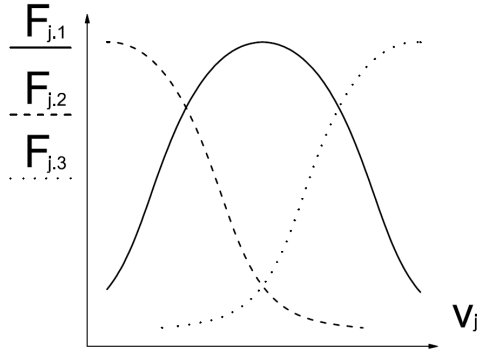
Rys. 7. Schemat modelu poślizgu poprzecznego

Następnie uwzględniając charakterystykę zmian wielkości mierzonej na czujniku w stosunku do siły nacisku, utworzono przybliżone przebiegi zmian odczytów z sensorów względem propagacji punktu nacisku (Rys. 8). Prze-

biegi te odzwierciedlają rozłożenie czujników w grupie poprzecznej – ułożenie zakładkowe.

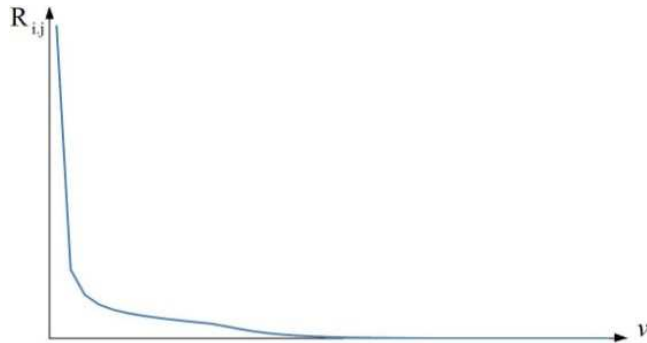
$$R_{i,j} = \left(\frac{f_1 f_2}{f_3} \right)_{ij} \quad (15)$$

Na ich podstawie możliwa była synteza zebranych informacji podczas akwizycji danych z grupy sensorów danego segmentu, określona według zależności (15).



Rys. 8. Przybliżone przebiegi odczytanych wartości sił z czujników $c_{i,j,1} \div c_{i,j,3}$ mierzone w kierunku przemieszczenia v

Przedstawiony na Rys. 9 przebieg obrazuje wyznaczoną zależność (15). Charakterystyka jest malejąca dla dodatniego zwrotu propagacji punktu nacisku przyjętego w kolejności od czujnika $c_{i,j,2}$ do $c_{i,j,3}$ (Rys. 7).



Rys. 9. Przebieg parametru $R_{i,j}$ w funkcji przemieszczenia v

W oparciu o przebieg z rysunku 9, utworzono zależność wyznaczającą współczynnik κ_{v_i} (16), którego wartość stanowi średnia zmian parametru $R_{i,j}$ dla wszystkich segmentów ruchowych każdego palca.

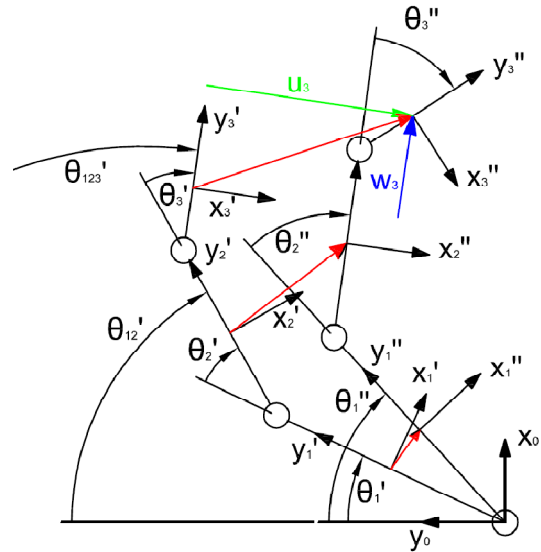
$$\kappa_{v_i} = \sum_{j=1}^3 \frac{[2H(\Delta R_{i,j}) - 1]}{3} \quad (16)$$

Poprzez zmodyfikowanie funkcji skoku jednostkowego, zmiany parametru $R_{i,j}$ mogą przyjąć wartości całkowite ze zbioru $\{-1;0;1\}$, dzięki czemu względem znaku współczynnika κ_{v_i} (17) można stwierdzić wystąpienie oraz zwrot poślizgu na danym module palca.

$$\kappa_{v_i} = \begin{cases} > 0 \Rightarrow v \rightarrow \\ < 0 \Rightarrow v \leftarrow \\ = 0 \Rightarrow v = 0 \end{cases} \quad (17)$$

2.3. Wyznaczenie podatności chwytanego przedmiotu

Podatność chwytanego obiektu można określić podczas śledzenia zmian mierzonej siły na czujnikach z grupy $c_{i,j,1}$ względem przemieszczenia w kierunku u , prostopadłym do powierzchni czujnika środkowego z danego segmentu palca (Rys. 10).



Rys. 10. Schemat modułu i palca w chwili $t_1(\cdot)$ i $t_2(\cdot)$

Do wyznaczenia kierunku przemieszczenia $u_{i,j}$ konieczne jest utworzenie macierzy przejścia z układu $i,j(t_2)$ do $i,j(t_1)$, gdyż przemieszczenie jest różnicą między pozycją w kierunku x w układzie pierwszego czujnika danego j -tego segmentu w czasie t_1 , a pozycją wynikającą z ruchu połączeń modułu palca po ustalonym odstępnie czasu $dt = t_2 - t_1$.

Korzystając z macierzy przekształceń jednorodnych (18) otrzymano zależności pozwalające wyznaczyć przemieszczenie w kierunku u dla każdego z 3 segmentów ruchowych modułu palca (19).

$$A_{1(t_2),1(t_1)} = A_{0,1(t_1)} A_{1(t_2),0} = B_{1(t_2),1(t_1)} \begin{bmatrix} u_{1(t_2),1(t_1)} \\ w_{1(t_2),1(t_1)} \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$A_{2(t_2),2(t_1)} = A_{1(t_1),2(t_1)} A_{1(t_2),1(t_1)} A_{2(t_2),1(t_2)} = B_{2(t_2),2(t_1)} \begin{bmatrix} u_{2(t_2),2(t_1)} \\ w_{2(t_2),2(t_1)} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$A_{3(t_2),3(t_1)} = A_{2(t_1),3(t_1)} A_{2(t_2),2(t_1)} A_{3(t_2),2(t_2)} = B_{3(t_2),3(t_1)} \begin{bmatrix} u_{3(t_2),3(t_1)} \\ w_{3(t_2),3(t_1)} \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 u_1 &= -l_{i,01}s(\Delta\theta_1) \\
 u_2 &= -l_{i,02}s(\Delta\theta_{12}) - l_1s(\theta'_2 + \Delta\theta_1) + l_1s\theta'_2 \\
 u_3 &= -l_{i,03}s(\Delta\theta_{123}) - l_2s(\theta'_3 + \Delta\theta_{12}) + \\
 & - l_1s(\theta'_{23} + \Delta\theta_1) + l_1s\theta'_{23} + l_2s\theta'_3
 \end{aligned} \tag{19}$$

gdzie: $\theta'_j - \theta''_j = \Delta\theta_j$,
 $\theta'_j = \theta_j(t_1), \theta''_j = \theta_j(t_2)$

Poprzez informację zawartą w przemieszczeniu i zmianach w zebranych sygnałach czujników z grupy 1, możliwe jest ocenienie w czasie, czy w danym segmencie nastąpiła kolizja z przedmiotem. Dopiero od momentu zetknięcia określonej grupy czujników z obiektem można oszacować podatność obiektu w obszarze kontaktu z modułem palca manipulatora. Czas, w którym następuje kolizja, jest informacją pozwalającą zmienić częstotliwość próbkowania podczas generowania sygnałów sterujących napędami modułu palca i liczby odczytanych danych z sieci sensorycznej. Jeżeli spełniony jest warunek (20), obiekt zostanie uznany za podatny, w sytuacji odwrotnej gdy zachodzi zależność (21), dany obiekt można uznać za niepodatny.

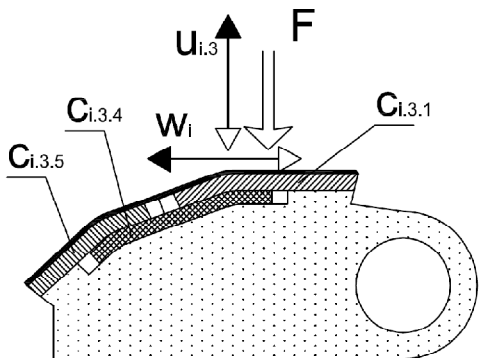
$$\Delta F_{i,j,1} \xrightarrow{u_{i,j,1} > 0} 0 \tag{20}$$

$$u_{i,j,1} \xrightarrow{\Delta F_{i,j,1} > 0} 0 \tag{21}$$

Informacja ta jest kluczowa dla kryterium zdolności chwytanych manipulatora. Liczba aktywowanych czujników w wyniku kontaktu z obiektem, jest istotną informacją użytą podczas podejmowania decyzji o zatrzymaniu bądź poruszeniu danym segmentem modułu palca.

2.4. Stopień uchwycenia obiektu przez palec manipulatora

Sytuacja dotycząca uchwycenia obiektu, wymaga określenia relacji pomiędzy propagacją punktu nacisku na trzecim segmencie każdego modułu palca, a przemieszczeniem w , którego dodatni zwrot ustalono zgodnie z ustawieniem czujników $c_{i,3,1} - c_{i,3,5}$ (Rys. 11).



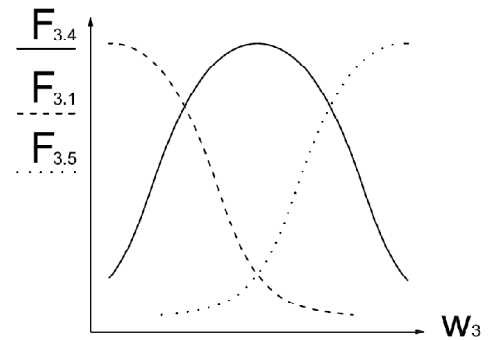
Rys. 11. Schemat modelu poślizgu wzdłużnego – wysunięcia

Korzystając z zależności (21) i postępując analogicznie jak w przypadku parametru R_{ij} , wyznaczono zależność określającą parametr P_i (22), w sposób pozwalający na uzyskanie przebiegu malejącego jak na Rys. 9, przy założeniu dodatniego kierunku propagacji punktu nacisku ostatniego segmentu na obiekt, zgodnie z kierunkiem w_3 na Rys. 11.

$$P_i = \left(\frac{f_1 f_4}{f_5} \right)_{ij} \tag{22}$$

Podobnie jak w przypadku poślizgu poprzecznego, wyznaczony został współczynnik κ_{w_i} (23), dla każdego modułu i -tego palca, korzystając ze zmodyfikowanej funkcji skoku jednostkowego.

$$\kappa_{w_i} = 2H(\Delta P_{i,j}) - 1 \tag{23}$$



Rys. 12. Przybliżone przebiegi odczytanych wartości sił z czujników $c_{i,3,1}; c_{i,3,4}; c_{i,3,5}$ mierzone w kierunku przemieszczenia w .

Korzystając z macierzy (18), określono przemieszczenia w_i (24) względem układu współrzędnych, zgodnie z kierunkiem propagacji punktu nacisku ostatniego segmentu na chwytany obiekt.

$$\begin{aligned}
 w_1 &= l_{i,01}c(\Delta\theta_1) - l_{i,01} \\
 w_2 &= l_{i,02}c(\Delta\theta_{12}) + l_1c(\theta'_2 + \Delta\theta_1) - l_1c\theta'_2 - l_{i,02} \\
 w_3 &= l_{i,03}c(\Delta\theta_{123}) + l_2c(\theta'_3 + \Delta\theta_{12}) + l_1c(\theta'_{23} + \Delta\theta_1) + \\
 & - l_1c\theta'_{23} - l_2c\theta'_3 - l_{i,03}
 \end{aligned} \tag{24}$$

$$\kappa_{w_i} = \begin{cases} 1 \Rightarrow \text{wysunięcie} \\ 0 \Rightarrow \text{utrzymanie} \\ -1 \Rightarrow \text{wsunięcie} \end{cases} \tag{25}$$

Bazując na współczynniku κ_{w_i} przy znanym przemieszczeniu grupy czujników $w_{i,3}$ danego palca, względem ustawienia połączeń ruchowych, możliwe jest ustalenie kryterium stopnia uchwycenia przedmiotu. Opierając się na wartościach wyznaczonego współczynnika κ_{w_i} (25), możliwe jest określenie stopnia utrzymania w uchwycie manipulatora, danego przedmiotu, a dodatkowy fakt zarejestrowanego wysuwania się przedmiotu względem ostatniego segmentu modułu palca, jest istotną informacją wykorzystaną w sterowaniu pozycjami połączeń ruchowych.

3. PODSUMOWANIE MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA KORELACJI MODELU SIECI SENSORYCZNEJ ZE STRUKTURĄ MANIPULATORA HAND-K3

Na podstawie przyjętych modeli matematycznych, opisujących cztery wyszczególnione parametry, dotyczące interakcji części chwytanych manipulatora z obiektem, zostanie przeprowadzona seria eksperymentów. Opierając się na uzyskanych wynikach zostanie ustalona metoda optymalizacji określonego typu manipulatorów względem przyjętych kryteriów optymalizacji. Wynikiem przedstawionej pracy będzie możliwość ustalenia faktycznej liczby czynnych, niesprężonych ruchów modułów palców, jak i liczby oraz rozmieszczenia elementów sensorycznych, na powierzchni segmentów ruchowych. Kryteria przeprowadzonej optymalizacji bazują w głównej mierze na wyznaczonych relacjach pomiędzy modelami sieci sensorycznej, a przyjętą strukturą kinematyczną badanej grupy manipulatorów.

W oparciu o modele poślizgu poprzecznego i wzdłużnego, czyli detekcji wysunięcia obiektu względem ostatniego segmentu, zostanie zmodyfikowana implementacja algorytmów sterujących pracą napędów w prototypie manipulatora, zapewniając w ten sposób stabilną manipulację chwytanego przedmiotu. Dodatkową zaletą wynikającą z zastosowania zwykłych czujników nacisku, jest eliminacja konieczności stosowania modułowych czujników poślizgu (Cotton i inni, 2008).

Bazując z kolei na modelu określającym podatność obiektu w obszarze kontaktu z danym segmentem palca, możliwe jest wprowadzenie dodatkowego zabezpieczenia układu mechanicznego przed niepożądanym uszkodzeniem, wynikającym z przekroczenia doraźnej wytrzymałości elementów przekazujących napęd. Informacja dotycząca podatności chwytanego przedmiotu jest warunkiem decydującym o wyborze sekwencji aktywujących poszczególne połączenia ruchowe.

Przy znanej pozycji każdego z czujników w danej chwili czasu, możliwe jest uzyskanie wystarczającej informacji do zamodelowania percepcji dotyku, a następnie określenie przybliżonego kształtu chwytanego obiektu.

Dla spełnionego minimum aktywnych punktów kontaktu segmentów modułów palców manipulatora, względem których obiekt nie zmienia pozycji, możliwe jest dalsze rozwinięcie opracowywanej metody optymalizacji manipulatorów typu ręka człowieka, dotyczącej sposobów zadawania pozycji połączeń ruchowych modułów palców.

Wszystkie modele sieci sensorycznej tego prototypu, usprawniają sterowanie manipulatorem w układzie za-

mkniętym, pozwalając przede wszystkim na pominięcie dokładności pozycjonowania źródeł napędu.

Wynikiem ostatecznym omawianej optymalizacji jest minimalizacja ilości sygnałów bądź komend sterujących, pochodzących z elementu zadającego położenie do sterowników napędów manipulatora, przy ustalonych kryteriach optymalizacji. Możliwe staje się również zrealizowanie niezależnego sterowania każdym modułem palca bądź w wydzielonych grupach modułów w układzie równoległym (Liu i inni, 2007).

LITERATURA

1. Cotton D. P.J., Chappell P.H., Cranny A., White N.M., Beeby S.P.. (2008) *A novel thick-film piezoelectric slip sensor for a prosthetic hand*, Sensors-01390
2. Handke A., Krysztoforski K. (2007), *Koncepcja współczesnego biomanipulatora typu ręka człowieka, XIV Konferencja Biomechaniki i Inżynierii Biomedycznej*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2007
3. Handke A., Krysztoforski K., Będziński R. (2008), *Problematyka i optymalizacja współczesnych manipulatorów typu ręka człowieka, Roboty medyczne*, Zabrze.
4. Heo J., Chung J., Lee J. (2006), *Tactile sensor arrays using fiber Bragg grating sensors*, *Sensors and Actuators A* 126, 312–327
5. Liu H., Meusel P., Seitz N., Willberg B., Hirzinger G., Jin M.H., Liu Y.W., Wei R., Xie Z.W., (2007), *The modular multisensory DLR-HIT-Hand*, *Mechanism and Machine Theory*, 42, 612–625.
6. Morecki A., Knapczyk J. (1999), *Podstawy Robotyki Teoria i elementy manipulatorów i robotów*, WNT Warszawa, 54-63.

CORRELATION OF THE SENSORY PARAMETERS' MATHEMATIC MODELS WITH THE KINEMATIC STRUCTURE OF THE HAND-K3 HAND TYPE MANIPULATOR

Abstract: This paper refers to functional connection of set of mathematical models of tactile sensor array disposed in groups of each finger phalanx in the prototype manipulator with the configuration of its motor connections in time. Correlation of previously elaborated mathematic model of the sensor array in metacarpus's coordinate system of the manipulator's hand served for conducting series of experiments, measurements and establishing key criteria used in the optimizing process of the hand type manipulator's kinematic structure. The main goal of this work is to generate a set of functions and transformations common in the theory of manipulator's, essential in designating rules in controlling the movement of finger modules in the HAND-K3 hand type manipulator prototype in interaction with examined objects.