

dr inż. Ryszard Leniowski
Politechnika Rzeszowska

AKTYWNE MODYFIKOWANIE ELASTYCZNOŚCI RAMION LEKKICH ROBOTÓW

Lekkie roboty (LWR) są nową generacją urządzeń przeznaczonych do zastosowań przemysłowych, które zaprojektowano tak mogły wykonywać czynności w otoczeniu człowieka. Z powodu zredukowanej masy ramion są podatne na deformacje oraz charakteryzują się złożonym modelem dynamiki, co w konsekwencji zmusza do stosowania złożonych układów sterowania. Praca prezentuje częściowe wyniki prowadzonych badań dotyczących sterowania LWR. Opisywane są trzy metody kontrolowania sztywności ramion traktowanych jako powłoki. Wyniki badań symulacyjne ramienia wykonującego trzy ruchy obrotowe są obiecujące w kontekście przyszłych zastosowań.

ACTIVE CONTROL OF THE LIGHT-WEIGHT ROBOT ARMS ELASTICITY

Light-weight robots (LWR) are a new generation of industrial appliances that was designed to operate in an unknown environment with humans. Due to reduced mass such construction might to achieve a higher elasticity in the arms and a more complex dynamic behaviour, which requires advanced control techniques in order to obtain good performances and a high accuracy. This paper presents on-going research on active control of LWR arms elasticity. The three different approaches are described and tested for 3D single robot arm, which is interpreted as a cylindrical shell. Simulation results show that the proposed concepts are promising for future applications.

1. WSTĘP

Klasyczne roboty przemysłowe (RP) projektowane są jako urządzenia, które mają wykonywać powtarzalne czynności z zakładaną (dużą) dokładnością i działać w ściśle określonym środowisku, a jakakolwiek bezpośrednia współpraca z człowiekiem jest z reguły wykluczona. Dużą dokładność działania osiąga się poprzez wysoką sztywność konstrukcji, co z kolei wiąże się ze znaczną masą ramion i stosunkowo niskim współczynnikiem udźwigu (ok. 0,1) mierzonym jako stosunek masy przenoszonego ładunku do masy własnej robota. Konstrukcje te bardzo często również charakteryzują się dużym zużyciem energii. Lekkie roboty LWR są efektem dążenia do osiągnięcia dwóch początkowo niezależnych celów:

- zwiększania współczynnika udźwigu – przy zachowaniu dużej dokładności pozycjonowania
- wykonywania pracy w otoczeniu człowieka.

Realizacja obu celów powiązania jest silnie z minimalizacją masy robota (szczególnie części ruchomych) oraz wprowadzeniem takiego systemu sterowania, który zapewni bezpie-

czeństwo w sytuacjach kontaktu robota z człowiekiem. Tak nowatorskie podejście otwiera jednocześnie zupełnie nowe perspektywy zastosowań lekkich robotów. Jedną z nich jest wypełnianie roli osobistego asystenta człowieka - funkcji rozumianej bardzo szeroko i polegającej na przykład na współuczestniczeniu w operacji chirurgicznej, wspomaganie ćwiczeń rehabilitacyjnych czy wypełnianiu roli pielęgniarza-opiekuna. Ponieważ lekkie roboty zużywają znacznie mniej energii, mogą tworzyć struktury redundantne oraz struktury szeregowo-równoległe, będą mogły również spełniać funkcje protez kończyn o rozbudowanych funkcjach czucia – prototypowe konstrukcje są już obecnie budowane i testowane (KUKA LWR, Amtec ULWR, Mitsubishi PA-10).

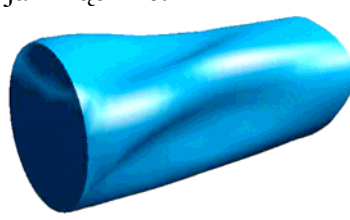
Konstruowanie urządzeń o tak zawansowanych funkcjach wymaga jednak rozwiązania wielu trudnych problemów o charakterze podstawowym i technologicznym oraz zastosowania nowego podejścia do projektowania. Problemem podstawowym jest sterowanie, które obejmuje zagadnienia zarówno stabilizacji położenia ramion jak również tłumienia wibracji lekkiej konstrukcji [1]. Do procesu sterowania należy także włączyć zadania aktywnego modyfikowania sztywności ramion oraz wykrywania kolizji wraz z rozpoznawaniem jej cech. Problemy te, mające istotny wpływ na dokładność pracy robota oraz na bezpieczeństwo pracujących z nim ludzi, od niedawna są szczegółowo analizowane [2]. W niniejszej pracy zostaną przedstawione wybrane zagadnienia z tego zakresu, obejmujące głównie aktywną modyfikację sztywności ramion LWR. Poniżej zaproponowano dwie metody rozwiązania tego problemu, które mogą się wzajemnie uzupełniać.

2. DEFORMACJE RAMION LWR

Celem podstawowym aktywnej modyfikacji sztywności jest zmniejszenie deformacji ramion LWR, która pogarsza parametry dokładności działania robota. Podejście to może być również zastosowane po wykryciu kolizji typu robot-człowiek w postaci odwróconej, czyli jako działanie polegające na zmniejszeniu sztywności ramion aby minimalizować skutki kolizji.

2.1. Deformacje ramienia

Ramię LWR traktowane jako powłoka może ulegać złożonym deformacjom przestrzennym (rys. 2.1). Są to odkształcenia poprzeczne zachodzące na kierunkach prostopadłych do osi powłoki walcowej, skrętne oraz wzdłużne - zachodzące na kierunku osi powłoki. Mogą one występować zarówno oddzielnie, jak i łącznie.

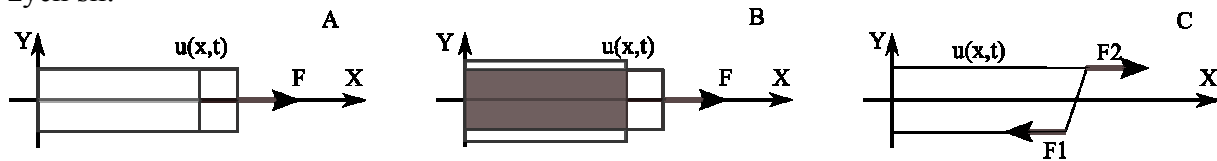


Rys. 2.1. Przykładowa deformacja cylindrycznej powłoki.

Deformacje ramienia wpływają na chwilową zmianę położenia i orientacji jego końca. Ich wielkość ma bezpośredni wpływ na osiąganą dokładność w fazie pozycjonowania oraz nadążania i zależy od szeregu czynników, które będą analizowane w dalszej części pracy.

Spośród wymienionych wyżej trzech rodzajów deformacji najprostszym opisem matematycznym charakteryzują się deformacje wzdłużne (osiowe), powstające w wyniku działania sił równoległych do osi ramienia (rys. 2.2). Występują one np. w chwili kontaktu ramienia z otoczeniem. Składowa zewnętrznej siły, która działa w osi ramienia, może wywoływać nieznaczną deformację wzdłużną (rys. 2.2A). Jest ona najczęściej pomijana z uwagi na małą wartość. Także przenoszenie maksymalnych obciążeń przez robot nie wywołuje istotnych

deformacji wzdluznych. Jezeli juz je uwzględniamy (w bardzo dokładnych modelach) to wtedy pomija się efekt zmiany przekroju ciała (rys. 2.2B), który uwidacznia się dla bardzo dużych sił.

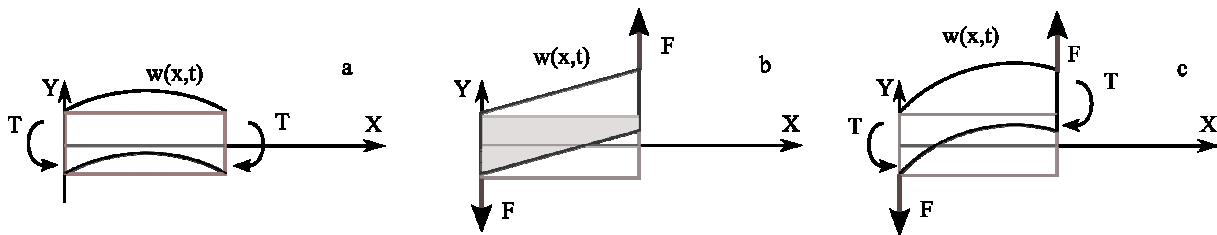


Rys. 2.2. Interpretacja deformacji wzdluznych

Zaniedbuje się również skutki, jakie mogą wynikać z dowolnego rozkładu sił wzdluznych. Przykładowo, może wystąpić zjawisko ścinania na kierunku osiowym (rys. 2.2C).

Deformacje skrętne ramion robota powstają najczęściej w wyniku manipulowania obiektem, który uchwycono mimośrodowo, lub w wyniku działania na ramię sił zewnętrznych, powstających w fazie kontaktu z otoczeniem. W wielu niekorzystnych konfiguracjach ruchów siły te mogą być na tyle duże, że zmiana orientacji obiektu spowodowana skręceniem może blokować prawidłowe wykonanie planowanego zadania.

W trakcie wykonywania ruchów w przestrzeni, na ramiona robota działają również siły poprzeczne oraz momenty gnące względem obu osi prostopadłych do osi głównej. Wywołują one złożone deformacje poprzeczne (rys. 2.3.a,b,c), na które składają się ugięcia (rys. 2.3.a) i deformacje ścinające (rys. 2.3.b).



Rys. 2.3. Interpretacja deformacji poprzecznych

Zauważmy, że efektem deformacji będzie zmiana orientacji o wypadkowy obrót ugięcia i transformacji ścinającej.

2.2. Zwiększanie sztywności ramienia

W celu poprawienia sztywności dynamicznej przy zachowaniu ustalonych wymiarów oraz masy ramienia, można zastosować inne materiały. Stal ma prawie trzykrotnie większy moduł Younga od stopów aluminium, ale z uwagi na znaczną gęstość jest rzadko stosowana (wzrasta masa ramion). Wydaje się, że duże możliwości oferują tworzywa sztuczne. Coraz częściej podzespoły z duraluminium zastępowane są *kevlar*em. Jeszcze lepsze własności mają kompozyty (sztywność ok. trzykrotnie większa od stali, bardzo mała gęstość), wytwarzane na bazie węglików, tlenków tytanu i aluminium. Tworzywa (kompozyty), występujące pod nazwą *Dyneema* (Royal DSM, Holandia), czy *M5* (Magellan Systems, USA), przewyższają parametrami najlepsze, znane do tej pory materiały. Poważnym ograniczeniem, blokującym szersze zastosowanie wymienionych materiałów w konstrukcji lekkich robotów, jest ich wysoka cena, trudność w łączeniu elementów konstrukcyjnych różnych typów (sklejanie), a przede wszystkim ograniczenia dystrybucyjne (zastosowania militarne).

Drugim prostym sposobem na zwiększanie sztywności jest zmiana geometrii ramienia. Przy stałych siłach obciążających ramię, na jego ugięcie największy wpływ ma moduł Younga oraz geometryczny moment bezwładności. Przykładowo, jeżeli pręt o długości 1 m i średnicy 16 mm zastąpimy rurą o grubości ścianki równej 1 mm i masie równoważnej dla przekroju

litego, to jej średnica wyniesie 53 mm a sztywność wzrośnie 17,18 razy. Dla takiego ramienia i typowych obciążeń wynikowe odkształcenie maleje do 1,1 mm. Jest to jednak w dalszym ciągu wartość ponad 10 razy większa od zakładanej wartości równej 0,1 mm. Dopiero zwiększenie średnicy do ok. 10 cm oraz zmniejszenie grubości ścianki do 0,6 mm powoduje, że suma powyższych deformacji jest niższa od założonej dokładności pozycjonowania. Niestety, niewielka grubość ścianki ramienia, przy znacznej jej średnicy powoduje, że ramię staje się cienką, elastyczną powłoką, dla której pojawia się szereg niekorzystnych zjawisk. Ten prosty przykład pokazuje, że typowe techniki usztywniania ramion (metody pasywne) mogą być niewystarczające i warto je wspomagać metodami aktywnymi. W tym celu niezbędne jest opracowanie wiarygodnych modeli matematycznych ramion LWR traktowanych jako powłoki.

3. MODEL MATEMATYCZNY RAMIENIA

Analityczny model powłoki opisują równania Love'a [3]. Maja one dużą wartość poznawczą, jednak ich użyteczność implementacyjna jest mniejsza. Z uwagi na możliwość swobodnej konfiguracji warunków brzegowych oraz nieograniczonego definiowania sił zewnętrznych lepszym rozwiązaniem jest zastosowanie modeli typu MES. Poniżej rozważono model z masami skupionymi typu masa- sprężyna- tłumienie o szesnastostopniowym układzie sąsiedztwa i prostokątnej topologii siatki (rys. 3.1), zapewniającym dobre odwzorowanie wszystkich rodzajów zniekształceń powłoki.

<p>Oddziaływanie pomiędzy cząstkami zachodzi tylko w bezpośrednim sąsiedztwie na kierunkach głównych. Odpowiada ono za deformację rozciągania.</p>	<p>Oddziaływanie pomiędzy cząstkami zachodzi tylko w bezpośrednim sąsiedztwie na kierunku przekątnych, odpowiada deformacji ścinania.</p>	<p>Oddziaływanie pomiędzy danym punktem oraz jego „dalekimi” sąsiadami na kierunkach głównych, odpowiada za deformację zginania.</p>	<p>Oddziaływanie pomiędzy „dalekimi” sąsiadami na kierunkach przekątnych. Poprawia własności zginające powłoki (lepszą stabilność kształtu powłoki).</p>

Rys.3.1. Modele powiązań w szesnastostopniowym układzie sąsiedztwa

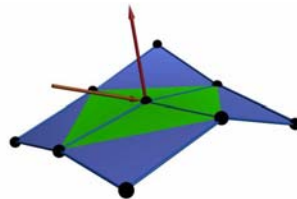
Aby otrzymać trójwymiarowe równania dynamiki powłoki kubka, zakładamy początkową długość łączników jako: $L_0 = \sqrt{L_{x0}^2 + L_{y0}^2 + L_{z0}^2}$, gdzie składowe (np. $L_{x0} = X_2(0) - X_1(0)$) są różnicami współrzędnych węzłów w początkowej chwili czasu. Bieżącą wartość $L = \sqrt{L_x^2 + L_y^2 + L_z^2}$, oraz jej pochodną równą

$$\frac{dL}{dt} = \frac{L_x}{L} \frac{dL_x}{dt} + \frac{L_y}{L} \frac{dL_y}{dt} + \frac{L_z}{L} \frac{dL_z}{dt} = \hat{L}^T \dot{u}_L, \quad \hat{L}^T = \left[L_x / L, L_y / L, L_z / L \right]^T, \quad u_L = L - L_0 \quad (1)$$

wykorzystujemy do wyznaczenia równania dynamiki ruchu:

$$\ddot{q}_{ij}(k) = m_{ij}^{-1} \left(F_{ij}(k) - k_s \sum_{n=1}^{16} (L_n - L_{0n}) \hat{L} - \mu \sum_{n=1}^{16} \dot{L} \hat{L}^T \hat{L} \right) \quad (2)$$

Wielkości występujące w równaniu (2) oznaczają odpowiednio: \ddot{q}_{ij} - wypadkowe przyspieszenie, m_{ij} - masę węzła siatki, F_{ij} - siły zewnętrzne dla węzła, k_s - współczynnik sztywności. Dwa ostatnie człony odpowiadają za oddziaływanie lepko-sprężyste pochodzące od 16 sąsiadów danego węzła. Oddziaływania grawitacyjne stanowią składnik sił zewnętrznych, podobnie jak oddziaływania ośrodka (powietrza). Siła takiego oddziaływania na dany węzeł zależy od powierzchni fragmentu powłoki znajdującego się w bezpośredniej okolicy węzła oraz kąta nachylenia powierzchni wokół węzła do kierunku działania opływającego medium, co pokazano na rys.3.2.



Rys. 3.2. Znormalizowany wektor reakcji medium i normalna do powierzchni w węźle

Wektor normalny N_{norm} do powierzchni znajdującej się w bezpośredniej okolicy węzła będzie równy znormalizowanemu wektorowi obliczonemu jako średnia z czterech wektorów normalnych wyznaczonych dla trójkątów sąsiadujących z węzłem. Ostatecznie wektor siły F_w działający na węzeł, a będącej skutkiem działania ośrodka, wyraża się wzorem:

$$F_w = k_w P_{pow} N_{norm} \rho_w \quad (3)$$

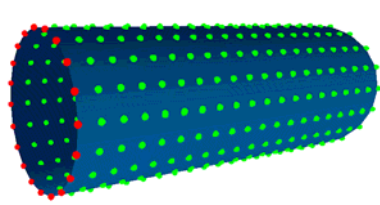
gdzie P_{pow} to powierzchnia powłoki w otoczeniu węzła, ρ_w to ciśnienie wyrażone w Pa jakie wywołuje opływające medium na powierzchnię prostopadłą do swojego kierunku.

W modelu matematycznym powłoki wprowadza się również możliwość sterowania ciśnieniem wewnętrznym powłoki. Wektor siły F_c pochodzącej od ciśnienia wewnętrznego działający na węzeł będzie zgodny co do kierunku i zwrotu z wektorem normalnym N_{norm} do powierzchni w węźle. Wartość siły będzie zależna od pola powierzchni w otoczeniu węzła:

$$F_c = P_{pow} N_{norm} \rho_{wew} \quad (4)$$

gdzie ρ_{wew} to wartość ciśnienia wewnętrznego wyrażona w paskalach.

Węzły swobodne i związane. W modelu powłoki ramienia robota został wprowadzony podział na węzły swobodne i związane. Węzły związane są „przytwierdzone” na stałe w określonym miejscu i służą do modelowania utwierdzeń (rys.3.3.). Węzły znajdujące się na pierwszym obwodzie cylindra są węzłami związanymi, a ich ruch powodowany jest przez zamocowanie w przegubie. Pozostała część ramienia będzie podążać za ruchami tych węzłów, w takim stopniu, w jakim pozwolą na to siły wynikające z deformacji sprężyn i z oddziaływań zewnętrznych.



Rys. 3.3. Węzły związane i swobodne w powłoce ramienia robota.

Na dowolny swobodny węzeł powłoki ramienia lub ich grupę, można oddziaływać wektorem sił o zmiennej wartości i kierunku. Metoda ta będzie wykorzystywana do modyfikowania sztywności ramienia.

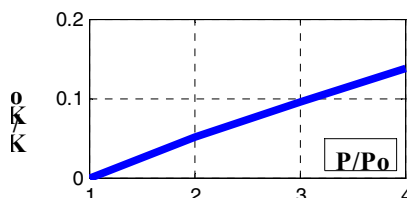
4. METODY AKTYWNEJ MODYFIKACJI SZTYWNOŚCI RAMION

Proponowana metoda aktywnej modyfikacji sztywności ramion zakłada zastosowanie trzech sposobów, które byłyby relatywnie proste w implementacji technicznej oraz programowej. Są to:

- „pompowanie” ramienia
- modyfikacja sztywności wzdłużnej ramienia
- zmiana kształtu ramienia.

4.1. „Pompowanie” ramienia

Metoda modyfikowania sztywności ramienia lekkiego robota nazywana „pompowaniem”, polega na wytworzeniu kontrolowanego ciśnienia wewnątrz powłoki. Wymusza to szczelną konstrukcję ramienia robota, ale nie jest to trudny problem techniczny. Wytwarzając ciśnienie wewnątrz powłoki zgodnie ze wzorem (3.4), doprowadzamy do minimalnego zwiększenia jej średnicy i długości, co prowadzi do wstępnego naprężenia wszystkich szesnastu sprężyn modelu i w konsekwencji do zwiększenia wynikowej sztywności całego układu- poprzecznej i skrętnej. Działanie odwrotne, czyli wypompowywanie powietrza z wnętrza powłoki zmniejsza wynikową sztywność układu, w skrajnym przypadku może prowadzić do „zapadnięcia” się powierzchni. Z uwagi na relacje geometryczne, zależność pomiędzy dodatkowym ciśnieniem a wynikową sztywnością jest nieliniowa. Wyznaczono ją za pomocą nomogramu otrzymanego z pomiaru deformacji statycznych ugięcia oraz skręcenia powłoki ramienia dla różnych wartości ciśnienia, rys.4.1. Wartości liczone są względem układu o ciśnieniu atmosferycznym równym 1000 hPa i odpowiadającej mu sztywności materiałowej.

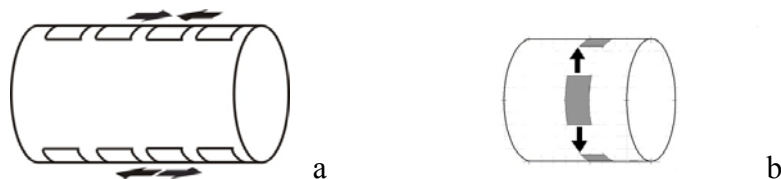


Rys. 4.1. Zależność względnej wynikowej sztywności od wewnętrznego ciśnienia powłoki.

Zakres zmian ciśnienia jest celowo niski, tak aby nie komplikować układu technicznego. Dla dwukrotnego ciśnienia atmosferycznego, wynikowa sztywność układu wzrasta tylko o 5 %, ale dla czterokrotnego ciśnienia atmosferycznego wzrost wynosi prawie o 14 %.

4.2. Modyfikacja współczynnika sztywności

Drugi sposób modyfikowania sztywności ramienia lekkiego robota polega na kontrolowanym wytworzeniu dodatkowych sił powierzchniowych, stycznych do wysokości walcowej powłoki, za pomocą paskowych elementów PZT, rys. 4.2a.



Rys. 4.2. Modyfikacja sztywności zginania (a) oraz poprzecznej zmiany kształtu (b)

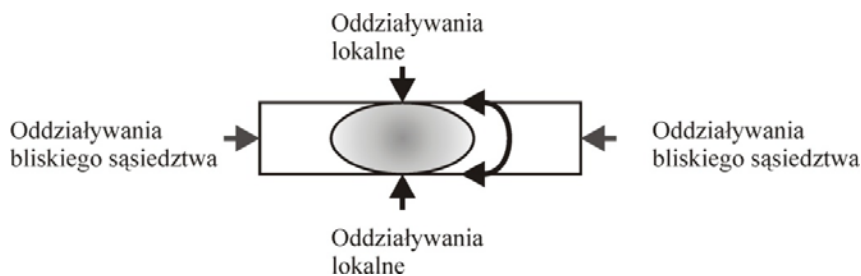
Stosowane są pary pasków PZT, które pracują w przeciwfazie, w taki sposób, że jedne z nich rozciągają powłokę a drugie ściskają. Ilość i rozmieszczenie elementów PZT nie była dokładnie analizowana. Otrzymane wyniki dotyczą układu z czterema paskami na obwodzie powłoki (rys. 4.2b) i czterech na kierunku wysokości.

4.3. Zmiana kształtu

Trzeci sposób modyfikowania sztywności ramienia LWR wykorzystuje możliwość zmiany kształtu przekroju poprzecznego za pomocą elementów PZT rozmieszczonych równoleżnikowo na jego obwodzie, rys. 4.2b. Wytworzenie sił stycznych do powierzchni ramienia powoduje, że pierwotny kształt okręgu zamienia się w owal. Orientacja głównych osi zależy od napięć podanych na elementy PZT, tak aby otrzymać kształt osiowo-symetryczny. Zmiana kształtu wpływa na sztywność poprzez geometryczny moment bezwładności. Przykładowo, dla identycznego pola powierzchni, koło ma o 43 % mniejszy geometryczny moment bezwładności od elipsy, której główna oś jest o 20 % większa od promienia koła (krótsza oś elipsy jest oczywiście odpowiednio mniejsza od promienia koła).

4.4. Układ sterowania

Proponowany układ sterowania nazywanego dalej tłumikiem segmentowym opiera się na analizie przepływu energii obserwowanej jako dynamiczne zjawisko falowe. Jeżeli wybierzemy dowolny punkt ramienia to widzimy, że jego zachowanie jest zależne od sił i momentów działających na wyróżniony fragment oraz od oddziaływań pochodzących z bezpośredniego sąsiedztwa (rys. 4.3). Nie występują tutaj dodatkowe „kanały” rozprawy energii.



Rys.4.3. Interpretacja lokalnego charakteru zjawisk.

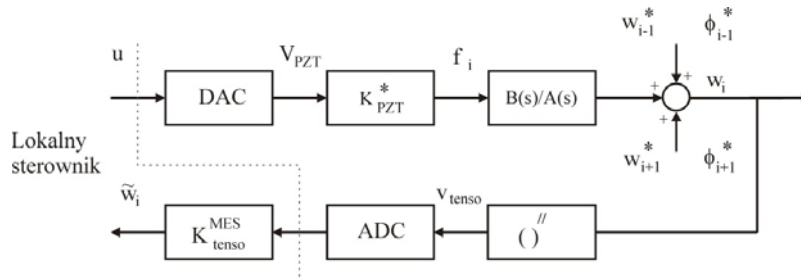
Na podstawie równania (3.2) wyprowadza się transmitancję układu interpretowaną jako zmianę położenia węzła na skutek wytworzonej przez element PZT siły sterującej oraz reakcji sąsiednich węzłów. Sterowanie siłą odbywa się na dwóch kierunkach, równoleżnikowym i południkowym. Z uwagi na lokalność analizowanych zjawisk, transmitancje są drugiego rzędu o charakterze oscylacyjnym. Element PZT wytwarza siłę o wartości proporcjonalnej do napięcia sterującego, oraz stałej opisującej geometrię elementu i własności piezoelektryczne.

$$f_i^y = F_{PZT} = K_{PZT}^* V_{PZT}(t) \quad (5)$$

Pomiar deformacji realizowany jest za pomocą zestawu tensometrów przyklejonych w pobliżu elementów PZT.

$$w_j(t) = \pm \frac{2}{V_0 k_{tenso} h} N_1(0) N_1''(0) v_{tenso}(j, t) = K_{tenso}^{MES} v_{tenso}(j, t) \quad (6)$$

Do toru pomiarowo-wykonawczego włączono współczynniki wzmocnień wzmacniaczy napięciowych tak, aby struktura tłumika segmentowego zawierała minimalną liczbę bloków, rys. 4.4.

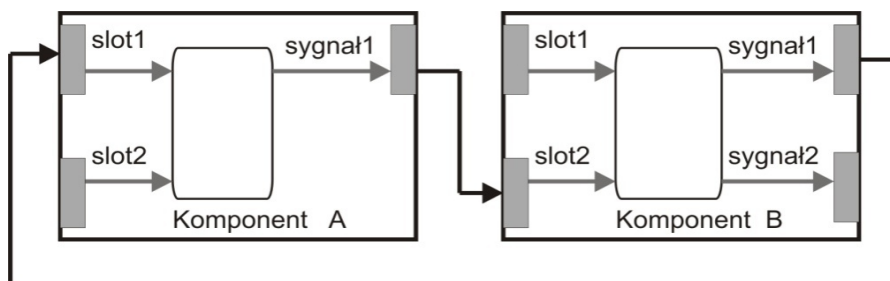


Rys. 4.4. Struktura tłumika segmentowego

Tłumik segmentowy posiada regulator liniowy typu RST [4], który ma szereg zalet. Najważniejsze z nich to: możliwość projektowania regulatora na drodze przekształceń symbolicznych, prosta implementacja i silne wsparcie narzędzi programowych. Projektowanie regulatora parametrycznego RST przeprowadzono metodą przekształceń symbolicznych. Stosując pakiet *Maple* rozwiązano równanie diofantyczne otrzymując jawne wzory na postać współczynników wielomianów $S(q^{-1}), R(q^{-1})$. Założono, że wielomian projektowany $P(q^{-1}) = (z - \alpha)^2 [z - (\alpha + j\omega)][z - (\alpha - j\omega)]$ ma charakter oscylacyjny, silnie tłumiony. Jego współczynnik tłumienia oraz bieguny są zadawane. Zaletą posiadania jawnych wzorów na współczynniki regulatora jest możliwość modyfikowania nastaw w trakcie jego pracy.

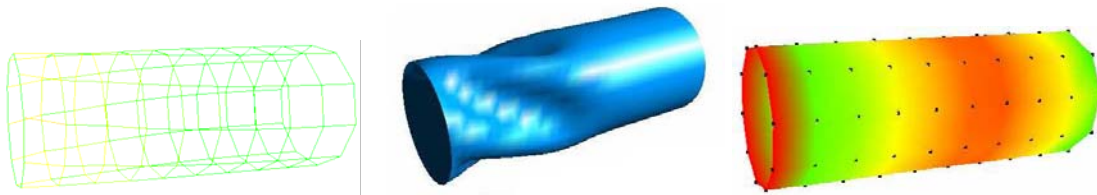
5. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

Oprogramowanie. Oprogramowanie symulacyjne zostało opracowane jako zbiór komponentów. Komponent integruje różne składniki sprzętowe oraz powiązane z nimi zasoby programowe, za pomocą warstwy komunikacji. Wymiana danych oparta jest na technologii *signals&slots*, dlatego nie jest ważne w jakiej technice i technologii zostało przygotowane oprogramowanie niższego poziomu. Dodatkowym czynnikiem zwiększającym elastyczność komponentu jest zastosowana technologia metaprogramowania. Umożliwia ona wprowadzanie nowych usług, nawet w fazie jego uruchamiania. Warstwa wyższa oprogramowania komponentu została opracowana przy wykorzystaniu biblioteki *BOOST* [5]. Z punktu widzenia użytkownika komponent jest instancją metaklas, którą cechuje określona funkcjonalność (zawarte w nim zbiory), interfejs oraz zbiór czterech operacji wywoływanych na poziomie jądra systemu (*construct, destroy, connect, update*). Dzięki temu komponentem można zarządzać na etapie kompilacji lub wykonania (wymagane jest wtedy przetwarzanie wyrażeń regularnych). Budowanie środowiska symulacyjnego przy użyciu komponentów sprowadza się do skonfigurowania dostępnych funkcjonalności oraz ich prawidłowego (sensownego) połączenia (rys. 5.1).



Rys. 5.1. Schemat łączenia komponentów

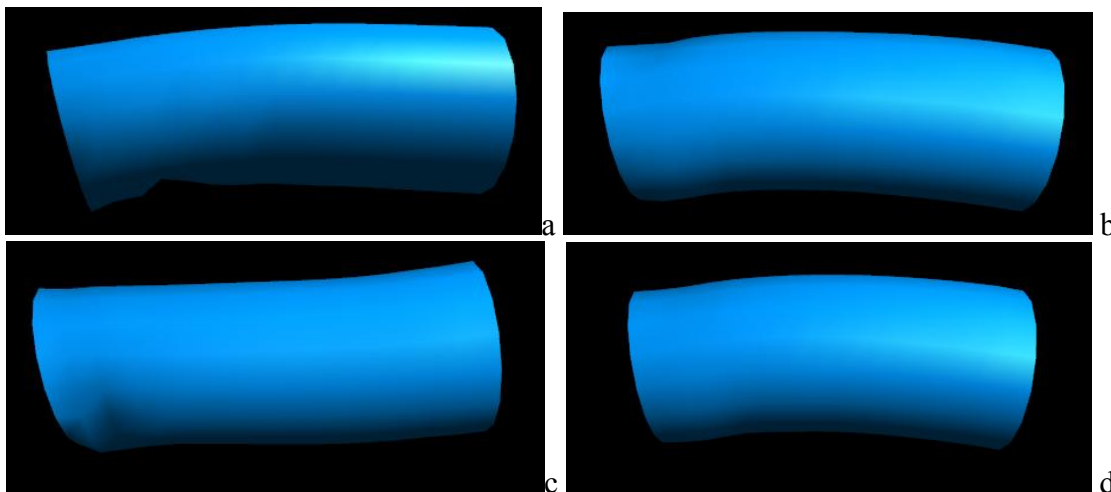
Warstwę wizualizacji i animacji graficznej komponentów oparto na standardach *OpenGL* i *Cg*. Dzięki temu prezentacja LWR może przybierać różne formy graficzne: modele szkieletowe, pełne z różną interpretacją barwy (rys. 5.2).



Rys. 5.2. Wizualizacja LWR, szkieletowa, bryłowa, rozkładu naprężeń

Interfejs użytkownika zbudowano korzystając z biblioteki Qt (*Trolltech*) [6], wspieranej przez *AntTweakBar* w sytuacjach kiedy należy przeprowadzić dialog z użytkownikiem już w fazie animacji. Do opracowania warstwy obliczeniowej i sterowania komponentów wykorzystano bibliotekę *BLAS*.

Wyniki. Badania symulacyjne aktywnej modyfikacji sztywności zostały podzielone na trzy części, które odpowiadały sposobom opisanym w punkcie czwartym. Miały one charakter rozłączny osobno badano metodę „pompowania”, modyfikacji współczynnika sztywności i metodę zmiany kształtu. Badaną powłokę charakteryzują następujące dane: materiał *kevlar*; wymiary: długość 0,5 m, średnica 0,1 m, grubość ścianki 0,6 mm; obciążenie końca ramienia – 1 kg. W modelu MES powłoki zastosowano 256 węzłów (16×16 węzłów na równoleżniku i południku), metodę całkowania Runge-Kutty (RK3/8), krok 0,1 ms. Badano zachowanie się powłoki w odpowiedzi na ruch przegubu w zakresie 12° z prędkością 2 rad/s, w płaszczyźnie prostopadłej do działania sił grawitacji. Dla metody „pompowania” podwyższone ciśnienie zachowywało stałą wartość w trakcie eksperymentu (układ bez regulatora), w pozostałych dwóch przypadkach elementy PZT były zasilane wzmocnionym napięciem sygnału z regulatora RST, przy zerowej wartości wielkości zadanej. Odpowiada to uchybowi równemu mierzonemu odkształceniu ze znakiem minus.



Rys. 5.3. Deformacje powłoki LWR: układ pierwotny (a), z ciśnieniem wewnętrznym 2000 hPa (b), modyfikacja współczynnika sztywności (c), z modyfikacją kształtu (d).

Dla pierwotnego układu (rys. 5.3a) widoczne są duże deformacje w dolnej części powłoki (wkłęśnięcia). „Pompowanie” (rys. 5.3b) eliminuje niedostatki układu pierwotnego, ale czas stabilizacji drgań układu zmniejsza się tylko o kilkanaście procent. Najszybciej tłumione są vibracje (ponad dwukrotnie) dla układu z modyfikacją współczynnika sztywności (rys. 5.3c). Jednak duża dynamika ruchu powoduje powstanie niebezpiecznych deformacji w części mocowania powłoki. Modyfikacja kształtu (rys. 5.3d) daje podobny efekt jak „pompowanie”.

W trakcie prowadzonych eksperymentów okazało się, że dobre własności ma układ ze skośnie zamocowanymi elementami PZT. Naturalnym rozszerzeniem tych sposobów jest ich połączenie w różnych kombinacjach. Należy jednak precyzyjnie zaplanować położenie różnych rodzajów elementów PZT, pamiętając o kierunkach wytwarzanych przez nie sił. Wydaje się, że najskuteczniejszym układem będzie połączenie metody „pompowania” i jednej wykorzystującej elementy PZT. Metoda modyfikowania kształtu ramienia ma dodatkową zaletę, ponieważ może być również zastosowana do kompensacji skręcenia ramienia na skutek mimośrodowych obciążeń jego końca. Zasygnalizowane koncepcje nie były jednak na razie badane.

6. PODSUMOWANIE

Lekkie roboty są obecnie coraz częściej włączane do prac odbywających się w bezpośrednim otoczeniu człowieka. Aktywne modyfikowanie sztywności ramion takich robotów jest zarówno metodą poprawy bezpieczeństwa jak również może przyczynić się do poprawy dokładności pozycjonowania. Praca omawia trzy propozycje sterowania sztywnością ramion, które badano metodami symulacyjnymi. Choć wyniki są zachęcające to należy je traktować jako wstępne z uwagi na brak wyników doświadczalnych, które są rzeczywistą i najważniejszą weryfikacją metod. Do badań wykorzystywano własne oprogramowanie symulacyjne opracowane z użyciem uznanych programowych standardów.

LITERATURA

1. A. Albu-Schäffer at all: *Soft Robotics*, IEEE Robotics & Automation Magazine, pp. 20-30, September 2008.
2. S. Haddadin, A. Albu-Schäffer, G. Hirzinger: *Requirements for Safe Robots: Measurements, Analysis & New Insights*, International Journal on Robotics Research (IJRR2007), : Special issue of ISRR2007, Vol. 28, No. 11–12, November/December 2009, pp. 1507–1527.
3. F. Axisa, P. Trompette: *Modelling of Mechanical Systems: Structural Elements*, Vol. 2, Elsevier 2005.
4. I.D.Landau: *Robust RST Digital Control and Open Loop System Identification*, IEEE Advanced Process Control, Vancouver 2002, Workshop presentation.
5. BOOST C++ libraries, www.boost.org/doc
6. J. Blanchette, M. Summerfield: *C++ GUI Programming with Qt 4*, Prentice Hall 2006.