Wielorobotowa rekonfigurowalna forma mocująca obrabiane detale – program sterujący

Włodzimierz Kasprzak*, Wojciech Szynkiewicz*, Teresa Zielińska, Cezary Zieliński*, Piotr Trojanek*, Tomasz Winiarski*, Tomasz Kornuta*, Michał Walęcki***

*Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej, Politechnika Warszawska,
**Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej, Politechnika Warszawska

Streszczenie: Formy mocujące muszą być idealnie dopasowane do detali, które mają podpierać. Nawet mała modyfikacja kształtu w projekcie detalu powoduje, że kosztowna forma staje się bezużyteczna. Stąd duże zainteresowanie przemysłu formami rekonfigurowalnymi. Zastąpienie tradycyjnych form przez wiele robotów stanowiących ruchome podpory wymaga zaprojektowania specjalnego układu sterowania takim systemem oraz dedykowanej metody programowania umożliwiającej szybką rekonfigurację tego systemu. W pierwszej części artykułu przedstawiono problemy związane z konstrukcją form podpierających oraz zaprezentowano strukturę układu sterowania systemu wielorobotowego, natomiast w części drugiej skoncentrowano się na programie planującym działania poszczególnych robotów. Artykuł przedstawia sposób programowania rekonfigurowalnej formy. Programowanie w tym przypadku polega na zaplanowaniu czynności wykonywanych przez roboty podpierające. Plan układany jest automatycznie z wykorzystaniem sposobu rozwiązywania problemów wymagających spełnienia ograniczeń. Program planujący bierze pod uwagę ograniczenia fizyczne, geometryczne oraz te związane z upływem czasu. Dane wejściowe dla programu planującego są tożsame z rysunkami CAD detali oraz dane CAM sposobu ich obróbki. Na podstawie tych danych powstaje plan rozstawienia głowic, ruchów manipulatorów oraz translokacji baz mobilnych. Układ sterowania na podstawie otrzymanego planu steruje zachowaniem robotów, umożliwiając maszynie CNC wiercenie otworów bądź frezowanie. Eksperymenty przeprowadzone w fabryce wykazały, że zaprojektowany system usztywnia detal na tyle, aby wynik obróbki mechanicznej był zadowalający. Jeżeli liczba różnych detali podlegających obróbce jest znaczna, to zaprojektowany system stanowi względnie tanią alternatywę dla wytworzenia i późniejszego magazynowania wielu form.

Słowa kluczowe: rekonfigurowalne formy mocujące, systemy wielorobotowe, planowanie działań

Projektowanie systemów mocujących i optymalizacja rozmieszczenia ich elementów są przedmiotem intensywnych badań [1–3, 14, 17]. W literaturze można znaleźć wiele strategii optymalizacji systemu mocującego dla różnych wskaźników jakości oraz ograniczeń wykorzystywanych do wyznaczania lokalizacji poszczególnych elementów mocujących. Dla podatnych, cienkościennych detali, takich jak arkusze blach, do obliczania odkształceń stosuje się modele w postaci elementów skończonych. Menassa i De Vries [11] do wyznaczenia lokalizacji elementów mocowania zastosowali optymalizację wskaźnika jakości w postaci funkcji odkształceń w węzłach siatki elementów skończonych. Zmiennymi projektowymi są w tym przypadku lokalizacje trzech elementów bazujących obrabiany detal (ang. locators) na głównej (poziomej) powierzchni odniesienia, zgodnie z wymaganiami reguły projektowej „3-2-1” [11]. Cai i in. [3] zaproponowali regułę „N-2-1” rozmieszczania elementów systemu mocującego, zamiast konwencjonalnej reguły „3-2-1”, w celu unieruchomienia i minimalizacji odkształceń podatnych paneli metalowych. W wyniku rozwiązania zadania optymalizacji za pomocą technik programowania nieliniowego otrzymuje się N najlepszych punktów lokalizacji podpór, dla których suma kwadratów odkształceń normalnych do powierzchni panelu w węzłach jest minimalna. Wykorzystali oni model panelu w postaci elementów skończonych z kwadratową interpolacją między węzłami, ograniczając możliwość ruchu węzłów będących w kontakcie z główną płaszczyzną odniesienia tylko do tej płaszczyzny.

Literatura poświęcona problematyce planowania ruchu robotów jest bardzo obszerna [5, 9, 10]. Generalnie strategie planowania ruchu można podzielić na dwie grupy: metody kombinatoryczne i metody heurystyczne. W kombinatorycznych metodach planowania ruchu jest konstruowana jawna reprezentacja wolnej przestrzeni konfiguracyjnej robota [4, 5, 9]. Wśród metod kombinatorycznych wyróżnia się dwa podejścia: dekompozycję komórkową i konstrukcję mapy drogowej. Pierwsze z nich polega na podziale wolnej (bezkolizyjnej) przestrzeni konfiguracyjnej na dające się łatwo opisać komórki. Dla tych komórek jest tworzony graf sąsiedztwa, którego spójne składowe odpowiadają spójnym składowym wolnej przestrzeni konfiguracyjnej. Drugie podejście polega na konstrukcji zbioru krzywych w domknięciu wolnej przestrzeni. Krzywe te mają wspólne wierzchołki, w wyniku czego powstaje graf nazywany mapą drogową. Kombinatoryczne algorytmy planowania ruchu są algorytmami zupełnymi, które gwarantują znalezienie rozwiązania, o ile ono istnieje, lub zgłoszenie braku rozwiązania w przeciwnym przypadku. Jednakże, złożoność obliczeniowa tych algorytmów rośnie wykładniczo z liczbą stopni swobody. Przekształcenie opisu przeszkód z przestrzeni roboczej na opis w przestrzeni konfiguracyjnej również wymaga dużych nakładów obliczeniowych. Dlatego już dla robotów o liczbie stopni swobody większej niż 3 i środowisk z dużą liczbą przeszkód, złożoność obliczeniowa algorytmów kombinatorycznych jest zbyt wysoka, aby można byłoby korzystać z nich w większości praktycznych zastosowań.

Uniknięcie konieczności budowy jawnej reprezentacji przestrzeni konfiguracyjnej oraz możliwości zastosowania w praktyce były przyczyną powstania i szybkiego rozwoju algorytmów heurystycznych. Wśród metod heurystycznych

występują dwa główne podejścia: próbkowanie przestrzeni konfiguracyjnej i przybliżona dekompozycja komórkowa. Najefektywniejszymi strategiami planowania ruchu robotów wykorzystującymi próbkowanie są obecnie tzw. metody probabilistycznych map drogowych (ang. Probabilistic Roadmap Methods – PRMs) [7], Rapidly-exploring Random Trees (RRTs) [8] oraz ich warianty [6]. Podstawową ideą tych metod jest iteracyjne tworzenie grafu, którego zbiór węzłów jest skończonym zbiorem losowo generowanych próbek (konfiguracji), zaś zbiór łuków jest skończonym zbiorem bezkolizyjnych ścieżek łączących te konfiguracje. Konfiguracje i ścieżki są sprawdzane, czy odpowiadają bezkolizyjnym pozycjom i ruchom robota. Graf ten stanowi przybliżoną reprezentację wolnej przestrzeni konfiguracyjnej, zaś planowanie ruchu polega poszukiwaniu ścieżki w grafie łączącej konfigurację początkową i końcową. Większość metod bazujących na próbkowaniu jest probabilistycznie zupełna, czyli prawdopodobieństwo znalezienia rozwiązania dąży do jedności, gdy czas obliczeń dąży do nieskończoności. Jedną z podstawowych wad metod bazujących na próbkowaniu jest drastyczny spadek wydajności w przypadku poszukiwania ścieżki przechodzącej przez wąskie przejście [10].

Planowanie ruchu robota może również być sformułowane jako zadanie optymalizacji nieliniowej. Zaproponowano wiele podejść do rozwiązania tego zadania m.in. [12, 15, 18]. W [18] autorzy zaproponowali sformułowanie ogólnego problemu planowania ruchu w postaci zadania wariacyjnego i podali numeryczny algorytm rozwiązujący to zadanie. Podobnie w pracy [15] problem planowania ruchu dla zamkniętych łańcuchów kinematycznych jest formułowany jako zadanie poszukiwania ekstremum warunkowego funkcjonału. Po sprowadzeniu problemu wariacyjnego do zadania optymalizacji nieliniowej, do jego rozwiązania wykorzystano efektywny algorytm programowania nieliniowego IPOPT bazujący na prymalno-dualnej metodzie punktu wewnętrznego. Technikę kierunku najszybszego spadku gradientu funkcjonału zwaną CHOMP (Covariant Hamiltonian Optimization for Motion Planning) wykorzystano do planowania ruchu manipulatora o 7 stopniach swobody [12].

Niestety, powyżej opisane metody planowania ruchów robotów nie są efektywne w przypadku rozwiązania problemu, z którym mamy tu do czynienia. Naszym zadaniem jest określenie sposobu przestawiania robotów mających za zadnie podparcie obrabianego detalu (cienkiej blachy) w celu takiego jej usztywnienia, aby wykonywane operacje obróbki mechanicznej mogły być przeprowadzone w zadowalający sposób. Ponieważ roboty poruszają się po planszy z trzpieniami, liczba możliwych kombinacji ruchów bazy jest ograniczona. Należy więc skojarzyć dyskretne ruchy bazy mobilnej z ciągłymi ruchami manipulatora prowadzącymi do umiejscowienia głowicy podpierającej we właściwym miejscu. Istotne jest wzajemne usytuowanie głowic robotów biorących udział w realizacji zadania. Głowice nie mogą być usytuowane ani zbyt blisko siebie ani zbyt daleko, a co więcej muszą być w odpowiedniej odległości od krawędzi obrabianego detalu. Wszystko, co zostało tu powiedziane, można sformułować w kategoriach ograniczeń narzuconych na pozycje głowic, manipulatorów i baz mobilnych. Stąd do rozwiązania tego problemu zastosowano znaną ze sztucznej inteligencji metodę rozwiązywania zadań z ograniczeniami – CSP (Constraint Satisfaction Problem).

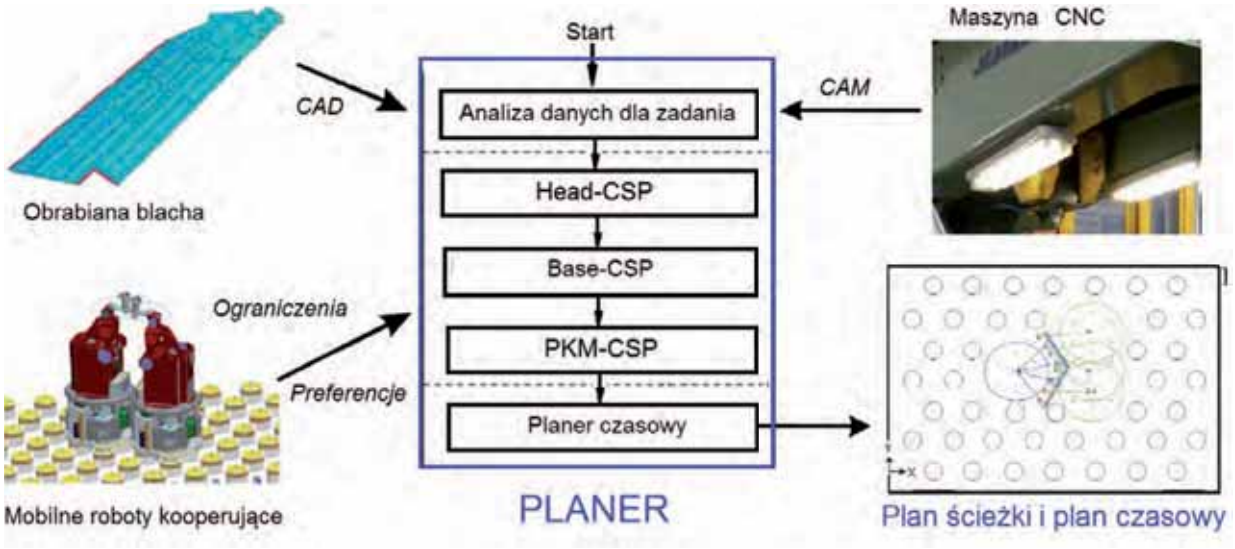
1. Wymagania i struktura Planera

Detalem podlegającym obróbce mechanicznej jest cienka blacha formowana przestrzennie na podstawie danych uzyskanych z programu CAD. Obróbka polega na frezowaniu bądź wierceniu. Okolice obszaru obróbki muszą być usztywnione podczas tej operacji, a więc głowice robotów podtrzymujących muszą znajdować się blisko siebie i miejsca dokonywania obróbki mechanicznej. Do wiercenia otworów na małych obszarach wystarczy statyczna konfiguracja lokalizacji głowic, ale w czasie wiercenia otworów wzdłuż długiego konturu i podczas frezowania głowice muszą być szybko przemieszczane, tak aby śledzić posuw narzędzia maszyny CNC. Sztywność panelu wymagana dla danego procesu obróbki uzyskiwana jest, gdy spełniony jest pewien zestaw ograniczeń względnego położenia narzędzia i głowic. Położenie narzędzia wynika z wymagań technologicznych, natomiast ustawienie głowic w czasie musi być dostosowane do tych wymagań. Dla każdego robota, głowica podpierająca umieszczana jest w przestrzeni ograniczonej przez przestrzeń roboczą manipulatora i aktualne położenie bazy mobilnej. Bazy mobilne mogą być umieszczane tylko w dyskretnych miejscach na ławie, wyznaczanych położeniami trzpieni. Natomiast przestrzeń roboczą manipulatora można uznać za ciągłą. Ponadto prędkość ruchu poszczególnych części robota nie może przekraczać możliwości odpowiednich silników napędowych. Dla ludzkiego eksperta próba ręcznej generacji planu działania dla zestawu składającego się tylko z dwóch robotów jest bardzo skomplikowanym zadaniem, gdyż kształty paneli są zazwyczaj skomplikowane, a ponadto należy uwzględniać prędkość ruchu narzędzia oraz unikać kolizji między robotami. Gdy robotów jest więcej, zadanie staje się dla człowieka zbyt trudne. Dlatego opracowano specjalny program służący do automatycznego generowania planu działań poszczególnych części systemu. Program Planera [16] tworzy off-line plan działań agentów składających się na system sterujący na podstawie informacji o kształcie panelu uzyskanej programu projektowego CAD oraz programu niezbędnych czynności technologicznych (CAM). Planer składa się z trzech głównych części (rys. 1):

1) modułu analizy danych CAD/CAM dla obrabianego detalu i procesu wytwórczego,

2) generatora ścieżki, którego struktura jest niezależna od rodzaju detalu i robota (potrójny planer CSP – program rozwiązujący dyskretny problem spełnienia ograniczeń, [16]); jest to algorytm przeszukiwania przestrzeni rozwiązań wykonujący sprawdzanie oddzielnie zdefiniowanych ograniczeń, w tym przypadku ograniczeń geometrycznych zależnych od możliwości technicznych robotów i stosujący lokalnie zdefiniowane preferencje wyboru kolejnych operacji robotów,

3) planer czasowy zależny od danych CAD/CAM i możliwości ruchowych robotów.



Rys. 1. Struktura Planera
Fig. 1. The structure of the planner program

2. Potrójny CSP

Analiza detalu jest wykonywana jednokrotnie dla określonego detalu. Jej celem jest dekompozycja trajektorii narzędzia CNC na segmenty. Problem planowania ścieżki przekształcany jest w dyskretny problem spełniania ograniczeń (CSP) [13]. Klasyczny algorytm CSP jest definiowany za pomocą przestrzeni stanów oraz grafu ograniczeń. Stan składa się z wartości przypisanych do skończonego zbioru zmiennych o skończonych dziedzinach. Rozwiązaniem problemu CSP jest każdy kompletny stan (tzn. taki, dla którego wszystkie zmienne mają przypisane wartości) spełniający ograniczenia. W omawianym przypadku planer ścieżki składa się z modułu sterującego sprawującego ogólny nadzór nad torem ruchu i harmonogramem czasowym. Trzy hierarchicznie ułożone moduły, zwane Head-CSP, Base-CSP i PKM-CSP, wykonują etapy planowania ścieżki, odpowiadające trzem częściom składowym robota, i implementują tzw. potrójne przeszukiwanie CSP. Wszystkie moduły korzystają z przyrostowego algorytmu przeszukiwania przestrzeni stanów (strategia w głąb z powrotami), aby znaleźć odpowiednie ścieżki stanów głowicy, ścieżki stanów bazy i manipulatora (patrz przykład na rys. 2 i rys. 3). Planer ścieżki bada tylko ograniczenia fizyczne i geometryczne. Stąd plan, jeśli zostanie wyznaczony, spełnia wszystkie znane ograniczenia, choć niekoniecznie musi być optymalny. Może się zdarzyć, że w pewnym punkcie (na pewnym odcinku) wykonanie planu on-line musi zostać przerwane. Dzieje się tak, gdy nie istnieje jeden plan dla całego detalu, a proces obróbki musi być podzielony na kilka części.

3. Ograniczenia i preferencje Planera

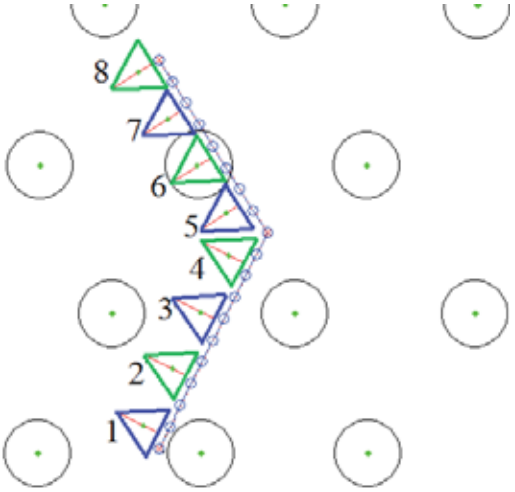
Dla konkretnego problemu planowania musimy dodać wiedzę z zakresu dziedziny w postaci:

– zbioru ograniczeń (relacji) zmiennych CSP,

– kodu funkcji generujących następny węzeł w drzewie wyszukiwania (tu można uwzględnić lokalne preferencje wyboru przypisania wartości zmiennej),

– jednej funkcji reprezentującej kryterium stopu (jest ono spełnione wtedy, gdy znaleziono pełne rozwiązanie lub w przeciwnym razie po przejrzeniu wszystkich alternatyw zwracane jest najlepsze rozwiązanie częściowe).

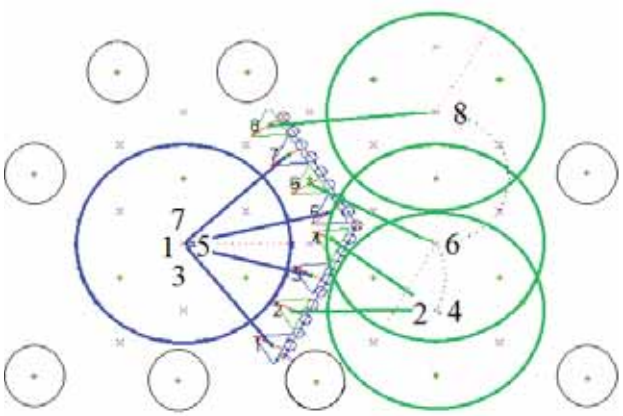
Przykłady zastosowania możliwych preferencji przy wyborze przypisania wartości zmiennym CSP zawiera rys. 4 i rys. 5.



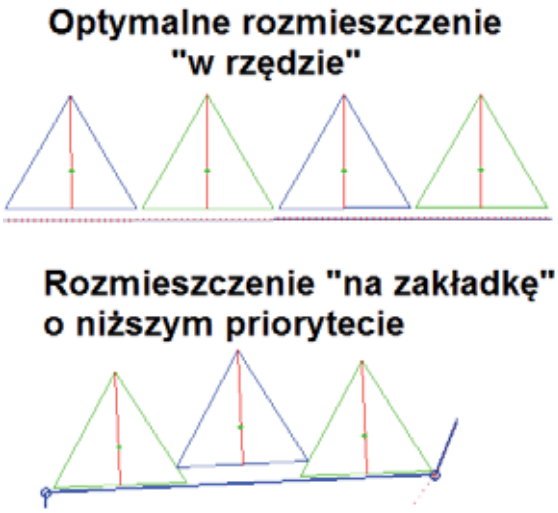
Rys. 2. Ilustracja prostego planu dla ścieżki: plan dla głowicy przy wierceniu otworów wzdłuż konturu
Fig. 2. Illustration of a simple path plan: a head plan for drilling holes along a contour line

Dla współpracujących agentów mobilnych należy przyjąć następujące ograniczenia:

1) ograniczenia geometryczne pomiędzy agentami i konturem obrabianego detalu: wyrażające konieczne wymagania fizyczne dotyczące odpowiedniego podparcia dla danego detalu i procesu obróbki (np. minimalna i maksymalna dopuszczalna odległość od głowicy do konturu, maksymalna dopuszczalna odległość między dwoma kolejnymi pozycjami, w których znajdują się głowice),



Rys. 3. Ilustracja planu dla prostej ścieżki: plan dla bazy mobilnej
Fig. 3. Illustration of a simple path plan: a corresponding base plan



Rys. 4. Ilustracja preferencji rozmieszczania głowic wzdłuż segmentu liniowego konturu
Fig. 4. Illustration of head positioning preferences at a contour's line segment

2) obszar roboczy manipulatora: służący do szybkiego określenia osiągalnych pozycji głowicy (np. minimalna i maksymalna odległość między osią pionową przechodzącą przez środek bazy mobilnej i środek głowicy),

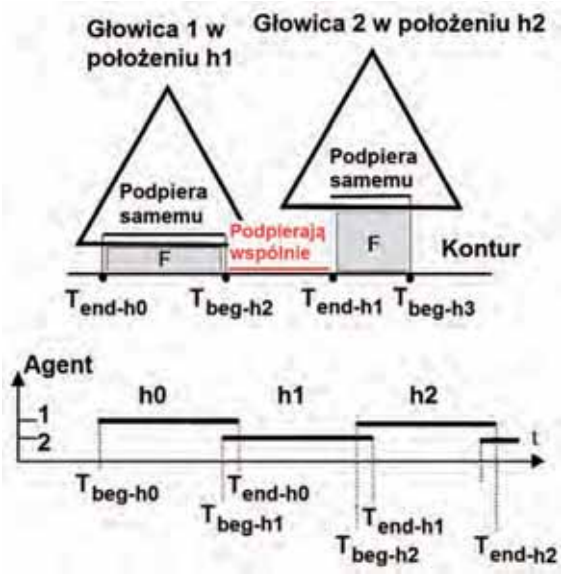
3) ograniczenia geometryczne pomiędzy bazami mobilnymi i manipulatorami: potrzebne do uniknięcia kolizji między robotami podczas zmian pozycji baz mobilnych,

4) rozwiązanie odwrotnego zagadnienia kinematyki dla manipulatora – używane podczas definiowania możliwych stanów PKM dla kolejnych pozycji głowicy.

4. Plan czasowy

Kompletny plan określający ścieżkę (dla obu współpracujących robotów) musi być zweryfikowany przez moduł planera czasu, ponieważ wszystkie działania określone w planie muszą być wykonane we właściwych momentach i w określonej kolejności, zgodnie ze scenariuszem dla narzędzia maszyny CNC (np. rys. 6). Plan czasowy jest wyznaczany w taki sposób, że rzutuje sekwencje operacji na oś czasu, w zgodzie z modelem dynamiki części składowych robotów.

Rys. 5. Ilustracja preferencji rozmieszczania głowic przy wierzchołku
Fig. 5. Illustration of head positioning preferences at a corner



Rys. 6. Ilustracja podstawowej sekwencji czasowej dla ustawień głowic
Fig. 6. Illustration of fundamental time sequence for head settings

5. Implementacja

Program planera został zaimplementowany w języku MATLAB i ma cechy programu obiektowego. Generowany przez niego plan przekazywany jest do wykonania koordynatorowi systemu wieloagentowego w postaci pliku XML. W takim pliku podane są kolejne pozycje i konfiguracje wszystkich trzech części każdego robota oraz przedziały czasowe, w których mają te pozycje być zajmowane, a także kiedy mają być wykonywane operacje przejścia do następnej pozycji.

Rys. 7 ilustruje wykonanie planu w postaci sekwencji pięciu operacji manipulatora, potrzebnych do wykonania pojedynczego bezkolizyjnego przejścia między kolejnymi pozycjami głowicy i trzech operacji bazy obrotowej robota, potrzebnych dla przejścia do nowej pozycji podparcia. W przypadku PKM podstawowa sekwencja operacji składa się z: 1) obniżenia głowicy o kilka centymetrów, 2) cofnięcia głowicy nad obszar bazy, 3) obrotu kompensującego ramienia PKM względem bazy, gdy baza zostanie obrócona, 4) wysunięcia głowicy znad obszaru bazy pod blachę, 5) podniesienia głowicy do zetknięcia się z blachą. W przypadku bazy podstawowa sekwencja operacji to: 1) odczepienie dwóch elementów dokujących od trzpieni i podniesienie swobodnych nóg, 2) obrót na trzeciej nodze, 3) opuszczenie swobodnych nóg i zakleszczenie na trzpieniach.

6. Podsumowanie

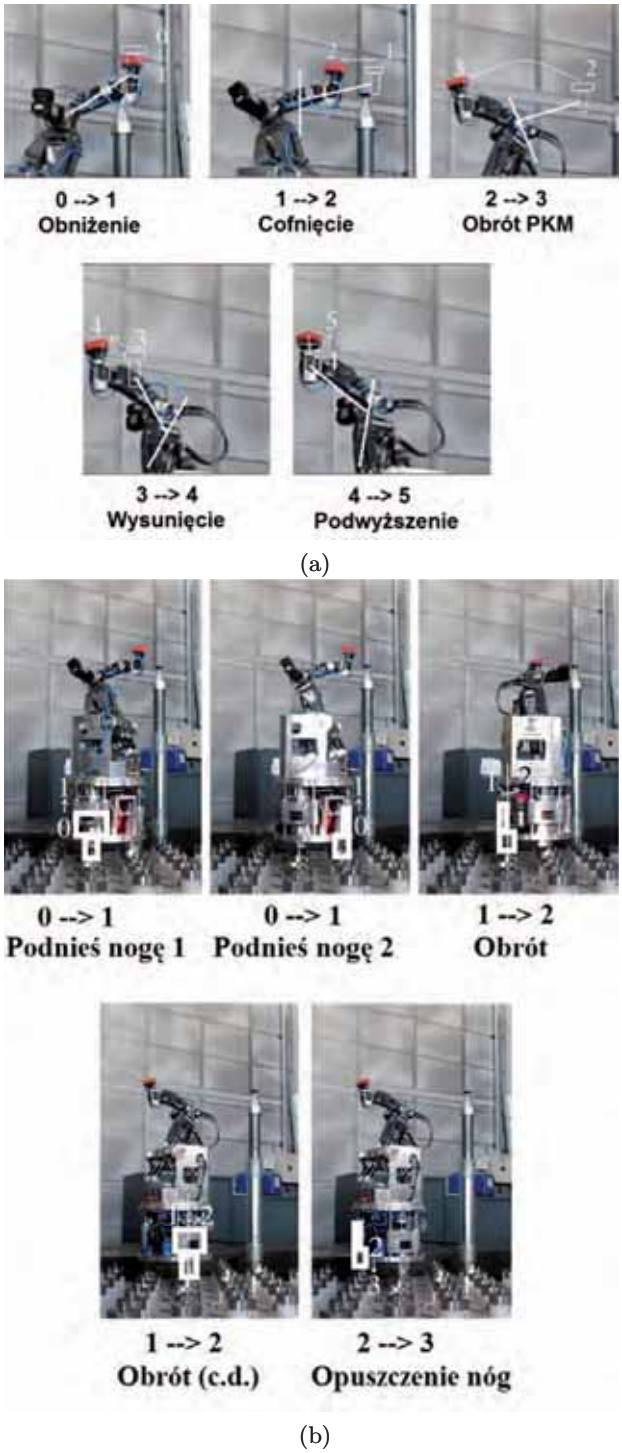
Przeprowadzono szereg eksperymentów, aby ocenić funkcjonowanie sposobu automatycznego generowania planów. Uruchamiano kompletne sekwencje ruchów zawartych w wygenerowanym planie. Celem eksperymentów była ocena funkcjonowania algorytmu planowania. Zrealizowane sekwencje działań robotów doprowadziły do zadowalającej obróbki przykładowych detali. Podobne trajektorie były używane zarówno do wiercenia, jak i frezowania, gdyż większość detali wymaga otworów wzdłuż konturu podparcia.

Podziękowania

Badania w ramach projektu SwarmItFIX były finansowane w ramach 7. Programu Ramowego (wspólny projekt 214678). Partnerami w ramach projektu były następujące instytucje: University of Genova (Włochy), Piaggio Aero Industries (Włochy), Exechon (Szwecja), ZTS VVU Košice a.s. (Słowacja), Centrum Badawcze Fiata (Włochy) i Politechnika Warszawska (Polska). Publikacja ta jest finansowana ze środków statutowych Politechniki Warszawskiej.

Bibliografia

1. Bi Z., Zhang W. (2001), *Flexible Fixture Design and Automation: Review, issues and future directions*. Int. J. of Production Research 39(13), 2867–2894.
2. Boyle I., Rong Y., Brown D. (2011), *A review and analysis of current computer-aided fixture design approaches*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 27, 1–12.
3. Cai W., Hu S., Yuan J. (1996), *Deformable sheet metal fixturing: principles, algorithms, and simulations*. T ASME, J. Manufacturing Sci. Eng. 118(3), 318–324.
4. Canny J. (1993), *Computing roadmaps of general semi-algebraic sets*. The Computer Journal 36(5), 504–514.
5. Choset H., Lynch K., Hutchinson S., Kantor G., Burgard W., Kavraki L., Thrun S. (2005), *Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms, and Implementations*. MIT Press.
6. Jaillet L., Cortes J., Simeon T. (2010), *Sampling-based path planning on configuration-space costmaps*. IEEE Transactions on Robotics 26(4), 635–646.
7. Kavraki L. E., Svestka P., Latombe J.-C., Overmars M. H. (1996), *Probabilistic roadmaps for path planning in high-dimensional configuration spaces*. IEEE Transactions on Robotics and Automation 12(4), 566–580.
8. Kuffner J. J., LaValle S. M. (2000), *RRT-Connect: An efficient approach to single-query path planning*. In: IEEE International Conference on Robotics and



Rys. 7. Ilustracja sekwencji operacji manipulatora i bazy mobilnej dla wykonania pojedynczego przejścia pomiędzy dwoma kolejnymi stanami podpierania blachy przez jednego robota: (a) 5 operacji manipulatora PKM, (b) 3 operacje bazy mobilnej

Fig. 7. Illustration of operation sequences of the manipulator and mobile bases required for the transition between two consecutive supporting states of a given robot: (a) 5 operations of the PKM, (b) 3 operations of the mobile base

Automation, 995–1001, San Francisco, USA.
9. Latombe J.-C. (1991). *Robot motion planning*. Kluwer, Boston,MA.
10. LaValle S. (2006), *Planning Algorithms*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
11. Menassa R., Vries W. D. (1991), *Optimization methods applied to selecting support positions in fixture design*. ASME J. of Engineering for Industry 113(4), 412–418.
12. Ratliff N., Zucker M., Bagnell J. A., Srinivasa S. (2009), *CHOMP: Gradient Optimization Techniques for Efficient Motion Planning*. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA).
13. Russell S., Norvig P. (1995), *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J.
14. Sela M. N., Gaudry O., Dombre E., Benhabib B. (1997), *A reconfigurable modular fixturing system for thin-walled flexible objects*. Int. J. of Adv. Manufacturing Technology 13(9), 611–617.
15. Szynkiewicz W., Błaszczyk J. (2011), *Optimization-based approach to path planning for closed-chain robot systems*. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science 21(4), 659–670.
16. Szynkiewicz W., Zielińska T., Kasprzak W. (2010), *Robotized machining of big work pieces: Localization of supporting heads*. Frontiers of Mechanical Engineering in China 5(4), 357–369.
17. Youcef-Toumi K., Liu W., Asada H. (1988), *Computer-Aided Analysis of Reconfigurable Fixtures and Sheet Metal Parts for Robotics Drilling*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 4(3–4), 387–393.
18. Zefran M., Kumar V. (1997), *A variational calculus framework for motion planning*. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA, 415–420.

Multi-Robot Based Reconfigurable Fixture – Plan Generation

Abstract: Machining fixtures must fit exactly the work piece to support it appropriately. Even slight change in the design of the work piece renders the costly fixture useless. Substitution of traditional fixtures by a programmable multi-robot system supporting a work piece requires a specific control system and a specific programming method enabling its quick reconfiguration. The first part of the paper introduced the fixturing problem and presented the control system of the designed multi-robot fixture, while the second part presents the planer deciding where and when the supports should be located. A novel approach to task planning (programming) of the reconfigurable fixture system has been developed. Its solution is based on methods of solving the constraint satisfaction problem. The planner takes into account physical, geometrical, and time-related constraints. Reconfigurable fixture programming is performed by supplying CAD definition of the work piece. Out of this data the positions of the robots and the locations of the supporting heads are automatically generated. This proved to be an effective programming method. The control system on the basis of the thus obtained plan effectively controls the behaviours of the supporting robots in both drilling showed that the generated plans cause the work piece to be held stiffly enough for both milling and drilling operations performed by the CNC machine. If the number of diverse work piece shapes is large the reconfigurable fixture is a cost-effective alternative to the necessary multitude of traditional fixtures.

Keywords: reconfigurable fixtures, robotic fixtureless assemblies, multi-robot systems, task planning

prof. dr hab. inż. Cezary Zieliński

Jest profesorem na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej. W latach 2002-2005 sprawował na tym wydziale funkcję prodziekana ds. nauki i współpracy międzynarodowej, 2005-2008 zastępcy dyrektora Instytutu Automatyki i Informatyki Stosowanej (IAiIS) ds. naukowych, a od 2008 pełni funkcję dyrektora tego instytutu. Od roku 1996 jest kierownikiem Zespołu Robotyki w IAiIS. Od 2007 roku jest członkiem Komitetu Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk. Od 2008 roku współpracuje z Przemysłowym Instytutem Automatyki i Pomiarów. Jego zainteresowania badawcze koncentrują się na zagadnieniach związanych z programowaniem i sterowaniem robotów.
e-mail: c.zielinski@ia.pw.edu.pl

mgr inż. Tomasz Kornuta

Absolwent Wydziału Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej. W 2003 roku uzyskał tytuł inżyniera, w 2005 tytuł magistra inżyniera. Od 2008 roku pracuje na etacie asystenta w Instytucie Automatyki i Informatyki Stosowanej (IAiIS), a od 2009 roku pełni funkcję Kierownika Laboratorium Podstaw Robotyki. Od 2005 roku w ramach doktoratu prowadzi badania związane z projektowaniem systemów robotycznych wykorzystujących paradygmat aktywnego czucia do analizy otoczenia. Jego główne zainteresowania naukowe obejmują wykorzystanie informacji wizyjnej w robotyce.
e-mail: tkornuta@ia.pw.edu.pl

dr inż. Tomasz Winiarski

Jest adiunktem w Instytucie Automatyki i Informatyki Stosowanej Politechniki Warszawskiej. Sprawuje funkcje kierownika laboratorium robotyki w macierzystym instytucie, a także opiekuna studenckiego koła naukowego Bionik, które współtworzył i z którym organizował imprezy popularyzujące robotykę oraz realizował granty badawcze. W 2010 r. otrzymał za osiągnięcia naukowe nagrodę indywidualną drugiego stopnia rektora PW, w 2011 r. wyróżnienie w konkursie innowator mazowsza, a także pierwszą nagrodę w konkursie młodzi innowacyjni. Jego zainteresowania naukowe dotyczą z jednej strony konstrukcji i nawigacji robotów mobilnych dedykowanych do zadań usługowych, z drugiej strony specyfikacji i implementacji

zadań manipulatorów i chwytaków ze szczególnym uwzględnieniem hybrydowego sterowania pozycyjno-siłowego oraz sterowania impedancyjnego.
e-mail: tmwiniarski@gmail.com

mgr inż. Piotr Trojanek

Jest doktorantem oraz pracuje jako konstruktor w Instytucie Automatyki i Informatyki Stosowanej Politechniki Warszawskiej. Swoje doświadczenie zdobywał pracując nad układami sterowania robotów mobilnych. Obecnie prowadzi badania dotyczące systemów wieloagentowych oraz zastosowań metod inżynierii oprogramowania w robotyce. Od lat związany ze studenckim kołem naukowym Bionik.
e-mail: piotr.trojanek@gmail.com

dr inż. Wojciech Szynkiewicz

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

REKLAMA

prof. nzw. dr hab. inż. Włodzimierz Kasprzak

Jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym Politechniki Warszawskiej od 1997 r. W latach 1988-1996 prowadził badania naukowe w Niemczech i Japonii w zakresie wizji komputerowej i analizy sygnałów. Z zawodu jest inż. informatyki, w 2002 r. uzyskał stopień doktora habilitowanego ze specjalnością Automatyka i Robotyka, od 2005 r. jest profesorem nadzwyczajnym w Politechnice Warszawskiej. Specjalizuje sie w zagadnieniach rozpoznawania obrazów i sygnałów mowy oraz metod sztucznej inteligencji. Jest autorem ponad 100 prac naukowych z tej dziedziny, w tym 3 książek.
e-mail: W.Kasprzak@elka.pw.edu.pl

prof. dr hab. inż. Teresa Zielińska

Profesor, pracownik Wydziału Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. W latach 2002-2008 kierownik Zakładu Teorii Maszyn i Robotów na tym Wydziale, od 2008 pełni funkcję prodziekana ds. ogólnych. Jest Sekretarzem Generalnym International Federation for the Promotion of Mechanism and Machine Science (IFToMM), oraz opiekunem międzynarodowych studiów European Master on Advanced Robotics (EMARO) programu Erasmus Mundus. Członek Komitetu Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk. Jej zainteresowania badawcze koncentrują się na zagadnieniach związanych z maszynami kroczącymi, z planowaniem i sterowaniem ruchu robotów oraz z biorobotyką.
e-mail: teresaz@meil.pw.edu.pl

mgr inż. Michał Walęcki

W latach 2004–2010 studiował na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych PW, uzyskując tytuł magistra inżyniera ze specjalnością Elektronika i Inżynieria Komputerowa. W 2010 rozpoczął studia doktoranckie w Instytucie Automatyki i Informatyki Stosowanej PW. Uczestniczył w wielu projektach związanych z robotyką – zarówno naukowych, jak i komercyjnych. W latach 2010-2011 pracował w IAiIS PW na stanowisku Konstruktora, obecnie od 2011 zajmuje stanowisko asystenta. Jego zainteresowania naukowe obejmują zagadnienia związane z planowaniem i modyfikacją on-line trajektorii manipulatora. Interesuje się również specjalizowanymi konstrukcjami robotyki mobilnej oraz sprzętowymi sterownikami do zadań robotycznych.
e-mail: m.walecki@elka.pw.edu.pl

Zobacz więcej
Pobierz bezpłatną aplikację PAR+
App Store | Google Play
PAR PLUS