

Streszczenie rozprawy doktorskiej

mgr inż. **Łukasz Woliński**

temat: ***Optimal trajectory planning for redundant manipulators working in a dynamic environment***

dziedzina: nauki techniczne /nauki inżynieryjno-techniczne

dyscyplina: automatyka i robotyka / automatyka elektronika i elektrotechnika

promotor pracy: dr hab. inż. Marek Wojtyra, prof. uczelni - Politechnika Warszawska Wydział MEiL

promotor pomocniczy: dr hab. inż. Paweł Malczyk, prof. uczelni

Po dziesięcioleciach rozwoju, w robotyce pojawił się nowy trend: roboty zaczynają wkraczać w miejsca pracy człowieka. Zapewnienie wydajnego współdziałania robotów i ludzi wymaga rozwiązania problemów występujących w nieuporządkowanym, ludzkim środowisku. Roboty redundantne, charakteryzujące się zwiększoną zręcznością, znakomicie nadają się do pracy w takim miejscu, ponieważ ich struktura kinematyczna pozwala na omijanie przeszkód i unikanie konfiguracji osobliwych. Ponadto, w duchu projektowania inspirowanego naturą, redundantna struktura kinematyczna może być wykorzystana w kończynach robotów humanoidalnych, które mogłyby w przyszłości towarzyszyć ludziom w eksploracji kosmosu lub działaniach ratowniczych podczas katastrof.

Ludzie i ich działania wprowadzają nieuporządkowanie i zmienność w otoczeniu robota, zatem planowanie trajektorii jest znacznie trudniejsze niż w przypadku izolowanej linii produkcyjnej. Dynamiczne zmiany w środowisku pracy robota mogą powodować konieczność przepakowywania trajektorii jego końcówki w przestrzeni zadań. Z kolei system sterowania, aby wygenerować odpowiednie sygnały sterujące dla napędów, wymaga na ogół podania trajektorii złączonej. Planowanie trajektorii złączonych, które odpowiadają zadanej trajektorii końcówki oraz nie przekraczają możliwości robota, nie jest łatwym zadaniem.

Z przeglądu stanu wiedzy dokonanego w niniejszej rozprawie wynika, że – zazwyczaj – trajektoria złączona jest najpierw otrzymywana z rozwiązania zadania kinematyki odwrotnej, a dopiero potem – jeśli narusza ograniczenia złączowe – jest skalowana lub spowalniana. Metody rozwiązywania zadania kinematyki odwrotnej manipulatorów redundantnych stanowią obszerny temat badawczy. Większość z nich opiera się na wykorzystaniu pseudoodwrotności jacobianu manipulatora do obliczenia prędkości złączonych potrzebnych do zrealizowania zadanego ruchu końcówki. Zadania poboczne, takie jak omijanie przeszkód lub maksymalizacja wskaźnika manipulacyjności, są rzutowane na jądrowy jacobian. Jeśli trajektoria jest sparametryzowana względem długości ścieżki lub wirtualnego czasu, to może być odpowiednio przeskalowana. Odpowiednia reakcja na nadmierne wymagania trajektorii zadanej w ciągu tylko jednego cyklu sterowania często nie jest możliwa, natomiast wcześniejsze obliczenie całej skalowanej trajektorii może być zbyt czasochłonne, dlatego niektóre metody skalowania wykorzystują ograniczony horyzont predykcji. Warto podkreślić, że lokalnie optymalne rozwiązanie może nie być optymalne po przeskalowaniu trajektorii.

Obiecującym pomysłem jest połączenie zadania kinematyki odwrotnej i skalowania trajektorii w jedno zagadnienie po to, by rozwiązywać oba problemy jednocześnie, uzyskując trajektorię, która będzie optymalna pomimo przeskalowania. Zaproponowana w rozprawie metoda OOPTP (Online Optimal Predictive Trajectory Planner) jest wdrożeniem takiego podejścia. W OOPTP zadania kinematyki odwrotnej i skalowania trajektorii są sformułowane jako zagadnienie programowania kwadratowego (QP). Trajektoria końcówki jest sparametryzowana względem czasu wirtualnego, a jej spełnienie przez manipulator jest wymuszone przez ograniczenie równościowe. Ograniczenia złączowe są wyrażone jako warunki nierównościowe. Redundancja manipulatora jest wykorzystywana do realizacji zadań pobocznych zapisanych w ważonej funkcji celu – różne wartości wag pozwalają na przydzielenie zadaniom

różnych priorytetów. Jednym z uwzględnionych zadań jest minimalizacja skalowania czasu, skutkująca unikaniem zbędnego spowalniania trajektorii. Zagadnienie QP jest sformułowane w sposób umożliwiający predykcję przyszłych stanów manipulatora, co pozwala na odpowiednio wczesne rozpoczęcie skalowania w razie nadchodzących problemów. Poza horyzontem predykcji trajektoria końcówki nie musi być znana, co umożliwia przeplanowywanie trajektorii podczas pracy robota w zmiennym środowisku. Zagadnienie QP jest rozwiązywane przy użyciu metody zbioru ograniczeń aktywnych *qpOASES*. Otrzymana trajektoria złączowa jest optymalna: przy zadanych ograniczeniach, wewnątrz horyzontu predykcji spełnia trajektorię końcówki (zadanie główne), w najlepszy sposób realizuje zadania poboczne (takie jak minimalizacja prędkości złączowych lub omijanie przeszkód), a także zachowuje najmniejsze możliwe skalowanie.

Przedstawione w rozprawie rozważania dotyczące kinematyki uzupełniono o rekursywny algorytm modelowania dynamiki robotów, który następnie zaadaptowano do identyfikacji parametrycznej robota KUKA LWR 4+. Otrzymany model pozwala na określenie momentów złączowych wymaganych do zrealizowania zadanej trajektorii oraz dostarcza narzędzi do policzenia macierzy inercji niezbędnej do planowania trajektorii minimalizujących energię kinetyczną. Przedstawiony algorytm modelowania może zostać zastosowany do dowolnego manipulatora o otwartym łańcuchu kinematycznym.

Wszechstronne badania symulacyjne wykonane na potrzeby rozprawy dowodzą, że metoda OOPTP działa poprawnie i ma wiele zalet w porównaniu z klasycznymi metodami rozwiązywania zadania kinematyki odwrotnej. Najważniejszą cechą OOPTP jest spowalnianie ruchu końcówki tylko wtedy, gdy jest to konieczne dla spełnienia ograniczeń nakładanych na złącza robota. Wybrane do badań trajektorie końcówki zawierały wiele faz przyspieszania i hamowania, jak typowe trajektorie wielosegmentowe robotów przemysłowych. Spośród zadań pobocznych uwzględniono m.in. minimalizację prędkości złączowych, unikanie przeszkód oraz minimalizację energii kinetycznej. Ponadto metoda OOPTP sprawdziła się dla trajektorii przebiegającej w pobliżu konfiguracji osobliwych robota. Obliczenia mieściły się w 10-milisekundowym cyklu, co umożliwia stosowanie metody w czasie rzeczywistym. Eksperymenty przeprowadzone na robocie KUKA LWR 4+ wykazały praktyczną realizowalność trajektorii złączowych wygenerowanych metodą OOPTP.