

Załącznik do nr 7145/
1

PRZEMYSŁOWY INSTYTUT AUTOMATYKI I POMIARÓW PIAP
SAMODZIELNA PRACOWNIA OPROGRAMOWANIA SYSTEMÓW POS

02-486 Warszawa, Al. Jerozolimskie 202

071

A

PRZEGLĄD I ANALIZA LITERATURY ŚWIATOWEJ
W TEMATYCE KINEMATYKI ODWROTNEJ
ROBOTÓW REDUNDANTNYCH.
OPRACOWANIE INTERFEJSU SOFTWARE'OWEGO
W ŚRODOWISKU BORLAND C++ DO PAKIETU
SYMULACYJNEGO ROBCAD.

praca wykonywana w ramach umowy 94/94

na potrzeby zlec. 1484E pt. "Odwrotne zadanie kinematyczne
dla robotów redundantnych w kontekście projektu INGRID."

Praca została zrealizowana przez zespół:

mgr inż Zbigniew Pilat - główny wykonawca

mgr inż Małgorzata Jacórzyńska-Śmigiera

doc. dr inż. Cezary Lichodziejewski

mgr inż Marek Petz



Rozpoczęcie pracy: 1994.06.01.

Zakończenie pracy: 1994.10.31.

1

SPIS TREŚCI

CZEŚĆ I: PRZEGLĄD I ANALIZA LITERATURY ŚWIATOWEJ W TEMATYCE KINEMATYKI ODWROTNEJ ROBOTÓW REDUNDANTNYCH.....	3
1. Wstęp - przedstawienie tematu pracy.....	4
2. Wykorzystane materiały.....	6
3. Konspekty podstawowych pozycji literatutowych.....	7
CZEŚĆ II OPRACOWANIE INTERFEJSU SOFTWARE'OWEGO W ŚRODOWIS- KU BORLAND C++ DO PAKIETU SYMULACYJNEGO ROBCAD.....	33
1. Wprowadzenie.....	34
2. Możliwości implementacji własnego rozwiązania kinematyki odwrotnej w systemie ROBCAD.....	35
3. Interfejs odwrotnego zadania kinematyki użytkownika.....	36
4. Implementacja, uruchomienie i wykorzystanie interfejsu pomiędzy Borland C++ i ROBCAD.....	38
ZAŁĄCZNIK 1 SPIS POZYCJI LITERATUROWYCH.....	39

CZĘŚĆ I

PRZEGLĄD I ANALIZA LITERATURY ŚWIATOWEJ W TEMATYCE KINEMATYKI ODWROTNEJ ROBOTÓW REDUNDANTNYCH.

1. Wstęp - przedstawienie tematu pracy.

Praca jest wykonywana w ramach projektu INGRID w programie TELEMAN II, finansowanym przez Wspólnotę Europejską. Celem projektu jest opracowanie inteligentnego robota portalowego do zastosowań przy dystrybucji materiałów nuklearnych. Cała praca jest podzielona na cztery grupy zagadnień:

- zdalne stanowisko kontrolno-nadzorujące - na bazie standardowej stacji roboczej (workstation) ma być opracowany system do monitorowania i sterowania robota i wszystkich z nim współpracujących urządzeń,
- układ sterowania - hardware i software zapewniający bezpośrednio, półautonomiczne sterowanie robotem i wszystkimi jego podsystemami, sterowanie portalem, sterowanie narzędziami oraz komunikację z zewnętrznymi systemami sensorycznymi; układ jest zintegrowany w strukturze logicznej stanowiska kontrolno-nadzorującego,
- urządzenia ogólne - manipulator robota (6 stopni swobody, typu PUMA), portal z dźwigiem (5 stopni swobody: przód-tył, lewo-prawo, góra-dół, i dwie pary kinematyczne obrotowe), kamera, sensory siły i inne urządzenia współpracujące,
- projekt, implementacja i testowanie scenariusza działań - scenariusz ten jest pomyślany jako zespół czynności systemu robota demonstrujący jego możliwości pracy przy obsłudze gniazda (komory) dystrybucji materiałów radioaktywnych; obejmuje on m.in. monitorowanie poziomu radiacji i aktywności chemicznej materiałów w komorze, odkazanie i czyszczenie wyposażenia i samej komory (wraz z usuwaniem śieków i umieszczaniem ich w specjalnym pojemniku), montaż i demontaż narzędzi wykorzystywanych w komorze, inspekcja komory przy pomocy systemu TV.

Wśród zadań grupy pierwszej znajduje się m.in. system planowania trajektorii ruchu - PPS (z ang. Path Planning System). Temat ten realizuje już od kilkunastu miesięcy ośrodek naukowo-przemysłowy CRIF/WTCM w Brukseli. W ramach tych prac został opracowany tzw. GPPS (Global PPS) - system planowania trajektorii narzędzia roboczego we współrzędnych zewnętrznych, konkretnie system ten operuje w bazowym układzie współrzędnych komory. Jako platformę sprzętową dla GPPS wybrano workstation typu Silicon Graphics. Możliwe jest stosowanie również stacji typu SUN, IBM, HP. Warunkiem jest możliwość instalacja pakietu oprogramowania do modelowania i symulacji systemów robotowych - ROBCAD, który stanowi środowisko software'owe dla GPPS. System wykorzystuje wprost niektóre mechanizmy ROBCAD-a, m.in. związane z przeliczaniem kinematyki robota. ROBCAD ma zaimplementowane funkcje obliczające kinematykę wprost dla łańcucha o maks. 32 stopniach swobody oraz kinematykę odwrotną dla łańcucha o maks. 6 stopniach swobody. Jak już wyżej wspomniano robot w temacie INGRID ma 6 stopni swobody, natomiast portal - 5. Razem więc system posiada 11 stopni swobody - jest to więc manipulator nadmiarowy, redundantny. Możliwe jest zatem wykorzystanie systemu ROBCAD do generacji kinematyki wprost. Natomiast kinematyki odwrotnej ROBCAD nie policzy. Zespół z CRIF rozwiązał ten problem doraźnie, wprowadzając rozdzielanie portalu i robota przy liczeniu kinematyki wstecz. W pierwszym podejściu 'zamrażane są' stopnie swobody portalu i ROBCAD próbuje dopasować się do zadanej pozycji zewnętrznej tylko zmieniając położenie robota. Jeśli okaże się to niemożliwe, 'zamrażany' jest robota i portal dokonuje przejazdu w stronę zadanego punktu. Metoda ta daje co prawda zamierzony efekt końcowy, ma jednak spore mankamenty. Nie są w ten sposób wykorzystane możliwości, jakie daje nadmiarowość manipulatora jeśli idzie o gładkość, zwinność, zgrabność ruchu. Wygenerowany ruch nie jest optymalny pod względem energetycznym. Takie podejście utrudnia realizację

zadań omijania trajektorii. Jednocześnie wiadomo, że od lat są opracowywane różnorodne metody rozwiązywania kinematyki odwrotnej dla robotów redundantnych. Z pracami na ten temat można spotkać się w czasopismach fachowych, książkach i na konferencjach. Autorzy proponują różnorodne metody. Nie ma tu zgodności, jak w przypadku robotów o 6-ciu stopniach swobody, jakie podejście jest najlepsze. Nie ma też sprawdzonych, gotowych rozwiązań dla konkretnej klasy manipulatorów. Nie ma w końcu kompletnych, w pełni sformalizowanych algorytmów. Celem włączenia PIAP do prac projektu INGRID jest właśnie opracowanie ogólnego rozwiązania odwrotnego zadania kinematycznego dla manipulatorów redundantnych w kontekście zadań postawionych w projekcie. W tym celu trzeba wykonać następujące zadania:

- przegląd i analiza literatury w temacie kinematyki odwrotnej robotów redundantnych,
- wybór konkretnych metod rozwiązania zadania kinematyki odwrotnej,
- implementacja symulacyjna opracowanych algorytmów,
- badania symulacyjne, ocena przydatności i wybór algorytmu do stosowania praktycznego w projekcie,
- dołączenie opracowanego i wybranego rozwiązania do GPPS i przeprowadzenie prób praktycznych.

Niniejsze opracowanie stanowi raport z wykonania pierwszego z wymienionych zadań.

2. Wykorzystane materiały

Poszukując materiałów do przeglądu literatury autorzy opracowania mieli do dyspozycji dwa źródła. Pierwszym była instytutowa biblioteka CRIF, która szczególnie w zakresie materiałów konferencyjnych przedstawia się imponująco. Autorzy mieli możliwość przeglądania jej zasobów przez kilka dni i robienia kserokopii interesujących materiałów. Drugim źródłem była Biblioteka Główna Politechniki Warszawskiej, która, jak się okazało posiada największe i najbardziej aktualne zbiory w omawianej dziedzinie spośród bibliotek znanych autorom. Zdecydowanie mniejsze znaczenie miało sprowadzanie artykułów z innych ośrodków, szczególnie z innych miast - głównie z powodu długiego czasu oczekiwania. Również czas oczekiwania na niektóre pozycje książkowe uniemożliwił ich wykorzystanie w opracowaniu.

Podsumowując pozycje wytypowane do analizy pochodzą z następujących wydawnictw:

Czasopisma

- IEEE Journal on Robotics and Automation
- IEEE Transactions on Automatic Control
- IEEE Transactions on Man-Machine Systems
- IEEE Transaction on Robotics and Automation
- IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics
- Journal of Robotics Systems
- The International Journal of Robotics Research

Konferencje

- ICAR Int. Conf. on Advanced Robotics
- IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems IROS
- IEEE Int. Conference on Robotics and Automation,
- Int. Symposium on Experimental Robotics
- ISIR Int. Symp. on Industrial Robots
- RoManSy Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators
- SPIE's International Symposium on Optical Tools for Manufacturing

Trzeba zaznaczyć, że artykuły w czasopismach okazały się o wiele bardziej dokładne i wyczerpujące. W materiałach konferencyjnych niekiedy tylko sygnalizowano pewne problemy. W większości te przemyslenia ukazywały się rok, dwa lata później w którymś z czasopism, znacznie szerzej omówione. Tak więc największą zaletą konferencji jest ich aktualność - prezentowane tam materiały są często naprawdę bardzo świeże. Z drugiej strony publikacje książkowe są mocno opóźnione czasowo. Często prezentują one stan trzy, cztery lata wcześniejszy niż wydanie książki.

3. Konspekty podstawowych pozycji literatutowych

Jak już wcześniej wspomniano głównym źródłem informacji o metodach i algorytmach stosowanych w rozwiązywaniu odwrotnego problemu kinematycznego dla robotów redundantnych były artykuły. Wszystkie zgromadzone pozycje można podzielić na dwie grupy. Pierwsza, nazwana podstawową, zawiera artykuły dotyczące bezpośrednio badanej dziedziny, przedstawiające konkretne metody lub podstawy teoretyczne dla ich opracowania. Grupa druga, na którą składają się pozycje uzupełniające, pozwala zapoznać się z problemami bardzo bliskimi analizowanej tematyce, jak rozwiązanie odwrotnego zadania kinematycznego dla robotów 6-DOF (także w postaci zamkniętej), sposoby reprezentacji robota i przeszkód w jego przestrzeni roboczej itp. W artykułach tej grupy można także znaleźć informacje o różnych aspektach problemu generowania trajektorii i znaczenia dla jego analizy zadania kinematyki odwrotnej. W załączniku do niniejszego opracowania wyszczególniono wszystkie przeanalizowane pozycje literatury, z podziałem na wspomniane grupy. W tym rozdziale przedstawiono krótkie konspekty podstawowych pozycji literatutowych.

- [A1] Andersson R. L. Computing the Feasible Configurations of a 7-DOF Arm Subject to Joint Limits. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 9, NO. 2, April 1993

Teoretycznie manipulator redundantny ma stopnie swobody które mogą być wybrane dowolnie do eliminowania osobliwości, omijania przeszkód w przestrzeni roboczej lub poprawienia właściwości dynamicznych. W praktyce jednak wykorzystanie redundantnych stopni swobody jest ograniczone przez limity zakresów przemieszczeń poszczególnych przegubów. Znane są sposoby sterowania manipulatorami redundantnymi, które używają pseudoinwersji macierzy jacobianowych. W algorytmach tego rodzaju mogą być dodawane wyrażenia związane z ograniczeniami, np. kryterium optymalizacji wyznaczające wysoką karę, kiedy któryś przegub zbliża się do swoich ograniczeń. Stosuje się również rozszerzanie zadania odwrotnego o dodatkowe warunki wynikające z zadania tak, aby pozbyć się nadmiarowości. Pewną alternatywą jest "zamrażanie" wybranych przegubów tak, aby robot z pozostałymi, "aktywnymi" przegubami nie był nadmiarowy. Ten artykuł prezentuje szybki algorytm w postaci zamkniętej do wyznaczenia zestawu możliwych konfiguracji manipulatora dla dowolnie zadanej pozycji i orientacji narzędzia. Jest to algorytm geometryczny (nie regulator trajektorii), wyznaczający zestawy realizowalnych konfiguracji manipulatora, które omijają ograniczenia przegubów. Wymaga on ograniczenia zakresów przegubów do 180 stopni (większy zakres wymaga rozszerzenia algorytmu). Analizie podlega antropomorficzne ramię o siedmiu stopniach swobody (7-DOF), z tzw. zerowym przesunięciem (zero-offset arm) - struktura kinematyczna podobna do ramienia człowieka. Efektywne sterowanie takim ramieniem wymaga w praktyce sterowania względną orientacją łokcia. przy dowolnej pozycji względem pozycji bieżącej. Dla konkretnej pozycji kiści redundantny stopień swobody odpowiada obrotowi łokcia wokół wyimaginowanej linii łączącej bark z kciścią. Możliwe położenia łokcia zawarte są w kuli. Położenia łokcia dla danej pozycji kiści określa koło na kuli, którego promień zmniejsza się kiedy kiść oddala się od barku. Sparametryzowano redundancję z kątem łokcia ψ wokół koła. W skrócie, sposób postępowania polega na odwzorowaniu każdej granicy kąta przegubu w granicę na ψ w pewnej postaci, znalezieniu granic na ψ , które przecinają zakresy. Rozwiązanie zadania można otrzymać przykładowo przez ustawienie ψ w środku największego zakresu. Alternatywnie dodatkowe czynniki analizy redundancji mogą być użyte do wyboru jakiejś innej wartości na ψ wewnątrz możliwego zakresu rozwiązania, co daje cały zestaw kątów przegubów.

Algorytm służy jako wartościowy środek dla każdej metody analizowania redundancji ponieważ zapewnia całkowicie jasny opis osiągalnych konfiguracji i ponieważ działa dla dowolnej pozycji niezależnie od bieżącego położenia lub trajektorii. Różni się on bardzo od wcześniej opisanych metod, które wymagają iteracji podczas ruchu (w celu ominięcia ograniczeń). Ten algorytm nie wymaga iteracji ani ruchu, rzeczywistego lub symulowanego. Jest przy tym bardzo szybki. Procesor robota prototypowego oblicza zestaw możliwych konfiguracji, tzn. rozwiązuje odwrotne zadanie kinematyki w 100 μ s.

[A2] Ang M. H., Tourassis V. D. Singularity Coupling in Robotic Manipulators. 7803-0078/91/0600-0683\$01.00@1991 IEEE

Istnienie osobliwych pozycji wewnątrz przestrzeni roboczej jest nieodłącznym problemem przy planowaniu zadania i sterowaniu robota. Pozycje osobliwe są takimi konfiguracjami manipulatora, w których robot przejściowo traci jeden lub więcej stopni swobody. Ilekroć manipulator traci stopień swobody, znajdują się kierunki wzdłuż (lub wokół) których nie można się poruszać lub wywierać sił (lub momentów). Blisko punktów osobliwych bardzo duże ruchy przegubów powodują relatywnie małe ruchy narzędzia. W tych obszarach realizacja zadanego niewielkiego i powolnego przemieszczenia narzędzia może wymagać bardzo dużych i szybkich ruchów poszczególnych stopni swobody. Kiedy żądane położenie narzędzia odpowiada pozycji osobliwej, może być nieskończona ilość konfiguracji realizujących to położenie, co komplikuje planowanie zadania. Identyfikacja tych osobliwości nie zawsze jest łatwa analitycznie. Przy ich opisie stosuje się często analizę wyznacznika macierzy jacobianowej. Są też sposoby geometryczne do analizy osobliwości prostych 6-członowych manipulatorów. Inne metody używają transformacji współrzędnych dla uproszczenia macierzy jacobianowej, osobliwości są identyfikowane jako położenia w których jacobian staje się niepełnego rzędu. W ogólności identyfikacja osobliwości poprzez globalny jacobian manipulatora nie wnika fizycznie w naturę osobliwych konfiguracji. Zazwyczaj łatwiejsze i bardziej pouczające jest oszacowanie osobliwości "ramienia" i "kiści" robota z odzwierciedleniem ograniczeń podsystemów robota odpowiedzialnych odpowiednio za pozycjonowanie i orientowanie narzędzia w przestrzeni roboczej. W artykule zaprezentowano ogólną formułę określania osobliwości manipulatora w zależności od osobliwości podsystemów, prowadzącą do nowej, wygodnej metody identyfikowania osobliwości sześcioposiowych manipulatorów. Wprowadzono pojęcia *osobliwości pozycyjnych i orientacyjnych*, które mogą wystąpić tylko wtedy, kiedy ramię (kiść) porusza się. Pomysł polega na analizie ograniczeń podsystemów robota odpowiadających podstawowemu pozycjonowaniu (ramię) i podstawowemu orientowaniu (kiść) narzędzia w przestrzeni.

Przedmiotem dalszych rozważań jest określenie analityczne wzajemnego oddziaływania pomiędzy pojedynczymi osobliwościami ramienia i kiści a globalnymi osobliwościami manipulatora. Szczegółowo rozwinięto ogólną formułę definiującą osobliwości w wyrażeniach na osobliwości podsystemowe. Analiza prowadzi do wygodnego sposobu identyfikowania osobliwości 6-osioowego robota i zapewnia fizyczne wniknięcie w geometrię manipulacji i w powiązanie osobliwości podsystemowych. Zilustrowano to przykładem dla nieprostego robota, który nie posiada rozwiązania kinematyki odwrotnej w postaci zamkniętej.

W dalszych rozważaniach określono "ramię" jako kombinację trzech, niekoniecznie sąsiednich, przegubów które w pierwszym rzędzie odpowiadają za pozycjonowanie. Podobnie "kiść" składa się z pozostałych trzech przegubów odpowiedzialnych za orientowanie. Zdefiniowano *jacobian pozycyjny* J_p jako podmacierz składającą się z trzech górnych rzędów jacobianu manipulatora; wiąże on ruch przegubu z ruchem translacyjnym narzędzia. Podobnie *jacobian orientacyjny* J_o zdefiniowano jako podmacierz składającą się z trzech dolnych rzędów jacobianu manipulatora i wiąże on ruch przegubu z ruchem obrotowym narzędzia.

Osobliwość pozycyjna ramienia odpowiada utracie jednego lub więcej pozycjonujących stopni swobody, osobliwość orientacyjna kiści odpowiada utracie przynajmniej jednego orientującego stopnia swobody, tzn. odpowiadają one konfiguracjom ramienia (kiści) dla których rząd jacobianu jest niższy niż trzy.

Pokazano przykład zastosowania formuły wyznacznikowej w odniesieniu do ramienia cylindrycznego robota wyposażonego w niesferyczną kiść.

[A3] Baillieul J. Kinematic Programming Alternatives for Redundant Manipulators. Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, St. Louis, 1985.

W artykule przedstawiono oryginalną metodę rozwiązywania odwrotnego problemu kinematycznego, nazwaną przez autorów metodą rozszerzonego jakobianu. Można ją zaliczyć do grupy metod pseudoinwersyjnych. Jak wiadomo zależność między pozycją wewnętrzną (osiową) a zewnętrzną (narzędzia) opisuje równanie:

$$f(\underline{\theta}) = \underline{x}$$

natomiast po jego zróżniczkowaniu stronami otrzymujemy związek między prędkością efektora a prędkością wewnętrzną:

$$\dot{\underline{x}}(t) = \frac{\partial f}{\partial \underline{\theta}}(\underline{\theta}(t))\dot{\underline{\theta}}(t)$$

gdzie $\underline{J} = \frac{\partial f}{\partial \underline{\theta}}$ - macierz jakobianowa.

Dla robotów redundantnych macierz jakobianowa \underline{J} nie jest kwadratowa. Dlatego do rozwiązania zapisanego wyżej równania stosuje się tzw. metody pseudoinwersyjne (pseudoodwrotne). Autorzy tego artykułu proponują rozszerzenie macierzy \underline{J} do nieosobliwej postaci \underline{J}_e :

$$\underline{J}_e = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial \underline{\theta}} \\ \frac{\partial G}{\partial \underline{\theta}} \end{bmatrix}$$

wtedy rozwiązanie odwrotnej kinematyki można zapisać jako:

$$\dot{\underline{\theta}}(t) = \underline{J}_e^{-1} \begin{pmatrix} \dot{\underline{x}}(t) \\ 0 \end{pmatrix}$$

Zasadniczym problemem w metodzie jest jak widać dobór funkcji G . W artykule podano ogólne zasady tej operacji. Zaproponowano powiązanie funkcji G z dodatkowym kryterium optymalizacyjnym, np. minimalizacja wydatku energii. Możliwe jest też zastosowanie, znanego z innych opracowań indeksu manipulacyjności (manipulatability index). Rozważania prowadzono jednak dla przypadku redundancji pojedynczej ($m = n - 1$). Autorzy zapewniają, że można je rozszerzyć na wariant ogólny: $m \leq n - 1$.

W końcowej części artykułu nasykicowano koncepcję opracowania na bazie metody rozszerzonego Jakobianu ogólnej techniki rozwiązywania problemów kinematyki odwrotnej dla robotów redundantnych.

- [A4] Baker D. R., Wampler Ch. W. Some Facts Concerning The Inverse Kinematics of Redundant Manipulators. CH2413-3/87/0000/0604\$01.00@1987, IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, 1987

Wiele konwencjonalnych nieredundantnych robotów ma osobliwe konfiguracje, blisko których niektóre małe ruchy końcówki narzędzia roboczego wymagają nadmiernych i fizycznie nierealizowalnych prędkości członu, co powoduje faktyczne ograniczenie użytecznej przestrzeni roboczej manipulatora. W artykule proponuje się uniknięcie dużych prędkości członów przez wprowadzenie członów redundantnych i użycie odpowiedniego algorytmu kinematyki odwrotnej. Twierdzenia z tego artykułu wyrażają (dla bardzo powszechnej klasy algorytmów kinematyki odwrotnej) kilka podstawowych zależności między cechami algorytmu i jego zdolnością do rozwiązywania tych problemów. Te rezultaty mają praktyczne znaczenie w projektowaniu sterowników dla manipulatorów redundantnych, szczególnie gdy do modyfikowania trajektorii jest używane wejście sensoryczne w czasie rzeczywistym.

Artykuł ten omawia, bazując na argumentach topologicznych, kilka ograniczeń dotyczących obszaru udanych zastosowań algorytmów kinematyki odwrotnej dla zagadnień pozycjonowania punktowego i orientowania.

Na początek zilustrowano zjawisko występowania osobliwości i warunki ich istnienia najpierw dla manipulatora nieredundantnego, a następnie dla redundantnego. Rozważono klasę metod inwersji kinematycznej zwaną "algorytmami śledzącymi", które zależą tylko od bieżącej konfiguracji manipulatora i lokalnych właściwości drogi, co umożliwia manipulatorowi zmieniać jego drogę w czasie ruchu bazując na pomiarach sensorycznych lub innych informacjach w czasie rzeczywistym. Dla celów dydaktycznych algorytmy kinematyki odwrotnej mogą być podzielone na dwie kategorie:

- a) metody inwersji drogi - obliczają trajektorię przestrzenną członu z kompletnego opisu zadania w przestrzeni operacyjnej. Mając granice na na moment obrotowy serwomotoru i prędkości członów, lub inne ograniczenia, te metody znajdują trajektorię członu, która optymalizuje kryterium spełnienia, takie jak czas całkowity lub średnia energia kinetyczna. Wytwarzane są zazwyczaj trajektorie członów z akceptowalnymi prędkościami członów, lecz te metody są ograniczone do planowania off-line i nie pozwalają na korekcję drogi w czasie rzeczywistym opartą na pomiarach sensorycznych.
- b) metody inwersji lokalnej - dają drogi członów które zależą tylko od lokalnego zachowania drogi w przestrzeni operacyjnej. Zatem korekcje drogi oparte na sensorach mogą być włączane w czasie rzeczywistym, lecz może powstać problem wysokich prędkości członów i trajektorie członów będą w ogólności suboptymalne w porównaniu z metodą inwersji drogi. Niemniej jednak sensoryczne sprzężenie zwrotne jest krytyczne dla wielu zadań, tak że artykuł koncentruje się na metodach inwersji lokalnej.

Najwięcej metod inwersji lokalnej bazuje na powtarzaniu rozwiązań różnych zależności pomiędzy współrzędnymi w przestrzeni członu a współrzędnymi w przestrzeni operacyjnej.. Jeśli x' oznacza prędkość w przestrzeni operacyjnej a df jest jacobianem f , wtedy metoda lokalna polega na znalezieniu rozwiązań na \mathcal{Q}' z równania $df(\mathcal{Q}'(t)) = x'(t)$, dla całego t podczas ruchu. (Wyzsze pochodne także pokazują się w tych wyrażeniach.) Ponieważ równanie prędkości jest rozwiązywane powtarzalnie w czasie rzeczywistym, to może być modyfikowane stosownie do pomiarów sensorycznych lub rozkazów człowieka. Różne metody różnią się sposobem znajdowania jedyne \mathcal{Q}' wśród wielu rozwiązań tego równania. Najpowszechniejsze przedstawiono skrótowo:

[A5] Baker D. R., Wampler II Ch. W. On the Inverse Kinematics of Redundant Manipulators. The International Journal of Robotics Research, vol. 7, No. 2, March/April 1988

Wiele nierzędantnych manipulatorów posiada osobliwe konfiguracje w swojej przestrzeni roboczej. Próba przejścia przez takie pozycje, np. podczas wykonywania ciągu instrukcji ruchu, prowadzi do wygenerowania trajektorii, które wymagają uzyskania ekstremalnie wysokich prędkości osiowych. Efektywnie dostępna przestrzeń robocza manipulatora zostaje zatem zawężona o obszary wokół konfiguracji osobliwych. Wprowadzenie w takich sytuacjach dodatkowych, nadmiarowych stopni swobody rozwiązuje najczęściej problem. Zastosowanie redundancji wymaga jednak wprowadzenia specyficznych algorytmów sterowania, w szczególności algorytmów rozwiązywania odwrotnego problemu kinematycznego. Generalnie algorytmy takie można podzielić na dwie grupy:

- a) metody wykorzystujące informacje o całej trajektorii,
- b) metody wykorzystujące informacje o fragmencie trajektorii (local path information).

W pierwszym przypadku, przy wprowadzeniu takich ograniczeń jak moc silników czy prędkość przegubów, obliczana jest trajektoria we współrzędnych wewnętrznych, która optymalizuje wprowadzone kryterium jakości - może to być np. całkowity czas realizacji czy średni wydatek energii na trajektorii. Metody te nie nadają się generalnie do zastosowań w trybie on-line. O wiele chętniej są badane i stosowane metody bazujące na informacji lokalnej. Są one szybsze i pozwalają np. uwzględniać sygnały z czujników w trybie real-time. Mają jednak inną niedoskonałość - otrzymane z nich rozwiązania charakteryzują się często dużymi prędkościami w poszczególnych osiach.

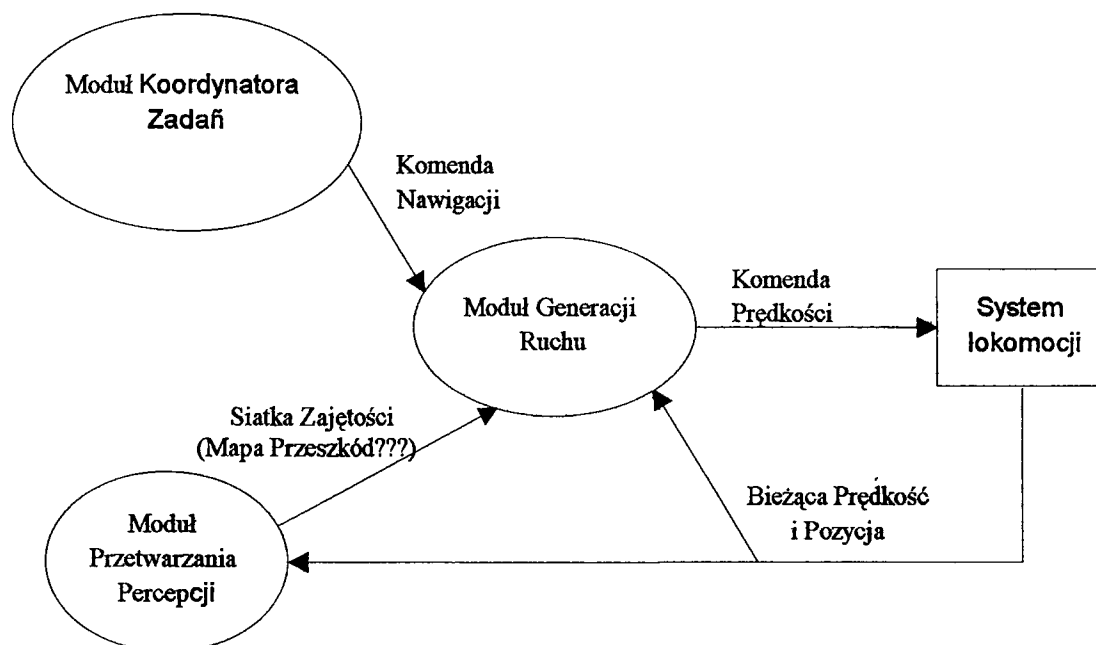
W artykule dokonano ogólnego przeglądu metod i algorytmów dla problemu kinematyki odwrotnej. Podano pięć twierdeń (z dowodami) i dziesięć definicji użytecznych przy analizie tego problemu.

[A6 Bouffouix St., Bogaert M. Real-Time Navigation and Obstacle Avoidance for Teleoperated Vehicles. Proceedings of SPIE's International Symposium on Optical Tools for Manufacturing, Boston 1992

W artykule opisano system nawigacji i omijania przeszkód zaimplementowany w robocie mobilnym. Robot jest sterowany przez oddalonego operatora przy pomocy joystick'a (może być inne urządzenie, istotnym jest sterowanie zdalne). Przyjęto pięć założeń dla systemu:

- system reaguje w czasie rzeczywistym (natychmiast) na komendy operatora; operator musi mieć możliwość interwencji w dowolnej chwili "misji".
- sterowanie robota przez operatora musi być proste; system ułatwia zadanie operatora poprzez "ukrycie" szczegółów sterowania.
- przejście pomiędzy kolejnymi komendami operatora musi być ciągłe, gładkie. System nie może wprowadzać niepotrzebnych przerw między zakończeniem wykonywania jednej komendy a otrzymaniem następczej.
- powinno zostać zwiększone bezpieczeństwo pojazdu.
- system powinien być odporny na błędy percepcji; w ostateczności musi umożliwić operatorowi wymuszenie, przeforsowanie jego decyzji (gdy np. operator błędnie wykrył).

Ogólnie w architekturze systemu można wyróżnić cztery moduły, jak to przedstawia rysunek:



- [A7] Chan T. F., Dubey R. V. Generation of Joint Trajectory Requiring Lower Joint Velocities for A Redundant Manipulator. 7803-0078/91/0600-1217\$01.00@1991 IEEE

Dla manipulatorów o nadmiarowych strukturach kinematycznych (roboty redundantne) istnieje nieskończenie wiele wektorów prędkości osiowych, które dają w efekcie tę samą prędkość końcówki roboczej (narzędzia). Zależność między prędkością zewnętrzną (kartezyjską) a prędkością wewnętrzną (osiową) może być zapisana w postaci zależności:

$$\dot{x} = J\dot{\theta}$$

W równaniu tym θ jest wektorem prędkości osiowych, tzn. wewnętrznych, w poszczególnych stopniach swobody, o wymiarze $n \times 1$. Natomiast x jest wektorem $m \times 1$ i zawiera prędkości narzędzia robota wyrażone w układzie kartezyjskim, czyli prędkości zewnętrzne. Dla robota przestrzennego, a więc operującego w trzech wymiarach (w odróżnieniu od robota planarnego, operującego na płaszczyźnie) wektor x ma sześć elementów: trzy prędkości liniowe wzdłuż trzech osi zewnętrznego układu współrzędnych i trzy prędkości kątowe reprezentujące zmianę orientacji narzędzia (w przypadku orientacji możliwe są różne konwencje opisu, np. trzy kąty Eulera). Dla robotów redundantnych zachodzi $n < m$ stąd równanie powyższe ma nieskończenie wiele rozwiązań przy danym x . Aby równanie takie można było rozwiązać trzeba sformułować dodatkowe kryteria. W artykule prowadzono rozważania na przykładzie robota Robotics Research, model K-2107. Ma on 7 stopni swobody. Aby otrzymać jedno rozwiązanie równania dla prędkości wewnętrznych potrzebne jest jedno dodatkowe kryterium. Autorzy proponują zastosować kryterium minimalizacji normy prędkości osiowych. Uzyskuje się, ich zdaniem, w ten sposób minimalizację wydatku energii, a także można uzyskać większe prędkości zewnętrzne, mieszcząc się w sprzętowych (konstrukcyjnych) ograniczeniach prędkości wewnętrznych.

W artykule opisano symulacyjne sprawdzenie zaproponowanej koncepcji. Symulacje przeprowadzono na stacji graficznej Silicon Graphics. Program symulacyjny umożliwił programowanie ruchu robota, graficzne przedstawienie jego pozycji w poszczególnych fazach ruchu, a także tworzenie trójwymiarowego wykresu minimalizowanej funkcji (z możliwością drukowania na ploterze).

- [A8] Charentus S., Renaud M. Modelling and Control of a Modular, Redundant Robot Manipulator. Experimental Robotics 1-st Int. Symposium, Montral, June 19-21, 1989

Manipulatory robotów o otwartej strukturze kinematycznej mają jedną wielką zaletę z użytkowego punktu widzenia. Ich przestrzeń robocza jest z reguły bardzo duża. Jednocześnie konstrukcje te stwarzają liczne problemy ich twórcom i użytkownikom. Podstawowy wiąże się z dokładnością. Wszystkie błędy powstałe w przegubach przenoszą się na narzędzie ze wzrastającą mocą, tzn. błąd w pierwszym stopniu swobody ma największy wpływ na błąd liczony na końcówce roboczej we współrzędnych zewnętrznych. Drugim istotnym problemem jest sztywność konstrukcji. Właśnie z powodu sztywności manipulatory otwarte mają tak słaby stosunek dopuszczalnej masy obciążenia do masy robota - dla robotów elektrycznych nawet 1:35. Dlatego próbuje się znaleźć alternatywne rozwiązania z zamkniętymi łańcuchami kinematycznymi. Jedną z takich propozycji są manipulatory równoległe. W artykule zaprezentowano nowy typ manipulatora zamkniętego. Łączy on w sobie zdolność rozszerzania przestrzeni roboczej charakterystyczną dla łańcuchów otwartych z wysoką dokładnością i sztywnością, która cechuje struktury zamknięte. Manipulator ten składa się z ciągu identycznych równoległych struktur. Każdy moduł zbudowany jest z dwóch płyt, połączonych sześcioma siłownikami. Zasadniczym problemem w sterowaniu takim manipulatorem jest przeliczanie jego modelu kinematycznego. Łącząc dwa moduły mamy już dwanaście stopni swobody. W artykule przedstawiono sposób modelowania pojedynczego modułu oraz zasady sterowania nim. Omówiono także problemy modelowania i sterowania manipulatora złożonego z kilku modułów. Jako przykład przedstawiono robota LX z laboratorium LOGABEX we Francji, który jest zbudowany z czterech członów nowego typu. Napędzają go więc dwadzieścia cztery silniki.

- [A9] Cheng F. T., Chen T. H., Sun Y. Y. Inverse Kinematic Colutions for Redundant Manipulators Using Compact Formulation. IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems IROS'91, Osaka 1991

W artykule przedstawiono nową metodę rozwiązywania problemów kinematyki odwrotnej dla manipulatorów redundantnych, nazywaną metodą compact. Należy ona do grupy metod pseudoinwersyjnych, od kalsycznej pseudoinwersji różni się jednak zasadniczo. W metodzie tej zakłada się, że macierz jacobianowa J jest pełnego rzędu - m . Następnie dokonuje takiego przestawienia kolumn macierzy J aby pierwszych m kolumn było niezależnych. Wtedy równanie prędkości zewnętrznej można zapisać w postaci:

$$\dot{x} = [J_1 J_2] \begin{bmatrix} \dot{\theta}_b \\ \dot{\theta}_f \end{bmatrix}$$

gdzie:

J_1 - pierwszych m kolumn macierzy jacobianowej po przestawieniach,

J_2 - pozostałe r kolumn macierzy jacobianowej,

$\dot{\theta}_b$ - część wektora prędkości związana ze zmiennymi podstawowymi,

$\dot{\theta}_f$ - część wektora prędkości związana ze zmiennymi dodatkowymi.

następnie za pomocą eliminacji Gaussa otrzymuje się postać zredukowaną (wiersze) i na jej podstawie formułuje się rozwiązanie końcowe. Metoda jest zdaniem autorów efektywniejsza od klasycznej pseudoinwersji zarówno przy stosowaniu technik programowania liniowego jak i nieliniowego do otrzymania optymalnego rozwiązania.

[A10] Chevallereau C., Khalil W. Efficient Method for The Calculation of The Pseudo Inverse Kinematic Problem. CH2413-3/87/0000/1842\$01.00@1987, IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, 1987

Przedstawiono skuteczny algorytm dla rozwiązywania pseudo-odwrotnego zagadnienia kinematycznego robotów. Obecnie istnieje wiele nowych, efektywnych metod rozwiązywania zagadnienia kinematycznego odwrotnego [Featherstone, Paul, Gorla], które jednak nie pracują w pozycjach osobliwych i nie mogą być używane dla robotów redundantnych. Zadowolające rozwiązanie dla tych przypadków można otrzymać przez użycie metody pseudoinwersji [Liegois, Fournier i Khalil], lecz dostępne są tylko rozwiązania numeryczne [Fournier, Bouillion], które są tak czasochłonne, że ich zastosowanie do systemów sterowania robotów działających w czasie rzeczywistym jest niemożliwe. W artykule zaprezentowano algorytm, dający jawne rozwiązanie zagadnienia pseudoinwersji kinematycznej, który może być zastosowany w sterowaniu on-line. Podane obliczenie kinematyki odwrotnej może być używane przy pozycjach osobliwych i dla robotów redundantnych. Zaprezentowana metoda wyróżnia się jasnością i tym, że redukuje znacznie ilość działań w porównaniu z metodami numerycznymi.

Opisana metoda bazuje na modelu kinematyki wprost wiążącym prędkość w przestrzeni kartezyjskiej z prędkościami poszczególnych przegubów poprzez macierz jacobianową J . Rozwiązanie odwrotnego zadania kinematycznego dla prędkości oznacza otrzymanie prędkości wewnętrznej - w poszczególnych przegubach (stopniach swobody) - q' , dla danego wektora prędkości zewnętrznej - we współrzędnych kartezyjskich - X' . Jeśli J jest kwadratową i regularną macierzą, to:

$$q' = J^{-1} \cdot X' \quad \text{gdzie } J^{-1} \text{ jest odwrotnością } J.$$

Jeśli J jest osobliwe, albo odpowiada manipulatorowi redundantnemu (np. jeśli $n > 6$), wtedy J^{-1} jest nieokreślone. Rozwiązanie dla tych dwóch przypadków można otrzymać wprowadzając macierz pseudoinwersji J^+ . Wtedy:

$$q' = J^+ \cdot X'$$

W artykule przedstawiono dwie metody obliczania pseudoinwersji:

1) Metoda Greville'a - iteracyjna, kolumny macierzy J są brane pod uwagę sukcesywnie. Obliczenie tą metodą jest raczej trudne do skomputeryzowania w postaci symbolicznej. Szybko pojawiają się długie wyrażenia niełatwe do uproszczenia. Używanie przejściowych zmiennych, jak w przypadku modelu dynamicznego, nie pozwala otrzymać prostych wyrażeń na pseudoinwersję i prowadzi do znaczącej ilości działań.

2) Metoda Hestenes'a - używa pojęcia dwuprostopadłości (biorthogonality). Jest odpowiednia tylko w przypadku macierzy $(m \times n)$ n -tego rzędu. Zdaniem autorów ta metoda jest łatwiejsza niż metoda Greville'a dla programowania w postaci symbolicznej.

Autorzy napisali program ogólny do obliczania macierzy odwrotnych i pseudoodwrotnych metodą Hestenes'a, stanowi on pakiet programowy modelowania symbolicznego modelowania robotów (SYMORO). W artykule przedstawiono algorytm wykorzystany w tym programie. Podano przykłady obliczeń dla robota 6-DOF w pozycji osobliwej i robota 7-DOF.

[A11] Chinnasamy R., Nataraju B. S., Mruthyunjaya Optimisation Techniques for Inverse Kinematics Solution. , ze zbiorów biblioteki CRIF

Artykuł prezentuje rozwiązanie zagadnienia kinematyki odwrotnej za pomocą dwóch naturalnych technik optymalizacji nieliniowej, przez minimalizację funkcji błędu. Ponieważ dla wielu geometrii manipulatorów nie mogą być znalezione rozwiązania w postaci zamkniętej, rozwijane są techniki numeryczne. Pewna ilość technik numerycznych dla analizy mechanizmów przestrzennych używa algebry macierzowej do sformułowania zależności kinematycznych. Najpowszechniejsze algorytmy proponują rozwiązanie równań nieliniowych kinematyki przy użyciu metody Newtona-Raphsona opartej na jednoczesnej kolejnej liniowej interpolacji równań nieliniowych. Ta metoda wymaga odpowiedniego sterowania krokowego dla unikania rozbieżności spowodowanej kiepskim wstępnym oszacowaniem. Trudnym i czasochłonnym zadaniem jest wybór odpowiedniego rozwiązania z wielorakich wyliczonych rozwiązań. Techniki optymalizacyjne stosuje się powszechnie do konstruowania i syntezy mechanizmów i sterowań. Tutaj technikę optymalizacji spróbowano wykorzystać do otrzymania rozwiązania kinematyki odwrotnej. W tej metodzie błąd pomiędzy wstępnym kinematycznym położeniem (pozycja i orientacja) a końcowym położeniem jest określony. Wektor zmiennych przegubu znajduje się przez minimalizację funkcji błędu. Mogą do tego służyć dwie techniki optymalizacji nieliniowej:

1) metoda sprzężonego gradientu (CGM - conjugate gradient method) - algorytm ten jest kwadratowo zbieżny. Właściwość ta jest bardzo użyteczna, ponieważ gwarantuje, że metoda będzie minimalizowała funkcję kwadratową w mniejszej ilości iteracji niż wyliczona innymi metodami gradientowymi. Ponieważ funkcja błędu jest kwadratowa zbieżność może być osiągnięta w skończonej ilości iteracji.

2) metoda zmiennej metrycznej (VMM - variable metric method) - szybka i zbieżna kwadratowo. W porównaniu z metodą sprzężonego gradientu jest bardzo stabilna i dąży do minimum nawet dla wysoce zniekształconych i niewspółśrodkowych funkcji. Jest efektywna jeśli dostępne są pochodne funkcji.

W artykule zamieszczono algorytmy obliczeniowe dla obu metod. Do obliczeń używano IBM PC 386/AT, algorytmy zakodowano w FORTRANIE. Obie metody optymalizacji mają mechanizm wyboru optimum wielkości kroku dla każdej iteracji. Dla obu stosunek zbieżności jest duży podczas wstępnej fazy iteracji. Zakres zbieżności CGM jest większy niż VMM. Rozwiązanie kinematyki odwrotnej jest zależne od warunków wstępnych. Z powodu lepszej konwergencji (zbieżności) preferowana jest metoda VMM.

[A12] Chirikjian G., Burdick J. W. Hyper-Redundant Robot Mechanisms and Their Applications. IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems IROS'91, Osaka 1991

W artykule pokazano nowe metody kinematycznej analizy hiper-redundantnych manipulatorów, prowadzące do bardzo efektywnej inwersji kinematycznej, planowania drogi, omijania przeszkód, lokomocji, i schematów chwytania. Pokazano także budowę i implementację płaskiego 30-DOF robota.

Roboty hiper-redundantne mają wielką lub nieskończoną liczbę stopni swobody. Są podobne do węży, użyteczne w działaniu w wysoce ograniczonym otoczeniu. Składają się z dużej ilości sztywnych członów, lub też z naprawdę giętkich struktur, np. pneumatycznie poruszanych ramion.

Algorytmy dla kinematyki odwrotnej oparte na obliczaniu pseudo-inwersji jakobianu są niepraktyczne dla robotów hiper-redundantnych. Autorzy artykułu wprowadzili nowe metody analizy kinematyki prostej i odwrotnej, zarówno *rozciągliwych* (zmienna długość) jak i *nierozciągliwych* (długość stała) hiper-redundantnych robotów. Są one oparte na wewnętrznym modelowaniu geometrycznym różniczkowym 'krzywej grzbietowej' (backbone curve), która ujmuje cechy geometryczne makroskopowe robota. Te techniki były używane do układu omijania przeszkody dla robotów. Istnieją też metody niewewnętrzne dla rozwiązywania hiper-redundancji, lecz nie jest pewne, czy mogą być zastosowane do innych, niż kratownicowe (VGTMs) konstrukcji manipulatorów.

W dalszej części zajęto się analizą kinematyczną takich manipulatorów. Ponieważ krzywa jest dokładną reprezentacją manipulatora o nieskończonej liczbie członów, odpowiednio własności manipulatora o skończonej, ale bardzo dużej liczbie członów mogą być określone przez *krzywą grzbietową* leżącą wzdłuż robota. Kinematyczna analiza i programowanie zadania jest ograniczone do badania przestrzennego i czasowego zachowania krzywej grzbietowej. Kinematyczne rozwiązania oparte na krzywej grzbietowej mogą być użyte wprost do sterowania geometrią ciągłych manipulatorów hiper-redundantnych, podczas gdy dla ciągłego rozwiązania użytego do określenia przemieszczeń serwomotoru układów o geometrii dyskretnej wymagany jest dodatkowy krok zwany 'procesem dopasowywania'.

Rozszerzono tę metodę analizy o nieróżniczkowalne krzywe przez wprowadzenie funkcji krzywizny quasiciągłej ze skończoną liczbą skoków i całkowalnymi osobliwościami. Funkcja taka daje krzywe grzbietowe, które są ciągłe, ale nie różniczkowalne w pewnych punktach. Jeśli fizyczna struktura manipulatora 'ślizga się' wzdłuż krzywej grzbietowej, jak może być w przypadku sytuacji omijania przeszkody, jest uwzględniona chwilowa zmiana orientacji, kiedy manipulator osiąga te punkty osobliwe.

Pokazano metodę modalną analizy hiper-redundancji dla nierozciągliwych manipulatorów w nie ograniczonym otoczeniu i zaprezentowano nowe rozwiązania kinematyczne odwrotne w postaci zamkniętej. Rozwiązanie kinematyczne odwrotne w tym przypadku może być interpretowane jako wybór takiej krzywej grzbietowej z nieskończonej ilości możliwych krzywych grzbietowych, która spełnia ograniczenia pozycji narzędzia, i możliwie inne ograniczenia zadania. Równania krzywej grzbietowej występują w postaci modalnej. W praktycznych implementacjach tej metody proponuje się zastosowanie sieci neuronowych.

Zilustrowano omijanie przeszkody przez hiper-redundantny manipulator w przypadku działania w obszarze przeszkody. Omijanie może być dokonane przez określenie 'tunelu' wiodącego przez wysoce ograniczone otoczenie. Aby dotrzeć do celu manipulator musi 'ślizgać się' wzdłuż tego tunelu.

- [A13] Chung W. J., Youm Y., Chung W. K. Inverse Kinematics of Planar Redundant Manipulators via Virtual Links with Configuration Index. *Journal of Robotics Systems* 11(2), 117-128 (1994)

W artykule zaprezentowano nowe podejście do problemu kinematyki odwrotnej dla planarnych manipulatorów redundantnych. Manipulator taki jest dzielony na segmenty po dwa lub trzy stopnie swobody. Wprowadzono pojęcie człony wirtualnego (virtual link), który zastępuje poszczególne segmenty. W zależności od konfiguracji ramienia w danej chwili mamy do czynienia z członem wirtualnym osobliwym lub nieosobliwym. Warunek ten jest sprawdzany przez specjalną funkcję i zapamiętywany jako zmienna (tzw. indeks konfiguracyjny) do wykorzystania w dalszej części algorytmu. Problem kinematyki odwrotnej rozwiązywany jest najpierw dla manipulatora z członami wirtualnymi. Trzeba zaznaczyć, że po wprowadzeniu członów wirtualnych otrzymujemy do analizy manipulator o liczbie stopni swobody mniejszej niż wyjściowy dwa do trzech razy. Dla manipulatorów o większej liczbie stopni swobody wprowadza się dodatkowo tzw. człony subwirtualne (sub-virtual links). Jeden człon subwirtualny zastępuje dwa lub trzy człony wirtualne. Widać z tego, że analiza kinematyki odwrotnej sprowadza się do rozwiązania tego problemu dla systemów o dwóch lub trzech stopniach swobody. W pierwszej kolejności wyznacza się współrzędne wewnętrzne dla systemu z członami subwirtualnymi, następnie dla systemu z członami wirtualnymi i na końcu dla rzeczywistego manipulatora.

W artykule przedstawiono przykład realizacji metody dla manipulatora planarnego o siedmiu do dziewięciu stopniach swobody. Opisano sposób przeprowadzenia symulacji jak też jej wyniki w postaci szkiców konfiguracji w kolejnych krokach ruchu.

Osobny podrozdział poświęcono wykorzystaniu przedstawionej metody do przestrzennego manipulatora redundantnego typu SCARA.

- [A14] Gosselin M. C., Cote J., Laurendeau D. Inverse Kinematic Functions for Approach and Catching Operations. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 23, NO. 3, May/June 1993

Artykuł proponuje sposób podejścia do otrzymania funkcji kinematycznych odwrotnych, których domena nie jest ograniczona do przestrzeni roboczej manipulatora. W efekcie te funkcje mogą być użyte do odwzorowania takich punktów przestrzeni kartezjańskiej, które nie należą do przestrzeni roboczej manipulatora. Zagadnienie pozycjonowania jest sformułowane jako minimalizacja odległości pomiędzy zadaniem punktem kartezjańskim a końcem narzędzia. Stąd punkty na zewnątrz przestrzeni roboczej manipulatora są odwzorowywane przez funkcję kinematyczną odwrotną na współrzędne członów, które przyprawdają manipulator tak blisko jak tylko to możliwe do nakazanego położenia kartezjańskiego. Podano wyrażenia na ruch płaski i przestrzenny i rozszerzenie na zagadnienia, w których będzie także dana orientacja. Przykłady odnoszą się do manipulatorów 2-DOF i 3-DOF, podano rozwiązania analityczne i numeryczne. Proponowane funkcje kinematyczne odwrotne są bardzo interesujące dla śledzenia, operacji dochodzenia i chwytania, w których obiekt osiągniany lub śledzony przez manipulator może znajdować się na zewnątrz przestrzeni roboczej.

Istnieją pewne zastosowania, dla których wymagane jest otrzymanie funkcji kinematycznych odwrotnych których zasięg nie jest ograniczony do kartezjańskiej przestrzeni roboczej manipulatora, np. śledzenie i chwytanie poruszającego się obiektu wchodzącego do jego przestrzeni roboczej lub używanie ramienia montowanego na robocie mobilnym podjeżdżającym do obiektu statycznego. Te typy zastosowań pociągają za sobą takie stany, w których chcemy, aby manipulator dążył w kierunku obiektu ulokowanego nazewnątrz przestrzeni roboczej możliwie jak najdokładniej. W artykule proponuje się sformułowanie odwrotnego zagadnienia pozycjonowania jako minimalizacji odległości pomiędzy punktem w przestrzeni kartezjańskiej a końcem narzędzia, rezultatem takiego podejścia są ogólne funkcje kinematyczne odwrotne w których odwzorowuje się punkt z przestrzeni kartezjańskiej albo 1) na odpowiedni punkt w przestrzeni członu, jeśli współrzędne kartezjańskie są w przestrzeni roboczej, albo 2) na współrzędne członu, które będą kierowały narzędzie tak dokładnie jak to możliwe do określonego punktu, jeśli ten nie należy do przestrzeni roboczej manipulatora.

Zagadnienie pozycjonowania

Punkty leżące wewnątrz kartezjańskiej przestrzeni roboczej manipulatora są odwzorowywane w ustawienia rzeczywistych kątów członów poprzez funkcję kinematyczną odwrotną, natomiast punkty na zewnątrz są odwzorowywane w złożone kąty członów. Fizyczna interpretacja tego jest prosta: konfiguracje kartezjańskie umieszczone nazewnątrz nie mogą być osiągnięte z rzeczywistymi kątami członów. Stąd tylko złożone wartości zmiennych członów mogą spełnić kinematyczne więzy.

Zagadnienia pozycjonowania i orientacji

W tym przypadku wektor współrzędnej kartezjańskiej zawiera składniki pozycjonowania i orientacji. Problem jest sformułowany następująco: dana jest pewna orientacja narzędzia - narzucona przez zadanie - i dana jest pozycja obiektu - trzeba minimalizować odległość pomiędzy obiektem a narzędziem. Ponieważ orientacja jest narzucona, jest to równoznaczne z daniem wyższego priorytetu orientacji, lub, innymi słowy, jest to traktowane jako ograniczenie. Rozwiązanie otrzymano (wykorzystując konwencję Denavita-Hartenberga) jako macierz Q (macierz rotacyjna dająca orientację narzędzia z uwzględnieniem ustalonej budowy) otrzymaną przez wymnożenie macierzy rotacyjnych związanych z każdym z członów manipulatora $Q = Q_1 Q_2 \dots Q_n$.

[A15] Grudič G. Z., Lawrence P.D. Iterative Inverse Kinematics with Manipulator Configuration Control. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 9, No. 4, August 1993. 1042-926X/93\$03.00 © 1993 IEEE

Przedstawiono metodę rozwiązywania zagadnienia kinematycznego odwrotnego robota, nazwaną metodą *modyfikacji kompensującej* (metoda OM - offset modification). Metoda OM polega na modyfikowaniu wartości opisujących stopnie swobody manipulatora (np. wartości parametrów Denavita-Hartenberga d_i, a_i) tak długo, aż jest możliwe wyprowadzenie równań kinematyki odwrotnej w postaci zamkniętej dla wynikowego manipulatora. Otrzymany w ten sposób manipulator nazwano manipulatorem modelowym. W artykule opisano proces wyboru manipulatora modelowego takiego, który ma równania kinematyki odwrotnej w postaci zamkniętej. Pozwala to w efekcie na wyprowadzenie układu trzech równań nieliniowych z trzema niewiadomymi, które rozwiązane numerycznie dają rozwiązanie kinematyki odwrotnej, zawarte wewnątrz znanego ograniczonego trójwymiarowego regionu, dla pierwotnego manipulatora. Metoda OM może być zastosowana do manipulatorów z każdą ilością stopni swobody, tak długo, jak manipulator spełnia dany zestaw warunków. Metodę OM testowano na manipulatorze 6-DOF, dla którego nie znano równań kinematyki odwrotnej w postaci zamkniętej. Pokazano, że metoda OM jest niezawodna, daje się zastosować do sterowania w czasie rzeczywistym, może być użyta dla zapewnienia zbieżności do zadanych pozycji i orientacji oraz pozwala na bezpośredni wybór algorytmu rozwiązania kinematyki odwrotnej z zapewnioną zbieżnością. Metoda ta pozwala także na bezpośrednie sterowanie tymi konfiguracjami manipulatora które są uwzględnione w równaniach w postaci zamkniętej dla manipulatora modelowego. Rozważono zastosowanie tej metody do innych geometrii 6-DOF manipulatora i do manipulatorów redundantnych. Rozwiązania kinematyki odwrotnej dla modelowego manipulatora redundantnego wymagają dodatkowego opisu w celu określenia wszystkich możliwych rozwiązań. Może to być opis odpowiednio zdefiniowanych zmiennych rzeczywistych (nazwanych zmiennymi redundancji). Zadane wartości zmiennych redundancji, opisane jako wejścia algorytmu, są dodane do wektora konfiguracji. Wektor ten może być użyty do sterowania redundantnymi stopniami swobody dla celów omijania przeszkód, maksymalizacji odległości od ograniczeń przegubu przy danej pozycji końcowej i orientacji (maksymalizacja zręczności manipulatora przy danej pozycji końcowej i orientacji), i/lub omijania regionów osobliwości manipulatora. W praktyce wprowadzanie opisu redundantnego manipulatora realizowane jest przez

a) ręczne wyspecyfikowanie wartości zmiennych redundancji wewnątrz wektora redundancji,

b) użycie odpowiedniego kryterium optymalizacji dla automatycznego wygenerowania żądanych wartości zmiennych redundancji.

Korzyść uzyskana z zastosowania metody OM dla manipulatora redundantnego z równaniami kinematyki odwrotnej w postaci nie zamkniętej jest taka, że komplikacja zagadnienia kinematyki odwrotnej nigdy nie wykracza ponad to co potrzebne do rozwiązania docelowego układu trzech równań z trzema niewiadomymi, co potencjalnie umożliwia sterowanie w czasie rzeczywistym dla manipulatorów redundantnych o każdej liczbie stopni swobody. Inne techniki, które wykorzystują redundantne stopnie swobody do maksymalizowania jakiegoś kryterium optymalizacji wymagają manipulacji i/lub inwersji $N \times N$ macierzy, które mogą być obliczeniowo bardzo kosztowne kiedy N jest bardzo duże.

W artykule przedstawiono charakterystyki innych 10-ciu metod, które są przeznaczone dla manipulatorów mających nieznanne równania kinematyki odwrotnej w postaci zamkniętej.

[A16] Liégois Alain. Automatic Supervisory Control of the Configuration and Behavior of Multibody Mechanisms. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. SMC-7, No. 12, December 1977

Zaproponowano dwupoziomowe sterowanie adaptacyjne kinematyką robotów redundantnych przy użyciu specjalnej postaci ogólnego rozwiązania układu równań liniowych. Rozważono mechanizm składający się z $n+1$ ciał sztywnych połączonych n parami kinematycznymi (obrotowymi i/lub przyzmatycznymi). Do analizy ruchu mechanizmu wykorzystano model dynamiczny bazujący na równaniach Lagrange'a. Układ sterowania składa się z:

1) *Poziomu automatycznej koordynacji* - potrafi wybrać najlepsze "działanie synergiczne" dla przemieszczeń członów, w znaczeniu lokalnego kryterium biorącego pod uwagę wewnętrzne ograniczenia: zderzaki mechaniczne, osobliwości, maksymalne prędkości itp.

2) *Poziomu nadrzędnego* - potrafi modyfikować zachowanie się mechanizmu, kiedy jest to potrzebne dodawać bardziej globalne kryteria i ograniczenia, takie jak omijanie przeszkody lub dyspozycyjność (w znaczeniu elastyczności z uwzględnieniem nieprzewidzianych zmian celów i działań które są planowane przez człowieka-operatora lub przez sztuczny generator planu).

Za pomocą odpowiednio zaprojektowanych regulatorów można zbudować układ automatycznego sterowania który wymusza wektor Y (współrzędnych uogólnionych) przy śledzeniu żądanej trajektorii $Y(t)$ w przestrzeni E^n . W jednym z możliwych rozwiązań użyto sterowania ze sprzężeniem zwrotnym - sprzężeniem do przodu opartym na uproszczonym modelu dynamicznym. Taki układ śledzący rozpatrywano dalej jako idealny. Następnym krokiem w rozwiązywaniu zagadnienia sterowania jest wytworzenie wejściowego wektora $Y(t)$ serwomechanizmu jako funkcji danego zadania $X(t)$ określonej w m -wymiarowej przestrzeni euklidesowej E^m . Jeśli istnieje kilka rozwiązań, pożądane jest stworzenie mechanizmu wybierania "najlepszego" w sensie uwzględniania zewnętrznych i wewnętrznych ograniczeń przy minimum przemieszczeń członów.

W przypadku ogólnym możliwe jest zapisanie ograniczeń we współrzędnych y_i tak że zagadnienie polega na rozwiązywaniu w każdej chwili równania wektorowego: $X = F(Y)$, w którym $X = X(t) \in E^m$ jest dane. Jeśli $m < n$, istnieje nieokreślona ilość rozwiązań. Mechanizm jest redundantny i problemem jest koordynacja ruchów członów. W takim przypadku może być używany model zlinearyzowany przez rozważenie małych przemieszczeń wokół bieżącej konfiguracji Y : $dX = J(Y)dY$, w którym $J(Y) = J$ jest macierzą jakobianową $m \times n$. Inne rozwiązania używają uogólnionej odwrotności G od J dla której obowiązuje: $JGJ = J$. Ponieważ dla robotów redundantnych rząd $(J) = m < n$, istnieje nieokreślona ilość rozwiązań. Ta dowolność może być usunięta przez automatyczne wybranie rozwiązania, które minimalizuje funkcję typu $\Omega = \Omega(dY)$. Alternatywa polega na wyborze G w taki sposób, aby były omijane mechaniczne blokady. Wspomniane strategie zabezpieczają pierwszy poziom adaptacji w koordynowanym mechanizmie przez znalezienie optymalnego zachowania "bliskiego zasięgu" jako funkcji dY i/lub bieżących własności $J(Y)$. W następnej części artykułu proponuje się rozwiązanie które pozwala układowi nadrzędnemu (poziom drugi) modyfikować zachowanie i konfigurację mechanizmu w taki sposób, że spełnione jest kryterium wyższego poziomu, zawierające wektor Y zamiast dY , otrzymania maksimum dyspozycyjności, np. stanu układu, kiedy jest on blisko ograniczających więzów, itp. ze względu na omijanie przeszkody.

W konkluzji zaznaczono, że implementacja opisanych algorytmów, przy uwzględnianiu bieżących ograniczeń kosztu, niezawodności i szybkości działania procesora koordynującego, będzie wymagała prawdopodobnie stworzenia struktury równoległej lub hierarchicznej.

[A17] Manseur Rachid, Doty Keith L. A Fast Algorithm for Inverse Kinematic Analysis of Robot Manipulators. The International Journal of Robotics Research, vol. 7, No. 3, June 1988

Artykuł dotyczy problemu kinematyki odwrotnej 6-DOF manipulatorów. Dla manipulatorów z obrotowymi pierwszym i ostatnim przegubami zagadnienie jest uproszczone przez dogodny wybór układów współrzędnych bazowego i narzędzia. Następnie pokazano jak niezmienniczość (inwariancja) iloczynu skalarnego pod wpływem rotacji pozwala na całkowite uproszczenie równań kinematycznych odwrotnych bez przemnożenia macierzy homogenicznych i wykonywania zwyczajowych rozwlekłych uproszczeń równań skalarnych. Taki przebieg uproszczenia także zapewnia lepsze wniknięcie w strukturę zagadnienia kinematycznego odwrotnego. Pokazano także jak te same techniki pozwalają na redukcję skomplikowania problemu do czterech równań z tylko czterema niewiadomymi. Choć w tym artykule pokazano tylko jak równania są wyrażone w bazowym albo pierwszym układzie wsp., to również pozostaje to w mocy dla każdego układu wsp. wzdłuż łańcucha manipulatora.

Artykuł także określa ważne związki dla ortogonalnych manipulatorów i pokazuje, że są tylko 24 różne klasy manipulatorów ortogonalnych ze zdolnością 6 DOF. Zaproponowano prostą notację dla 24 klas. Można pokazać, że 5 klas 6-DOF ortogonalnych manipulatorów z tylko dwoma z sześciu kątów skręcenia równych $\pi/2$ będzie dawało zawsze rozwiązania w formie zamkniętej.

Na koniec przedstawiono szybką iteracyjną metodę kinematyczną odwrotną opartą na jednowymiarowej technice Newton-Raphson'a. Ta metoda ani nie wymaga obliczania jacobianu ani odwrotności jacobianu manipulatora. Jej obliczeniowa łatwość pozwala na jej użycie do sterowania manipulatorem w czasie rzeczywistym. Może być zastosowana do każdego manipulatora który nie pozwala uzyskać rozwiązań w formie zamkniętej, lecz dla którego znajomość jednej ze zmiennych przegubów pozwala na rozwiązania w formie zamkniętej dla pozostałych zmiennych przegubów. Zbieżność właściwości i możliwe ulepszenia oraz ogólność tej metody są przedmiotem dalszych badań. Ta metoda typowo skupia 5 iteracji dla przybliżenia w obrębie 10° rozwiązania, chociaż zauważono, że zbieżność zależy w wysokim stopniu od pozycji narzędzia do rozwiązania jak również geometrii manipulatora. W pewnych rzadkich przypadkach jest wymagany znacznie dokładniejsze przybliżenie zanim może zająć konwergencja.

Jako przykłady artykuł prezentuje nowy sposób inwersji kinematycznej oparty na właściwościach macierzy ortogonalnych, zastosowany do rozwiązania w formie zamkniętej dla robota PUMA 560 i do manipulatora wymagającego techniki numerycznej, mianowicie robota GP66. Dla tego ostatniego wartości inwersji dla przegubu w punktach wzdłuż prostoliniowej trajektorii narzędzia znaleziono z przeciętnym czasem niższym niż 30 ms na punkt, na komputerze AT&T 3B2/310, tj. co najmniej klasę wielkości lepiej niż dla wielowymiarowych technik Newtona prezentowanych w literaturze.

[A18] Murthy T.S.R., Raghavedra D.R.: Inverse Kinematics through Search Techniques - A Study., ze zbiorów biblioteki CRIF

Artykuł prezentuje rozwiązania zagadnienia kinematycznego odwrotnego dwoma dogodnymi technikami poszukiwania, które zapewniają konwergencję (zbieżność), tj.:

- 1) Szukanie simpleksowe (simplex search),
- 2) Szukanie metodą kontrolowanego próbnego przyrostu (MTI search - Monitored Trial Increment search).

W proponowanych metodach startowa pozycja wewnętrzna jest przyjęta jako domyślna (założona, arbitralnie wybrane warunki początkowe poszukiwania). Odpowiednia pozycja narzędzia jest obliczana z wewnętrznej pozycji startowej na podstawie równań prostej kinematyki. Zakłada się przy tym, że struktura kinematyczna robota jest opisana poprzez podane zestawy parametrów D-H dla poszczególnych osi. W trakcie poszukiwań obliczana jest pozycja zewnętrzna z kolejnego próbnego rozwiązania, następnie przeprowadzane jest wnioskowanie i podejmowana decyzja, czy konkretne, kolejne próbne rozwiązanie jest lepsze od poprzedniego. Jako pozycję przyjmuje się pełny opis narzędzia w przestrzeni trójwymiarowej, tzn. położenie i orientację. Dla uproszczenia procedury porównania stosuje się jednak kryteria wyrażone w zależności tylko od położenia. Aby jednak nie zagubić informacji o orientacji wybiera się jakieś dwa odpowiednie punkty narzędzia (zalecane punkty końcowe) lub na jego przedłużeniu w przestrzeni. W każdej próbie obliczane są współrzędne tych wybranych punktów. Następnie jest obliczana odległość pomiędzy odpowiednimi wybranymi punktami w przestrzeni (obliczonymi z zadanej pozycji i orientacji oraz obliczonymi na podstawie rozwiązania w kolejnym kroku). Do oceny jakości rozwiązania próbnego brana jest średnia arytmetyczna tych odległości. Zasadniczym wyróżnikiem opisanej metody jest określanie kolejnego próbnego rozwiązania. W tym celu jest wykorzystywana jedna z dwóch nw. metod:

Simpleksowa metoda poszukiwania - jest to poszukiwanie kolejnych gradientów, przeznaczone do znajdowania max. i min. Szukanie simpleksowe bierze swą nazwę od foremnej figury geometrycznej używanej w procesach szukania, zwanej simpleksem. W dwu wymiarach jest ona równobocznym trójkątem, a w trzech wymiarach czworościanem. Problem maksymalizacji lub minimalizacji jest w tej metodzie sformułowany jako funkcja matematyczna. W pierwszym kroku wybierany jest zestaw wartości początkowych dla zmiennych niezależnych (pozycja startowa poszukiwań, dla robota może to być np. pozycja zerowa $q_1 = q_2 = \dots = q_n = 0$) - jest to bazowy punkt odniesienia. W punkcie tym obliczana jest wspomniana wyżej funkcja. Następnie na podstawie figury simpleksowej ustala się kolejną pozycję i w niej obliczana jest funkcja podlegająca optymalizacji. Wartości funkcji w obu położeniach są porównane. Jeśli kolejna pozycja jest lepsza, ona jest przyjmowana jako nowy punkt odniesienia i kontynuuje się szukanie. Jeśli aktualny punkt odniesienia jest lepszy, szukanie jest kontynuowane w tym samym kierunku z mniejszym krokiem albo jest zatrzymywane (kryterium stopu to osobny problem).

Szukanie metodą kontrolowanego próbnego przyrostu - jest to oryginalna metoda poszukiwania zaproponowana przez autorów artykułu. Polega ona na zmianie położenia w poszczególnych przegubach, przy czym przyrosty te są kontrolowane w ten sam sposób, jak operator-programista prowadzi robota do żądanej pozycji i orientacji używając programatora i wykorzystując ruch we współrzędnych wewnętrznych (oś po osi). Wychodząc z pozycji bazowej startowej położenie kolejnego przegubu jest powiększane o kąt D i $-D$ i obliczana jest odpowiadająca im wartość funkcji podmiotowej (średnia przesunięta odległość od zadanego położenia). Jeśli któraś z pozycji jest bliższa celu, modyfikowane jest położenie bazowe.

[A19] Sciavicco L., Siciliano B. A Dynamic Solution to The Inverse Kinematic Problem for redundant Manipulators. CH2413-3/87/0000/1081\$01.00@1987, IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, 1987

W artykule opisano rozwiązanie zagadnienia kinematyki odwrotnej dla manipulatorów redundantnych bazując na technice dynamicznej. Metoda jest rozszerzeniem na przypadek manipulatorów redundantnych algorytmu rozwiązania kinematyki odwrotnej proponowanego wcześniej przez autorów dla robotów nienadmiarowych. Pokazano, jak ograniczenia na współrzędne wewnętrzne i/lub ograniczenia związane z przeszkodami w przestrzeni roboczej mogą być systematycznie dołączane do algorytmu rozwiązania. W efekcie otrzymano wydajny, szybki, dynamiczny algorytm, który używa tylko obliczeń prostej kinematyki manipulatora. Dzięki temu metoda ma rozliczne zalety dynamicznego rozwiązania, takie jak ciągłość rozwiązania, redukcja czasu obliczania i generowanie prędkości członów bez dodatkowych kosztów. Metodę zilustrowano na przykładzie prostego płaskiego 4DOF manipulatora.

Ogólne rozwiązanie dynamiczne - zagadnienie kinematyki odwrotnej jest wyobrażone jako dynamiczne w celu otrzymania ogólnego algorytmu rozwiązania, który wymaga tylko obliczenia prostej kinematyki $\underline{x} = \underline{f}(q)$. Niech $\hat{q}(t)$ ($n \times 1$) będzie rozwiązaniem względem danej kartezyjskiej trajektorii $\underline{x}(t)$ ($m \times 1$). Wektor błędu $\underline{e}(t)$ może być określony między pożądaną trajektorią $\underline{x}(t)$ i aktualną trajektorią $\hat{\underline{x}}(t)$ otrzymaną z algorytmu stanu zmiennych $q(t)$:

$$\underline{e}(t) = \underline{x}(t) - \hat{\underline{x}}(t) \quad (6)$$

W celu zabezpieczenia zbieżności (konwergencji) $q(t)$ do $q(t)$ błąd jest rozszerzony (np. poprzez równanie na relację pomiędzy prędkościami członów q' i prędkościami kartezyjskimi \underline{x}').

Omijanie przeszkody - potrzebne jest wprowadzenie jednego lub więcej więzów (warunków) dla uniknięcia kolizji z przeszkodą. Założono, że przeszkody są modelowane jako wypukłe powierzchnie w przestrzeni 3D. Można przypuszczać, że człon ominął przeszkodę, jeśli jego minimalna odległość od przeszkody jest większa niż planowany wcześniej próg odległości. Jeśli wszystkie człony spełniają ten warunek, to nie ma powodu do modyfikowania bieżącego rozwiązania wzdłuż trajektorii, i algorytm dynamicznego rozwiązania będzie wybrany z ∞^{n-m} możliwych konfiguracji, w zależności od wstępnej konfiguracji członów. Jeśli odległość między jednym z członów a przeszkodą staje się mniejsza niż próg, bieżące rozwiązanie jest modyfikowane. Może być oczywiście kilka wartości progów odpowiednio dla każdego członu. Można to wziąć pod uwagę dla rodzajów sensorów używanych do wykrywania odległości, takich jak czujniki zbliżeniowe, kamery video itp.

Ograniczony zakres przemieszczenia złącza - zakłada się, że dla każdego stopnia swobody występuje ograniczenie zakresu przemieszczenia: $q_{i\min} \leq q_i \leq q_{i\max}$. Jeśli otrzymane rozwiązanie wykracza poza ten zakres, musi zostać zmodyfikowane. W praktyce wprowadza się tzw. wartość progową d_q z zamiarem, że jeśli odległość bieżącego q_i od jednej z dwóch granic będzie niższa od d_q , sterowanie wg obliczonego rozwiązania potrzeba będzie zmodyfikować.

Rozwiązanie połączone - wprowadzono rozwiązanie zagadnienia kinematycznego odwrotnego dla manipulatorów redundantnych, w którym wektor \underline{x} przestrzeni zadania jest rozszerzony o składniki związane z aktywną przeszkodą oraz wynikające z ograniczeń przemieszczenia dla każdego złącza.

[A20] Sciavicco L., Siciliano B. A Solution Algorithm to the Inverse Kinematic Problem for Redundant Manipulators. IEEE Journal on Robotics and Automation, vol. 4, NO. 4, August 1988

W artykule opisano rozwiązanie zagadnienia kinematyki odwrotnej dla manipulatorów redundantnych bazując na technice dynamicznej. Pokazano, jak redundancję można wykorzystać do włączenia ograniczeń zakresu ruchu poszczególnych stopni swobody i/lub otrzymania trajektorii wolnych od kolizji z przeszkodami, lub też do otrzymania konfiguracji pozwalającej na unikanie kinematycznych osobliwości. W wyniku otrzymano wydajny, szybki, dynamiczny algorytm, który używa tylko prostej kinematyki manipulatora, i daje takie korzyści, jak ciągłość rozwiązania, znaczna redukcja czasu obliczania i generowanie prędkości przegubów bez dodatkowych kosztów.

Rozstrzygającym punktem dla analizy manipulatora robota i syntezy sterowania jest transformacja współrzędnych przestrzeni roboczej we współrzędne przestrzeni złącza, tj. rozwiązanie zagadnienia kinematyki odwrotnej. Najprostszym sposobem rozwiązania problemu kinematyki odwrotnej jest otrzymanie równania w postaci zamkniętej na $q = f^{-1}(x)$, nie może on jednak być zastosowany do wszystkich manipulatorów. Alternatywną metodą jest tzw. metoda sterowania jakobianowego (Jacobian control method) dla manipulatorów redundantnych. Pojęciowo najprostsze są rozwiązania oparte na użyciu uogólnionych inwersji proponowane dla minimalizacji zużycia energii przez serwomotor i omijania przeszkody. Zupełnie inne są techniki iteracyjne oparte na algorytmie ograniczonej nieliniowej optymalizacji używające zmodyfikowanej metody Newton-Raphsona.

W artykule rozszerzono algorytm rozwiązania kinematyki odwrotnej, proponowany już wcześniej przez tych i innych autorów, na przypadek manipulatorów redundantnych. Algorytm rozwiązania jest całkowicie ogólny i niezależny od manipulatora.

Rozwiązywanie zagadnienia kinematycznego odwrotnego z omijaniem przeszkody i/lub ograniczonym zakresem przegubu, które dają kilka ograniczeń, polega na systematycznym włączaniu tych ograniczeń do algorytmu rozwiązania, pod warunkiem jednak, że zadany wektor przestrzeni jest odpowiednio powiększony. Dla uniknięcia kolizji z przeszkodą potrzebne jest wprowadzenie jednego lub więcej ograniczeń. Można przypuszczać, że przegub ominął przeszkodę, jeśli jego minimalna odległość od przeszkody jest większa niż planowany wcześniej próg odległości. Jeśli wszystkie przeguby spełniają ten warunek, to nie ma powodu do modyfikowania bieżącego rozwiązania wzdłuż trajektorii, i algorytm dynamicznego rozwiązania będzie wybrany z ∞^{n-m} możliwych konfiguracji, w zależności od wstępnej konfiguracji przegubów. Jeśli odległość między jednym z przegubów a przeszkodą staje się mniejsza niż próg, bieżące rozwiązanie jest modyfikowane. Pojęciowo podobne jest aktywowanie mechanicznego ograniczenia na zmienną przegubu. Założono, że zmienna przegubu jest kinematycznie ograniczona dwiema krańcowymi wartościami. Jeśli zmienna przegubu zbliża się do jednej z granic podczas pokonywania przez narzędzie wcześniej zaplanowanej trajektorii, otrzymane rozwiązanie jest modyfikowane.

Osiągnięcie proponowanego rozwiązania pokazano dla przypadku prostego płaskiego manipulatora 4DOF. W dodatku przedstawiono jego równania prostej kinematyki.

[A21] Sciavicco L., Siciliano B. Coordinate Transformation: A Solution Algorithm for One Class of Robots. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. SMC-16, NO. 4, July/August 1986

Wprowadzono podział manipulatorów robotów ze względu na konfigurację trzech ostatnich stopni swobody (nadgarstek). Wyróżniono trzy typy rozwiązań:

- a) concurrent (zbieżny) - wszystkie trzy osie nadgarstka przecinają się w jednym punkcie
- b) two-by-two intersecting - pierwsza oś przecina się z drugą, druga z trzecią, ale pierwsza i trzecia nie mają wspólnego punktu,
- c) nonconverging (rozbieżny) - osie nie mają punktów wspólnych.

Przypadek a) jest prosty - na podst. pozycji zewnętrznej (orientacja) wyznacza się analitycznie punkt przecięcia osi nadgarstka. Z położenia tego punktu wyznacza się wartości osi wcześniejszych. Przypadek b) jest już skomplikowany - nie da się opracować analitycznego rozwiązania odwrotnego problemu kinematycznego. Podobnie jest z przypadkiem c).

W artykule autorzy zajęli się przypadkiem b). Bazują przy tym na robocie o 6-ciu stopniach swobody. Zaproponowano dekompozycję zadania na dwa etapy:

- 1) obliczenie $\hat{q}_p \in \mathbb{R}^4$ - aby to było możliwe trzeba wprowadzić dodatkowy warunek
- 2) obliczenie $\hat{q}_h \in \mathbb{R}^2$

Autorzy w konkluzji stwierdzają, że metoda ta daje się rozciągnąć na roboty redundantne.

[A22] Seraji H., Long M. K., Lee t. S. Motion Control of 7-DOF Arms: The Configuration Control Approach. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 9, NO. 2, April 1993

Manipulator o 7 stopniach swobody (DOF - Degree of Freedom) jest bardzo dobrym przykładem do badań i analiz problemów sterowania robotów redundantnych. Po pierwsze 7 stopni swobody jest to najmniejsza możliwa nadmiarowość robotów operujących w przestrzeni trójwymiarowej. Po drugie również ramię człowieka ma 7 stopni swobody, można więc wiele rozważań odnosić właśnie do ludzkiej ręki. Nadmiarowość w kinematyce pozwala uzyskać ruchy bardziej zgrabne, zręczne. Z drugiej strony praktyczne wykorzystanie tej możliwości stwarza poważne problemy. Wynikają one z niejednoznaczności rozwiązania odwrotnego zadania kinematycznego. Inaczej mówiąc konkretna pozycja zewnętrzna końcówki roboczej, narzędzia robota może być uzyskana na nieskończenie wiele sposobów z punktu widzenia współrzędnych wewnętrznych robota. Aby układ sterowania robota mógł wybrać odpowiednie rozwiązanie trzeba wprowadzić dodatkowe warunki takie jak:

- omijanie przeszkód,
- minimalizacja sił w napędach (serwomotorach),
- omijanie osobliwości kinematyki,
- omijanie ograniczeń stopni swobody (przegubów).

Opracowano wiele schematów, metod rozwiązywania kinematyki odwrotnej. Większość z nich sprowadza się do lokalnej lub globalnej optymalizacji różnych kryteriów. Duża grupa metod wykorzystuje tzw. pseudoodwrotność jakobianu do obliczenia chwilowej zależności między prędkością przegubów (wewnętrzna) i efektora (zewnętrzna). Alternatywna klasa rozwiązań opiera się na rozszerzeniu zadania. Jeden z wariantów przewiduje rozszerzenie zadania o sterowanie konfiguracją. W podejściu tym trajektoria jest śledzona przez zestaw funkcji kinematycznych, które charakteryzują konfigurację manipulatora. Artykuł prezentuje zastosowanie tej właśnie metody do sterowania ruchem robota redundantnego o 7 stopniach swobody.

[A23] Wampler Ch. W. Inverse Kinematics Functions for Redundant Manipulators. CH2413-3/87/0000/0610\$01.00@1987, IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, 1987

W artykule zaprezentowano ogólne przybliżenie wykorzystania funkcji kinematycznych odwrotnych do sterowania manipulatorami redundantnymi. Podstawowym problemem jest znalezienie takiej funkcji kinematyki odwrotnej i przestrzeni roboczej, żeby stosunek prędkości przegubu do prędkości w przestrzeni roboczej był ograniczony. Określenie takiej osiągalnej przestrzeni roboczej prowadzi do problemów optymalizacji dążącej do redukcji tego ograniczenia.

Jedną z proponowanych metod kinematycznej inwersji jest sposób *funkcji kinematycznej odwrotnej* [Baker i Wampler 1986]. Składa się ona z dwóch kroków:

- 1) wyboru osiągalnej przestrzeni roboczej w przestrzeni operacyjnej $W \subset X$
- 2) skonstruowania różniczkowalnej funkcji kinematyki odwrotnej, $g : W \rightarrow T^n$, z przestrzeni roboczej (zewnątrznej) do przestrzeni członu (wewnętrznej). Różniczkowalność g jest niezbędna, ponieważ przyspieszenia członów są ograniczone, a zatem prędkości członów muszą być ciągłe.

Jest kilka dróg implementacji funkcji odwrotnej. Najprostsza to podział współrzędnych członu na dwie części: współrzędne pierwotne, $q_1 \in T^{n-m}$, i współrzędne wtórne $q_2 \in T^m$, gdzie n jest całkowitą liczbą członów a m jest rozmiarem przestrzeni operacyjnej. Zgodnie z tym element przestrzeni członu oznaczono jako $q = (q_1 q_2)$. Przypuśćmy, że rozwiązanie inwersji ma postać zamkniętą dla współrzędnych wtórnych przy danych współrzędnych pierwotnych, a zadany punkt docelowy p w przestrzeni operacyjnej jest taki, że ma $g_2(q_1, p)$ taką, że $f(q_1, g_2(q_1, p)) = p$ w pewnym przedziale q_1 i p . Wtedy współrzędne pierwotne mogą być sprecyzowane jako odpowiednia funkcja $q_1(p) : W \rightarrow T^{n-m}$ w osiągalnej przestrzeni roboczej W , co daje kompletną funkcję kinematyki odwrotnej:

$$\begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \end{pmatrix} = g(p) = \begin{pmatrix} g_1(p) \\ g_2(g_1(p), p) \end{pmatrix}$$

Właściwa redundancji funkcja g_1 jest dowolna tak długo jak pozostaje w przedziale, w którym g_2 jest dobrze określone. Metoda alternatywna, użyteczna dla ramion nie posiadających zamkniętej postaci wtórnej inwersji, służy do zbudowania całkowitej inwersji g , w postaci tablicy, używając rozwiązań numerycznych do zabezpieczenia, żeby $f(g(p_i)) = p_i$ w drobnej siatce punktów $p_i \in W$.

Elementarny przypadek, w którym istnieje wyrażenie o postaci zamkniętej na g_2 zachodzi wtedy, kiedy nieredundantny manipulator z funkcją inwersji w postaci zamkniętej jest przerobiony na redundantny przez dodanie członów do jednego z końców łańcucha kinematycznego: dodatkowe człony mogą być wybrane jako pierwotne człony, a początkowe rozwiązanie inwersji może być zastosowane do rozwiązania dla pozostałych członów. Dla przestrzeni operacyjnej o 6 stopniach swobody składającej się z pozycji i orientacji narzędzia, prosta funkcja kinematyczna może być napisana przy użyciu standardowej notacji macierzy 4×4 Denavit-Hartenberga jako $f(q_1, \dots, q_n) = A_1(q_1)A_2(q_2) \dots A_n(q_n) = B$.

Jeśli człony $k, \dots, k+5$ stanowią manipulator nieredundantny z funkcją inwersji, wtedy q_k, \dots, q_{k+5} mogą być znalezione jako współrzędne wtórne, a wtórna funkcja inwersji g_2 jest znajdowana przez zastosowanie nieredundantnej funkcji odwrotnej do rozwiązania

$$A_k(q_k) \dots A_{k+5}(q_{k+5}) = A_{k-1}^{-1}(q_{k-1}) \dots A_1^{-1}(q_1) B A_n^{-1}(q_n) \dots A_{k+6}^{-1}(q_{k+6}) \quad (3)$$

Podobnie dla innych przestrzeni operacyjnych.

[A24] Withney Daniel E. Resolved Motion Rate Control of Manipulators and Human Prostheses. IEEE Transactions on Man-Machine Systems, vol. MMS-10, No. 2, June 1969

W artykule zanalizowano kinematykę manipulatorów zdalnych i protez ludzkich kończyn celem wyprowadzenia rozwiązania sterowania szybkością ruchu. Zaproponowano rozwiązania zadań koordynacji ruchu z zadanymi ograniczeniami i oszacowanie sił napotykanymi przez sterowane ramię.

Sterowanie prędkością jest jedną z najpowszechniejszych dróg sterowania zdalnym manipulatorem; operator ustala kierunek i właściwą prędkość ruchu przy pomocy joysticka lub zestawu przełączników. Inną powszechną metodą jest sterowanie odtwarzające, w którym operator kieruje modelem manipulatora (zazwyczaj w pełnej skali), zdalnie będzie odwzorowywana wytyczona droga. Ma ona pewne atrybuty przestrzennej zgodności i siłowego sprzężenia zwrotnego. Kiedy manipulator jest poruszany silnikami, a nie przez operatora, powstaje problem koordynacji serwowatorów. W sterowaniu odtwarzającym problem jest rozwiązany automatycznie, jeśli urządzenie główne i urządzenie podporządkowane są geometrycznie podobne, ponieważ koordynowane sygnały ruchu silników mogą być przekazane wprost z przetworników do urządzenia głównego. Ze sterowaniem prędkością jest trudniej, kilka silników musi się poruszać jednocześnie z różnymi i zmiennymi w czasie prędkościami w celu otrzymania równomiernego ruchu ramienia wzdłuż jednej współrzędnej.

Takie sposoby podejścia do problemu, przy którym w joysticku są indywidualne przełączniki silników których stopnie swobody odpowiadają tym dla manipulatora, lub sterowanie odwzorowujące, nie nadają się m.in. do sterowania manipulatorami redundantnymi.

Matematyka manipulatorów i proponowany układ sterowania prędkością

Zmienne zewnętrzne, takie jak 6 współrzędnych ramienia + ew. położenia "łokciowe" zgrupowano w wektor x , wtedy dla każdego manipulatora x jest jakąś wektorową funkcją wektora ustawień silników θ . Ustawienia silników są związane z kątami członów zazwyczaj liniowo. Kiedy θ jest wyższego rzędu niż x , manipulator jest redundantny. Manipulator nieredundantny możemy uczynić redundantnym, wystarczy tylko pominięcie przy sterowaniu pewnej części x (analogicznie można zrobić z manipulatora redundantnego nieredundantny "zamrażając" dowolnie pewne ustawienia silników lub dodając do wektora x pewne współrzędne ręki lub "łokciowe"). Różniczkując względem czasu $\dot{x} = f(\theta)$ otrzymujemy iloczyn macierzy jacobianowej funkcji f względem θ i pierwszej pochodnej $\dot{\theta}$. Rozłożony ruch wymaga jednoczesnego działania kilku silników z różnymi, niestałymi prędkościami (przez analogię z grupą mięśni w ramieniu). Jeśli wymiar $x =$ wymiarowi θ , to możemy syntetyzować te prędkości przez odwrócenie jacobianu (jeśli odwrotność taka istnieje) dla otrzymania pierwszej pochodnej $\dot{\theta}$. Strategia sterowania jest następująca: odpowiadający każdemu przełącznikowi składnik pochodnej \dot{x} - wyjście z przełącznika podajemy poprzez odwrotność jacobianu do silników jako rozkaz prędkości silnika. Możemy np. zmienić orientację bez zmiany położenia po prostu przez określenie prędkości 0 dla współrzędnych położenia w pochodnej \dot{x} . Jeśli wymiar $x <$ wymiaru θ , odwrotność jacobianu nie jest określona. Aby ominąć tę trudność, można "zamrozić" dowolnie współrzędne x lub dodać jakieś "łokciowe" współrzędne, można też określić kryterium optymalności, które manipulator ma spełnić w czasie ruchu, np. minimalizując "koszt" G ruchu jako ważoną chwilową energią kinetyczną układu. Dołączając wyrażenie na pochodną \dot{x} do wyrażenia na G z mnożnikami Lagrange'a i przyjmując, że pochodna \dot{x} jest znana otrzymamy wyrażenie na optymalną pochodną $\dot{\theta}$.

[A25] Yeghiazarians V. K. A New Iterative Technique for Control of Kinematically Redundant Robots. 25th ISIR, Hanover 1994

W artykule dokonano na wstępie krótkiego przeglądu proponowanych w literaturze metod rozwiązywania odwrotnego problemu kinematycznego dla robotów redundantnych. Następnie zaprezentowano nowe podejście do tego zagadnienia. Przedstawiono metodę iteracyjną wykorzystującą technikę sterowania rozmytego. Przyjmując warunki początkowe (wartości współrzędnych wewnętrznych mogą np. pokrywać się z pozycją startową) rozwiązuje się zadanie kinematyczne wprost. Otrzymuje się pozycję zewnętrzną robota (niekoniecznie jest to położenie i orientacja, można stosować inne formy opisu). Odejmuje się ją od pozycji zadanej. Otrzymany w ten sposób wynik - błąd pozycji - jest daną wejściową dla sterownika typu fuzzy. Danymi wejściowymi są również aktualne wartości współrzędnych wewnętrznych. Wszystkie dane wejściowe są normowane do wielkości akceptowanych przez sterownik na wejściu. Na ich podstawie, stosując odpowiednie, zaprogramowane wcześniej reguły, sterownik oblicza przyrosty współrzędnych wewnętrznych. Są one dodawane do wartości aktualnych i w ten sposób otrzymuje się zestaw współrzędnych wewnętrznych w kolejnym kroku iteracji. Kryterium stopu algorytmu jest sprawdzane w sterowniku. Naturalnym wydaje się, że zawiera ono ocenę błędu pozycji zewnętrznej.

Autor zaznacza, że metoda jest bardzo szybko zbieżna. Jako zaletę wymienia możliwość przełożenia słownie opisanej strategii sterowania na reguły działające na poziomie sterownika robota.

Podstawowym problemem metody jest odpowiednie dobranie reguł wnioskowania w sterowniku. niewykluczone, że dobór taki trzeba by przeprowadzać dla każdego typu robota osobno.

Wydaje się, że metoda ta może być skuteczna przy rozwiązywaniu problemów w projekcie.

CZEŚĆ II

OPRACOWANIE INTERFEJSU SOFTWARE'OWEGO W ŚRODOWISKU BORLAND C++ DO PAKIETU SYMULACYJNEGO ROBCAD.

1. Wprowadzenie

Prace nad kinematyką robotów prowadzone są zawsze w kilku płaszczyznach. Poprzedza je zawsze rozpoznanie tematu. Obejmuje ono m.in. dokładną specyfikację problemu, określenie zadań niezbędnych do wykonania, aby osiągnąć zamierzony końcowy cel. Następnie przychodzi faza poszukiwania metod rozwiązania postawionych problemów. Mieści się w tym przegląd literatury, innych dostępnych opracowań z danej dziedziny. Spośród określonego w ten sposób zbioru podejść, metod wybiera się zdaniem autorów pracy najwłaściwszą. Następnie wybrana metoda musi zostać zaadoptowana do rozwiązania problemu postawionego w pracy. Rozwiązanie musi być opracowane najpierw teoretycznie, na papierze. Następnie wykonywane jest oprogramowanie realizujące przygotowany algorytm. Oprogramowanie to jest najpierw sprawdzane w symulacjach komputerowych. W tym celu trzeba odpowiednio przygotować testy, które wykażą przydatność lub nie wybranej metody lub pozwolą wykryć błędy w jej realizacji. Dopiero metoda sprawdzona w symulacji może być implementowana i testowana w urządzeniu rzeczywistym - robocie. Próby z robotem są zawsze okazją do ostatecznej weryfikacji metody rozwiązania postawionego w pracy problemu.

Celem projektu INGRID jest zbudowanie inteligentnego robota bramowego przeznaczonego do prac przy dystrybucji materiałów nuklearnych. Układ sterowania takiego robota musi mieć możliwość planowania trajektorii. Generator trajektorii operuje oczywiście we współrzędnych kartezjańskich. Aby obliczona trajektoria mogła być przekazana do realizacji, musi być rozwiązany problem kinematyki odwrotnej robota, tzn. trzeba opracować metodę przeliczania pozycji robota wyrażonej we współrzędnych kartezjańskich na współrzędne wewnętrzne. Zadania tego typu są od lat znane w teorii sterowania robotów. Problem jest w tym, że manipulator robota INGRID ma 11 stopni swobody. Dla tej klasy robotów, tzw. redundantnych nie istnieją metody wyprowadzenia wzorów analitycznych rozwiązujących odwrotne zadanie kinematyczne.

Prace nad kinematyką w projekcie INGRID również przebiegają wg przedstawionego na wstępie schematu. Z uwagi na trudność problemu, a przede wszystkim na fakt, że docelowy robot pracuje w środowisku niebezpiecznym pierwszorzędного znaczenia w pracach tych nabrały symulacje komputerowe. Dlatego też prace nad generatorem trajektorii (systemem planowania trajektorii) prowadzone są przy wykorzystaniu bardzo nowoczesnego i wydajnego systemu projektowania, modelowania i symulacji robotów przemysłowych ROBCAD. System ten jest zainstalowany w laboratorium CRIF w Brukseli. Ponieważ zasadnicze prace nad kinematyką odwrotną są prowadzone w PIAP w Warszawie, zdecydowano, że pierwsze symulacje będą wykonywane w Borland C++, a następnie gotowe, uruchomione i wstępnie przetestowane procedury będą dalej sprawdzane w środowisku ROBCAD. W tym celu należy opracować interfejs software'owy pomiędzy oboma środowiskami. Jest to celem prac, które opisuje niniejsze opracowanie.

2. Możliwości implementacji własnego rozwiązania kinematyki odwrotnej w systemie ROBCAD.

Wraz z systemem ROBCAD dostarczany jest moduł o nazwie Open KIN (ROBCASD Open Kinematics Environment). Jest to narzędzie umożliwiające tworzenie i oprogramowanie własnych algorytmów rozwiązujących odwrotne zadanie kinematyczne dla manipulatora robota. Dla każdego robota rozwiązanie odwrotnej kinematyki, zdefiniowane przez użytkownika i wygenerowane przez Open KIN może zastąpić standardowe rozwiązanie wygenerowane przez ROBCAD.

Interfejs do Open KIN wymaga podania nazw komponentów tj. bieżącego gniazda i nazwy robota w gnieździe. Dzięki wprowadzeniu różnych nazw komponentów możliwe jest używanie tego samego modułu Open KIN dla różnych robotów, które wymagają różnych rozwiązań problemu odwrotnego. Możliwe jest więc napisanie wielu modułów Open KIN dla różnych robotów i uruchamianie ich podczas jednej sesji.

Algorytm Open KIN może być albo niezależnym modułem, albo częścią składową aplikacji ROBCAD/Rose (jest to moduł dodatkowy do ROBCAD-a, umożliwiający symulację własnych aplikacji użytkownika, dostarcza bogaty zestaw narzędzi do komunikacji z operatorem, tzw. 'User-interface tools', oraz procedury dostępu do bazy danych pakietu ROBCAD). W obu przypadkach, gdy rozwiązanie odwrotne użytkownika jest używane dla danego robota, każde odwołanie do rozwiązania odwrotnego zgłaszane przez menu ROBCAD-a, aplikację lub interpreter jest kierowane do Open KIN. Przykłady dostarczane z pakietem zawierają komendy ROBCAD-a ('*move to location*', '*robot jog*', '*solutions*') jak też funkcje w ROBCAD/Rose ('*aplInverse*', '*aplInverseByFrame*').

Jeśli algorytm Open KIN jest częścią aplikacji REOBCAD/Rose, może on być używany przez dowolne wewnętrzne wywołanie ROBCAD/Rose wymagające rozwiązania odwrotnego, które użytkownik stworzy w swojej aplikacji.

W przeciwieństwie do standardowego rozwiązania odwrotnego w ROBCAD/Rose, wynik algorytmu Open KIN nie jest sprawdzany i dlatego może on zwracać dowolne rozwiązanie. Użytkownik ma w związku z tym możliwość napisać algorytm, który zwraca rozwiązanie częściowe lub przybliżone.

3. Interfejs odwrotnego zadania kinematyki użytkownika.

System ROBCAD pracuje w środowisku systemu operacyjnego UNIX. Moduły użytkownika muszą być pisane w języku C, wg standardu ANSI. Moduł Open KIN wymaga specyficznej postaci wywołania funkcji rozwiązującej odwrotne zadanie kinematyczne wg algorytmu użytkownika. Wygląda ona następująco:

```
int k_user_inverse      (component_name, desired_tcpf_location, desired_tool_location,
limits_flag, location_mask, solutions, no_of_solutions)
```

tName	component_name;	* input *\
tFrame	desired_tcpf_location;	* input *\
tFrame	desired_tool_location;	* input *\
int	limits_flag;	* input *\
int	location_mask;	* input *\
tPoseArray	solutions;	* output *\
int	no_of_solutions;	* output *\

Wszystkie wymienione parametry wejściowe są zawarte w standardowym wywołaniu funkcji kinematyki odwrotnej w systemie ROBCAD. Oczywiście jednak nie wszystkie one muszą być przez algorytm użytkownika wykorzystywane.

Funkcja *k_user_inverse* musi zwracać wartość 1. Każda inna wartość jest interpretowana przez procedurę wywołującą jako sygnalizacja błędu.

Typy *tName*, *tFrame* i *tPoseArray* są specyficznymi typami zdefiniowanymi w systemie ROBCAD i dostępnymi we wszystkich jego modułach.

Zostaną teraz pokrótce omówione poszczególne parametry wywołania funkcji *k_user_inverse*.

component_name

Jest to parametr zawierający pełny opis symulowanego robota, tzn. nazwę gniazda i nazwę robota w gnieździe.

desired_tcpf_location

Zadana pozycja robota - pełny opis położenia TCP i orientacji narzędzia.

desired_tool_location

Zadana pozycja robota - tylko położenie TCP bez orientacji narzędzia. Użytkownik może wg własnego uznania wykorzystywać tylko jedną z danych wejściowych *desired_tcpf_location* lub *desired_tool_location* w zależności od postaci i wymagań zaprojektowanego algorytmu rozwiązywania kinematyki odwrotnej.

limits_flag

Zmienna ta informuje czy jest włączony mechanizm sprawdzania ograniczeń, tzw. *limits check*. Jeśli tak to *limits_flag* = 1. W przeciwnym wypadku *limits_flag* = 0. Wynik sprawdzania ograniczeń, jeśli mechanizm został włączony, pojawia się w prawym dolnym rogu ekranu ROBCAD-a.

location_mask

Jest to macierz kwadratowa 4x4, której elementy są binarne 0 lub 1. Czwarty wiersz tej macierzy nie jest wykorzystywany. Pierwsze trzy kolumny odpowiadają za orientację, ostatnia z apozycję. Parametr ten umożliwia użytkownikowi wybór różnych rozwiązań w zależności od tego w jakiej sytuacji funkcja została wywołana (ruch do pozycji zadanej, ruch wzdłuż zadanej trajektorii, ruch wzdłuż osi x, y, lub z bazowego układu współrzędnych robota).

solutions

Tablica wyjściowa, zawierająca do ośmiu pozycji, będących rozwiązaniami wygenerowanymi przez zastosowany algorytm. Każda pozycja składa się z maks. 32 wartości położenia poszczególnych stopni swobody opisujących pozycję wewnętrzną robota..

no_of_solutions

Zmienna wyjściowa, której wartość określa liczbę rozwiązań wygenerowanych przez algorytm kinematyki odwrotnej. Wartość ta jest liczbą całkowitą nieujemną. Jeśli $no_of_solutions = 0$, to znaczy, że algorytm nie znalazł rozwiązania.

4. Implementacja, uruchomienie i wykorzystanie interfejsu pomiędzy Borland C++ i ROBCAD.

W chwili obecnej nie ma możliwości sprawdzania wyników działania algorytmu kinematyki odwrotnej w symulacji graficznej na komputerze PC. Dlatego też zdecydowano, że programy symulacyjne będą zapisywały wyniki do zbioru w formie tabeli. Ogólna postać takiego programu będzie więc następująca:

```
main (plik_we, plik_wy)
```

```
    k_user_inverse (component_name, desired_tcpf_location, desired_tool_location,  
                  limits_flag, location_mask, solutions, no_of_solutions)
```

```
    it_back (t_mac, sin, cos, teta)
```

k_user_inverse jest funkcją interfejsową zgodną z zaleceniami systemu ROBCAD. W pliku wejściowym *plik_we* są zapisywane dane dla programu, tj:

- liczba stopni swobody manipulatora,
- parametry Denavita-Hartenberga opisujące strukturę kinematyczną manipulatora,
- sposób podania zadanej pozycji zewnętrznej (tylko położenie TCP, położenie TCP + orientacja jako trzy kąty Eulera: nutacja, precesja i obrót lub pełna macierz pozycji układu współrzędnych związanego z kołnierzem robota)
- zadana pozycja zewnętrzna

W pliku wyjściowym *plik_wy* podawane są wyniki działania programu. Funkcja *it_back* jest podstawową procedurą realizującą rozwiązanie kinematyki odwrotnej. Jej dane wejściowe są zapisane w macierzy pozycji układu współrzędnych związanego z kołnierzem robota - *t_mac*. Jako wynik otrzymujemy trzy wektory:

sin - wektor sinusów kątów osiowych; dla pary kinematycznej przesuwnej odpowiedni element ma wartość 2,

cos - wektor cosinusów kątów osiowych; dla pary kinematycznej przesuwnej odpowiedni element ma wartość 2,

teta - wektor współrzędnych wewnętrznych: kąty w mierze łukowej, odległości w milimetrach.

Trzeba zaznaczyć, że w programie w Borland C++ dane wejściowe będą przekazywane pomiędzy programem głównym a modułem inwersji kinematyki poprzez zmienne globalne, podobnie jak to ma miejsce w ROBCAD-zie.

Całość oprogramowania zostanie napisana w standardzie ANSI C, aby możliwe było przeniesienie wprost procedur do systemu ROBCAD.

W pierwszych próbach zostanie uruchomione oprogramowanie realizujące rozwiązanie kinematyki odwrotnej dla robota typu IRb/URP-6. Otrzymane wyniki będą mogły być porównane z wynikami z ROBCAD-a, ponieważ manipulator tego robota znajduje się w standardowej bibliotece systemu jako 'irb6_5'. Próbę taką przewiduje się wykonać podczas kolejnego spotkania w CRIF, w połowie listopada 1994. Jej efektem powinna być ostateczna weryfikacja interfejsu.

ZALĄCZNIK 1**SPIS POZYCJI LITERATUROWYCH****A. POZYCJE PODSTAWOWE**

- [A1] Andersson R. L. Computing the Feasible Configurations of a 7-DOF Arm Subject to Joint Limits. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 9, NO. 2, April 1993
- [A2] Ang M. H., Tourassis V. D. Singularity Coupling in Robotic Manipulators. 7803-0078/91/0600-0683\$01.00@1991 IEEE
- [A3] Baillieul J. Kinematic Programming Alternatives for Redundant Manipulators. Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, St. Louis, 1985.
- [A4] Baker D. R., Wampler Ch. W. Some Facts Concerning The Inverse Kinematics of Redundant Manipulators. CH2413-3/87/0000/0604\$01.00@1987, IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, 1987
- [A5] Baker D. R., Wampler II Ch. W. On the Inverse Kinematics of Redundant Manipulators. The International Journal of Robotics Research, vol. 7, No. 2, March/April 1988
- [A6] Bouffouix St., Bogaert M. Real-Time Navigation and Obstacle Avoidance for Teleoperated Vehicles. Proceedings of SPIE's International Symposium on Optical Tools for Manufacturing, Boston 1992
- [A7] Chan T. F., Dubey R. V. Generation of Joint Trajectory Requiring Lower Joint Velocities for A Redundant Manipulator. 7803-0078/91/0600-1217\$01.00@1991 IEEE
- [A8] Charentus S., Renaud M. Modelling and Control of a Modular, Redundant Robot Manipulator. Experimental Robotics 1-st Int. Symposium, Montral, June 19-21, 1989
- [A9] Cheng F. T., Chen T. H., Sun Y. Y. Inverse Kinematic Colutions for Redundant Manipulators Using Compact Formulation. IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems IROS'91, Osaka 1991
- [A10] Chevallereau C., Khalil W. Efficient Method for The Calculation of The Pseudo Inverse Kinematic Problem. CH2413-3/87/0000/1842\$01.00@1987, IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, 1987
- [A11] Chinnasamy R., Nataraju B. S., Mruthyunjaya Optomisation Techniques for Inverse Kinematics Solution. , ze zbiorów biblioteki CRIF
- [A12] Chirikjian G., Burdick J. W. Hyper-Redundant Robot Mechanisms and Their Applications. IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems IROS'91, Osaka 1991
- [A13] Chung W. J., Youm Y., Chung W. K. Inverse Kinematics of Planar Redundant Manipulators via Virtual Links with Configuration Index. Journal of Robotics Systems 11(2), 117-128 (1994)
- [A14] Gosselin M. C., Cote J., Laurendeau D. Inverse Kinematic Functions for Approach and Catching Operations. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 23, NO. 3, May/June 1993

- [A15] Grudič G. Z., Lawrence P.D. Iterative Inverse Kinematics with Manipulator Configuration Control. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 9, No. 4, August 1993. 1042-926X/93\$03.00 © 1993 IEEE
- [A16] Liégois Alain. Automatic Supervisory Control of the Configuration and Behavior of Multibody Mechanisms. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. SMC-7, No. 12, December 1977
- [A17] Manseur Rachid, Doty Keith L. A Fast Algorithm for Inverse Kinematic Analysis of Robot Manipulators. The International Journal of Robotics Research, vol. 7, No. 3, June 1988
- [A18] Murthy T.S.R., Raghavedra D.R.: Inverse Kinematics through Search Techniques - A Study., ze zbiorów biblioteki CRIF
- [A19] Sciavicco L., Siciliano B. A Dynamic Solution to The Inverse Kinematic Problem for redundant Manipulators. CH2413-3/87/0000/1081\$01.00@1987, IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, 1987
- [A20] Sciavicco L., Siciliano B. A Solution Algorithm to the Inverse Kinematic Problem for Redundant Manipulators. IEEE Journal on Robotics and Automation, vol. 4, NO. 4, August 1988
- [A21] Sciavicco L., Siciliano B. Coordinate Transformation: A Solution Algorithm for One Class of Robots. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. SMC-16, NO. 4, July/August 1986
- [A22] Seraji H., Long M. K., Lee t. S. Motion Control of 7-DOF Arms: The Configuration Control Approach. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 9, NO. 2, April 1993
- [A23] Wampler Ch. W. Inverse Kinematics Functions for Redundant Manipulators. CH2413-3/87/0000/0610\$01.00@1987, IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, 1987
- [A24] Withney Daniel E. Resolved Motion Rate Control of Manipulators and Human Prostheses. IEEE Transactions on Man-Machine Systems, vol. MMS-10, No. 2, June 1969
- [A25] Yeghiazarians V. K. A New Iterative Technique for Control of Kinematically Redundant Robots. 25th ISIR, Hanover 1994

B. POZYCJE UZUPEŁNIAJĄCE

- [B1] Ait-Ahmed M., Renaud M. Polynomial Representation of the Forward Kinematic of 6 D.O.F. Parallel Robot., ze zbiorów biblioteki CRIF
- [B2] Bazerghi A., Goldenberg A. A., Apkarian J. An Exact Kinematic Model of Puma 600 Manipulator. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. SMC-14, No. 3, May/June 1984
- [B3] Chiaverini S., Egeland O., Kanestrom R. K. Achieving user-defined accuracy with damped least-squares inverse kinematics. 7803-0078/91/0600-0672\$01.00@1991 IEEE
- [B4] Doty K. L., Melchiorri C., Bonivento C. A Theory of Generalized Inverses Applied to Robotics. The International Journal of Robotics Research, vol. 12, NO. 1, February 1993
- [B5] Dubey R., Luh J. Y. S. Redundant Robot Control for Higher Flexibility. CH2413-3/87/0000/1066\$01.00@1987, IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, 1987
- [B6] Egeland O. Task-Space Tracking with Redundant Manipulators. IEEE Journal on Robotics and Automation, vol. RA-3, NO. 5, October 1987
- [B7] Falkenauer E. Motion Planning of Redundant Robots in Cluttered Enviroments. CRIF Technical Report, August 1993
- [B8] Ficola A., Cava M., Muraca P. A Finite-Elements Approach in Modelling Multilink Robots with the Last Link Flexible., ze zbiorów biblioteki CRIF
- [B9] Jain A., Chaturvedi K., Singh K. Inverse Kinematic and Obstacle Avoiding Algorithm for a Five Degree Freedom Robot Arm. and Its Application to Playing Chess. , ze zbiorów biblioteki CRIF
- [B10] Jou C. C., Lin C. J., Young K. Y. Collision Avoidance Analysis of Reachable Workspaces for Redundant Manipulators. 7803-0078/91/0600-1222\$01.00@1991 IEEE
- [B11] Kazerounian K., Wang Z. Global versus Local Optimization in Redundancy Resolution of Robotic Manipulators. The International Journal of Robotics Research, vol. 7, No. 5, October 1988
- [B12] Kieffer J. A View of Singularities in Manipulator Inverse Kinematics. 7803-0078/91/0600-0668\$01.00@1991 IEEE
- [B13] Kircanski M. Combined Analytical-Gradient-Projection Inverse Kinematic Solutions for Simple Redundant Manipulators. 7803-0078/91/0600-1228\$01.00@1991 IEEE
- [B14] Kolarov K., Roth B. On the Number of Links and Placement of Telescoping Manipulators in an Environment with Obstacles. ICAR 1991
- [B15] Kwong M. K., Woo P. Y., Wang R. MAPLE in Automatic Generation of Forward Kinematics and Jacobians of Robotic Manipulators. , ze zbiorów biblioteki CRIF
- [B16] Lee S., Lee J. M. Reconfiguration of a Redundant Manipulator with Task-Oriented Manipulability. 7803-0078/91/0600-1239\$01.00@1991 IEEE

41

- [B17] Lenarcic J., Kosutnik A. Approximate Calculation of Robot Inverse Kinematics Applied to Arc Welding. Experimental Robotics 1-st Int. Symposium, Montral, June 19-21, 1989
- [B18] Lin S. K. Coordinate Transformations with Euler Parameters as A Quaternion - An Alternative Approach to Kinematics and Dynamics of Manipulators. CH2413-3/87/0000/0033\$01.00@1987, IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, 1987
- [B19] Martin H. L., Satterlee P. E. Kinematic Redundancy - Key to Dexterous Manipulation in Confined Enviroments. 17th ISIR Chicago 1987
- [B20] Mayorga R. V., Wong A. K. C. A Singularities Avoidance Method for The Trajectory Planning of Redundant and Nonredundant Manipulators. CH2413-3/87/0000/1707\$01.00@1987, IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, 1987
- [B21] Mayorga R. V., Wong A. K. C., Milano N. A Fast Procedure for Manipulator Inverse Kinematics Evaluation and Pseudoinverse Robustness. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 22, No. 4, July/August 1992
- [B22] Nenchev D., Umetani Y., Yoshida K. Analysis of a Redundant Free-Flying Spacecraft/Manipulator System. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 8, NO. 1, February 1992
- [B23] Roberts R. G., Maciejewski A. Nearest Optimal Repeatable Control Strategies for Kinematically Redundant Manipulators. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 8, NO. 3, June 1992
- [B24] Roberts R. G., Maciejewski A. Repeatable Generalized Inverse Control Strategies for Kinematically Redundant Manipulators. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 38, NO. 5, May 1993
- [B25] Shigematsu Y., Kakazu Y., Fujii S., Oh'ashi Y. Direct Derivation Problem of Analytic Solution to the Kinematic Equation of a Manipulator. 20th ISIR Tokyo 1989
- [B26] Siciliano B., Slotine J. J. E. A General Framework for Managing Multiple Tasks in Highly Redundant Robotics Systems. 7803-0078/91/0600-1211\$01.00@1991 IEEE
- [B27] Tornambe A. Asymptotic Inverse Dynamics of Single-Link Flexible Robot Arms. 7803-0078/91/0600-0084\$01.00@1991 IEEE
- [B28] Varma H., Huang M. Z. A Study of Rate Coordination Algorithm in Serial Chain Redundant Manipulators. 7803-0078/91/0600-1232\$01.00@1991 IEEE
- [B29] Vepa R., Nowe A. Design of Fuzzy Learning Compensators and Controllers for Autonomous redundant Robot manipulators. , ze zbiorów biblioteki CRIF
- [B30] Wampler II Ch. W. Winding Number Analysis of Invertible Workspaces for Redundant Manipulators. The International Journal of Robotics Research, vol. 7, No. 5, October 1988