

Planowanie rozmieszczenia ruchomych podpór jako dyskretny problem spełniania ograniczeń

Wojciech Szynkiewicz*, Włodzimierz Kasprzak*, Teresa Zielińska**

*Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej Politechniki Warszawskiej, **Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej, Politechniki Warszawskiej

Streszczenie: W pracy przedstawiono koncepcję układu planowania (planera) dla samoadaptowalnego i rekonfigurowalnego systemu mocowań-podpór dla cienkościennych przedmiotów (blach) o dużych rozmiarach w procesie obróbczym polegającym na frezowaniu i wierceniu otworów. W proponowanym rozwiązaniu system mocowań-podpór składa się z ławy oraz ruchomych agentów – manipulatorów mobilnych. Zadaniem planera jest wygenerowanie sekwencji wykonalnych pozycji dla każdego agenta spełniających ograniczenia geometryczne i czasowe. Struktura planera ścieżki, zwanego „potrójnym CSP”, składa się z trójpoziomowej hierarchii problemów przeszukiwania dyskretnych przestrzeni rozwiązań. Do rozwiązania zadania planowania ścieżki dla głowic, ruchomych baz i manipulatorów równoległych, stanowiących części mobilnych agentów-podpór, zastosowano sterowany ograniczeniami algorytm przeszukiwania z nawrotami. W pracy przedstawiono projekt i implementację planera oraz omówiono przykładowe plany wyznaczone dla operacji frezowania i wiercenia otworów.

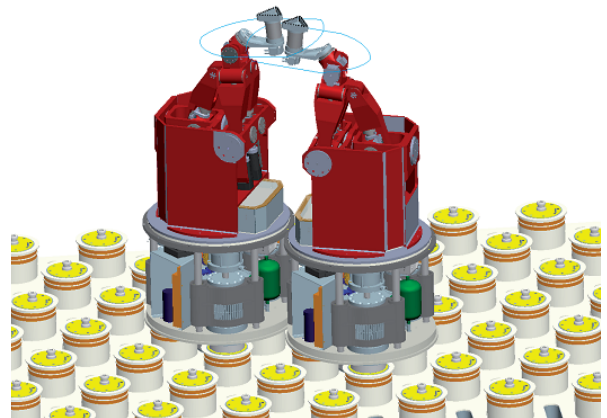
Słowa kluczowe: planowanie rozmieszczenia podpór, mobilne podpory, spełnianie ograniczeń, systemy wieloagentowe, procesy obróbcze

1. Wprowadzenie

System mocujący jest urządzeniem do pozycjonowania, unieruchamiania oraz podpierania przedmiotu w trakcie procesu obróbczego [1–5]. Jako podparcia w obróbce części z metalowych cienkich blach są zazwyczaj stosowane duże formy, które są specyficzne dla danej części i nie są rekonfigurowalne [1]. Modułowe systemy mocowań mogą być częściowo rekonfigurowalne z ręcznym przestawianiem podpór lub samo-rekonfigurowalne z matrycą podpór, z których każda ma wbudowany siłownik [2]. Oprócz tradycyjnych systemów mocowań stosowane są systemy robotyczne, gdzie rolę mocowań i uchwytów pełnią manipulatory wyposażone w odpowiednie chwytaki [3, 4].

Proponowany w pracy [6] system rekonfigurowalnych mocowań-podpór łączy zalety modułowych systemów mocowań i systemów robotycznych z manipulatorami pełniącymi taką rolę [7]. System rekonfigurowalnych mocowań-podpór składa się on z dwóch lub więcej agentów (manipulatorów mobilnych) przemieszczających się po ławie i podpierających od spodu obrabiany przedmiot (rys. 1). Zakłada się, że poddawany obróbce przedmiot jest dodatkowo mocowany za pomocą odpowiedniej liczby stałych uchwytów. Zadaniem mobilnych podpór jest zabezpieczenie przed deformowaniem się materiału w otoczeniu miejsc poddawanych obróbce. Każdy fizyczny agent składa się z (rys. 2): z bazy

mobilnej [8], z posadowionym na niej manipulatorem równoległym (*Parallel Kinematic Machine* – PKM) [9], którego końcówką jest głowica samoadaptująca się do lokalnego kształtu podpieranego przedmiotu [10]. Baza wykonuje ruchy polegające na obrocie wokół jednej z trzech nóg bazy. Manipulator równoległy jest tripodem z kiścią sferyczną i ma 6 stopni swobody. Siódmy stopień swobody realizuje obrót głowicy wokół osi przechodzącej przez jej środek. Dodatkowo podstawa manipulatora obraca się względem bazy mobilnej. Całkowita liczba stopni swobody robota-podpory wynosi 8. Głowica zawiera magneto-reologiczny płyn, który zmienia swój stan skupienia pod wpływem pola magnetycznego. Rozwiązanie to umożliwia łatwą i szybką rekonfigurację podpór przy jednoczesnym zapewnieniu odpowiedniej sztywności podparcia. Celem pracy jest przedstawienie



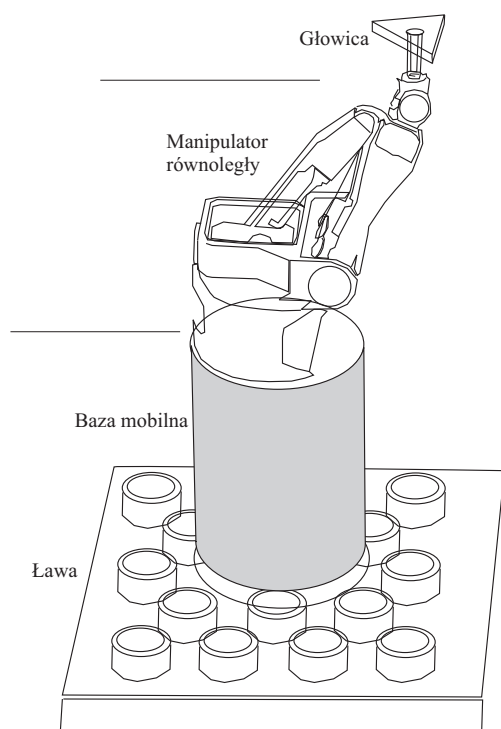
Rys. 1. System rekonfigurowalnych podpór
Fig. 1. The system of reconfigurable supports

algorytmu planowania dla systemu ruchomych agentów podpierających. Dysponując danymi CAD/CAM – geometrycznymi i czasowymi o obrabianym materiale, operacjach maszynowych i narzędziu obróbczym – planer oblicza odpowiednie sekwencje wykonalnych pozycji agentów, tak aby zapewnić odpowiednią sztywność podparcia w otoczeniu poruszającego się narzędzia. W rozważanym przypadku proces obróbczy składa się z dwóch operacji: frezowania konturów oraz wiercenia otworów.

2. Planowanie rozmieszczenia podpór

2.1. Obrabiane elementy

Jako typowe przykłady elementów do procesu obróbki wybrano dwie części stosowane w przemyśle lotniczym – panel skrzydła i fragment pionowego statecznika. Detale



Rys. 2. Ława i pojedynczy agent podpierający
Fig. 2. The bench and one supporting agent

te różnią się między sobą kształtem konturu i rozmiarami. Rozmiar rzutu prostokątnego dla pierwszego z nich wynosi $600 \text{ mm} \times 700 \text{ mm}$ a drugiego – $2800 \text{ mm} \times 1100 \text{ mm}$. Za to krzywizna pierwszego elementu jest dużo większa i wynosi $0,0011 \text{ mm}^{-1}$ wobec $0,0003 \text{ mm}^{-1}$ dla drugiego elementu. Pierwsza część ma w miarę regularny kształt i duży środkowy otwór (rys. 3a). Druga część ma stosunkowo niejednorodny kształt (rys. 3b).

2.2. Zadanie planera

Zadanie planowania rozmieszczenia podpór dekomponujemy na cztery etapy: wyznaczenie sekwencji lokalizacji głowic podpierających, wyznaczenie odpowiadających im pozycji baz mobilnych, planowanie ścieżek dla manipulatorów równoległych oraz na podstawie obliczonego planu ścieżek generowanie pożądanych trajektorii ruchu dla manipulatorów równoległych i baz mobilnych. Na projekt systemu planowania ma wpływ wstępne wymaganie o możliwie jednolitej strukturze planera dla obu zadań: frezowania i wiercenia. Dlatego też zaproponowano strukturę modułową, w której różnice obu zadań skutkują wymianą jedynie wybranych modułów planera. Podczas frezowania narzędzie wykreśla krzywą w przestrzeni. Podobnie możemy wyznaczyć krzywą łączącą środki kolejno wierconych otworów. Strategia rozmieszczania głowic w obu przypadkach zależy od krzywej łamanej w przestrzeni narzędzia. Inne będą jedynie parametry dla geometrycznych i czasowych ograniczeń w obu zadaniach, gdyż w przypadku frezowania praca narzędzia ma charakter ciągły, a w przypadku wiercenia – zachodzi na przemian wiercenie i przemieszczenie narzędzia.

2.3. Ogólna struktura planera

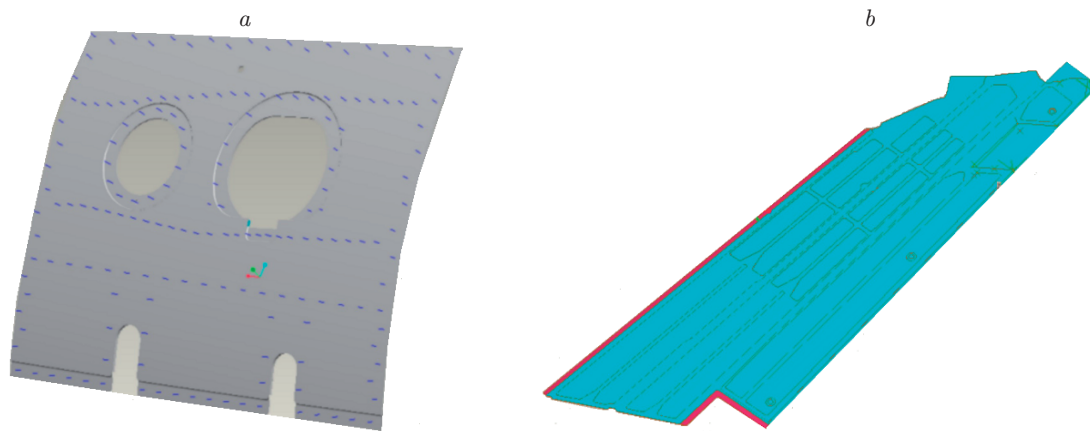
W strukturze planera wyróżniamy moduł inicjalizacji i pięć modułów obliczających składniki planu (rys. 4). W mo-

dule wstępnym (oznaczonym jako 0) dokonuje się analizy i segmentacji obrabianej ścieżki materiału. Dysponując danymi CAD, wyznaczmy kontur dla procesu frezowania lub krzywą przemieszczania narzędzia dla procesu wiercenia otworów. Następnie kontur lub krzywa są dzielone na segmenty i wierzchołki określonych typów. Wynikiem kroku inicjalizacji jest lista zaklasyfikowanych segmentów i ich wierzchołków, zdefiniowanych w globalnym układzie odniesienia, związanym z ławą. Moduł 1 zawiera główną pętlę sterującą tworzeniem planu. Decyduje się w niej, czy możliwe jest utworzenie kompletnego planu dla całego konturu, czy też kontur musi zostać podzielony na fragmenty, wymagające zatrzymania procesu obróbczego przy przechodzeniu z jednego fragmentu konturu do następnego. Dla każdego podkonturu jest wywoływany moduł 2, ewentualnie zwracający plan częściowy dla agentów podpierających. Moduł 2 odpowiada za wyznaczenie sekwencji pozycji głowic. Taki plan powinien spełniać minimalny zbiór ograniczeń o charakterze geometrycznym nałożonych na: odległości pomiędzy dwoma kolejnymi głowicami, odległości pomiędzy głowicą a konturem. W celu wykonania zadania w module 2 musi być odwołanie do modułu 3, a w tym z kolei następuje odwołanie do modułu 4. W każdym z modułów 2, 3 i 4 wyróżniono części niezależne i zależne od zastosowania. W ten sposób chcemy uniezależnić strategię postępowania od konkretnego rodzaju operacji – frezowanie lub wiercenie – i od konkretnej postaci oraz fizycznych własności materiału.

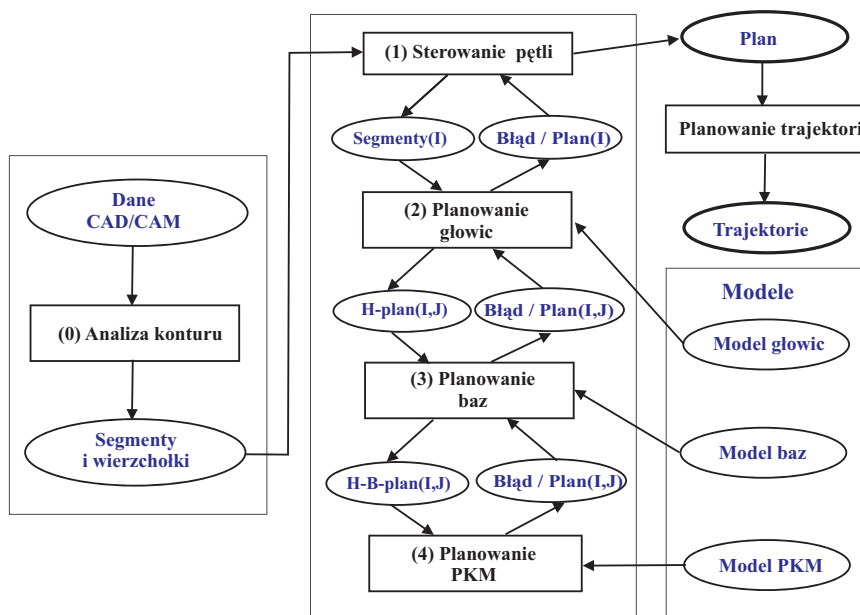
Hipotetyczny plan dla głowic wymaga weryfikacji w postaci istnienia odpowiedniego planu dla mobilnych baz. Celem modułu 3 jest wygenerowanie sekwencji pozycji baz odpowiedniej dla zadanej sekwencji pozycji głowic. Dla dwóch kolejnych pozycji głowicy jest generowana, o ile jest to możliwe, jedna pozycja bazy. Również w tym przypadku są sprawdzane ograniczenia geometryczne: lokalizacja głowicy w przestrzeni roboczej manipulatora przy zadanym położeniu bazy, niekolidowanie baz ze sobą. Moduł 4 wyznacza sekwencję operacji manipulatora przekształcających parę położeń „baza-głowica” w następnie wymagane położenie „baza-głowica”. W ostatnim kroku następuje weryfikacja zaplanowanej ścieżki dla głowic, baz i manipulatorów pod względem czasowym. Jest to realizowane w module planowania trajektorii, w którym są wykorzystywane dane o czasach wykonania poszczególnych operacji oraz parametrach dynamicznych dla głowicy, manipulatora i bazy.

3. Planowanie jako problem CSP

Problem znalezienia sekwencji pozycji i akcji przemieszczania się poszczególnych elementów obu agentów jest modelowany jako problem przeszukiwania dyskretnej przestrzeni rozwiązań przy spełnianiu zadanych ograniczeń (ang. *Constraint Satisfaction Problem* – CSP) [11]. Standardowy algorytm przeszukiwania w głąb z nawrotami, stosowany do rozwiązania tego zadania [12], wymaga modyfikacji w dwóch miejscach: (1) dopuszczamy rozwiązanie częściowe – należy pamiętać dotychczasowe najlepsze rozwiązanie częściowe, gdyż może nie być rozwiązaniem zupełnego; (2) tworzymy hierarchię trzech procesów CSP – w warunkach stopu procesu nadrzędnego jest wywoływany podrzędny



Rys. 3. Obrabiane elementy: a – panel skrzydła (regularna część z otworami), b – pionowy statecznik (część o niejednorodnym kształcie)
 Fig. 3. Examples of workpieces: a – wing panel, b – vertical tail part



Rys. 4. Ogólna struktura planera
 Fig. 4. General structure of the planner

proces CSP. Formalnie problem spełnienia ograniczeń można zdefiniować następująco: Dany jest skończony zbiór zmiennych decyzyjnych $X = \{X_1, \dots, X_N\}$ i zbiór ich dziedzin $D = \{D_1, \dots, D_N\}$, takie że każda zmienna X_i ma wartość w odpowiedniej dziedzinie D_i . Ponadto dany jest zbiór ograniczeń $C = \{C_1, \dots, C_M\}$, takich że ograniczenie C_i nakłada ograniczenia na możliwe wartości z dziedziny D_i dla pewnego podzbioru zmiennych. Rozwiązaniem problemu spełnienia ograniczeń jest przydział każdej zmiennej decyzyjnej pewnej wartości spełniającej wszystkie ograniczenia: $\{X_i = d_i | 1, \dots, N\}$, gdzie $d_i \in D_i$.

3.1. Zmienne stanu w trzech problemach CSP

Do opisu pozycji ruchomej podpory (manipulatora mobilnego) wprowadzamy trzy układy współrzędnych kartezjańskich:

- 1) W – układ współrzędnych globalnych ($X^W Y^W Z^W$) zawiązany z nieruchomą ławą,

- 2) B – układ współrzędnych ($X^B Y^B Z^B$) związany z bazą mobilną,
- 3) P – układ współrzędnych ($X^P Y^P Z^P$) związany z manipulatorem równoległym.

Plan rozmieszczenia ruchomych podpór zawiera sekwencje pozycji każdego z agentów w dyskretnych chwilach czasowych oraz dwa dodatkowe indeksy czasowe:

- T_{beg} – najpóźniejsza chwila dojścia do aktualnej pozycji głowicy,
- T_{end} – najwcześniejsza chwila rozpoczęcia ruchu do następnej pozycji głowicy.

Plan obejmuje zatem trzy listy stanów poszczególnych elementów składowych obu agentów: głowicy (h), bazy mobilnych (b), manipulatorów równoległych (PKM) (p).

Stan głowicy pojedynczego agenta jest dany jako:

$$h_i = [T_{beg}, T_{end}, hc^W, hc^Y, hc^Z, h\alpha^W, h\beta^W, h\gamma^W], \quad (1)$$

gdzie współrzędne $({}_hcx^W, {}_hcy^W, {}_hcz^W)$ opisują położenie głowicy, zaś $({}_h\alpha^W, {}_h\beta^W, {}_h\gamma^W)$ są odpowiednio kątami obrotu wokół osi Z, Y, X , w globalnym układzie współrzędnych W . Zmienną decyzyjną (stanu) w procesie CSP dla głowicy $i = 1, 2$ jest sekwencja pozycji $\mathbf{X}_i = \{\mathbf{h}_{i,1}, \dots, \mathbf{h}_{i,N}\}$.

Stan bazy mobilnej agenta:

$$\mathbf{b}_i = [T_{beg}, T_{end}, {}_b cx^W, {}_b cy^W, {}_b cz^W, {}_b \theta^W; {}_b pkm\theta^W], \quad (2)$$

gdzie $({}_b cx^W, {}_b cy^W, {}_b cz^W)$ są współrzędnymi początku układu B w układzie globalnym W , zaś ${}_b \theta^W$ jest kątem obrotu bazy mobilnej i ${}_b pkm\theta^W$ jest kątem obrotu platformy obrotowej PKM w układzie W . Kąt ${}_b pkm\theta^W$ jest składnikiem wektora stanu bazy, gdyż w procesie CSP dla bazy musi być sprawdzane ograniczenie, iż $({}_b \theta^W - {}_b pkm\theta^W) \in (-2\pi, 2\pi)$. W procesie CSP dla baz zmienną decyzyjną jest sekwencja pozycji baz $\mathbf{X}_i = \{\mathbf{b}_{i,1}, \dots, \mathbf{b}_{i,N}\}$.

Stan manipulatora równoległego (PKM) jest dany w postaci wektora:

$$\mathbf{p}_i = [T_{beg}, T_{end}, \phi_0^W, leg_1, leg_2, leg_3, \psi_1^P, \psi_2^P, \psi_3^P, \beta_7^P], \quad (3)$$

gdzie ϕ_0^B jest kątem obrotu podstawy PKM wyrażony w układzie globalnym W . (leg_1, leg_2, leg_3) są długościami trzech nóg PKM a $(\psi_1^P, \psi_2^P, \psi_3^P)$ kątami Z-Y-Z Eulera wyrażonym w układzie P . Kąt β_7^P jest kątem obrotu siódmego stopnia swobody PKM również wyrażonym w układzie P . W procesie CSP dla PKM zmienną decyzyjną jest sekwencja pozycji PKM $\mathbf{X}_i = \{\mathbf{p}_{i,1}, \dots, \mathbf{p}_{i,N}\}$. Całkowity stan agenta $\mathbf{S}_i = [\mathbf{h}_i, \mathbf{b}_i, \mathbf{p}_i]$ składa się ze stanów jego części składowych (bazy, PKM i głowicy).

3.2. Grafy ograniczeń

Obliczone ścieżki muszą spełniać zbiór geometrycznych ograniczeń. Dla obu współpracujących robotów-podpór należy zdefiniować:

- Geometryczne ograniczenia między robotami i konturem obrabianego przedmiotu – określają one wymagania dla lokalizacji podpór w zależności od kształtu i rodzaju obrabianego przedmiotu.
- Przestrzeń roboczą PKM w celu sprawdzenia dopuszczalności pozycji głowicy i bazy mobilnej.
- Geometrycznych ograniczeń między bazami mobilnymi i PKM w celu unikania kolizji pomiędzy robotami w trakcie przemieszczania baz i PKM.
- Równania odwrotnego zadania kinematyki PKM w celu wyznaczania dopuszczalnych konfiguracji PKM przy zadanych pozycjach głowicy.

Ograniczenia są definiowane dla każdej części składowej robota: głowicy, bazy mobilnej i manipulatora równoległego.

3.2.1. Ograniczenia dla głowicy

Głowica R_i jest modelowana jako trójkąt równoboczny.

Dla każdej pozycji głowicy R_i są nałożone następujące ograniczenia (rys. 5):

- Maksymalna odległość między głowicą a brzegiem obrabianego elementu musi być mniejsza niż d_{max} w celu uniknięcia wibracji w trakcie frezowania konturu.
- Głowica nie może wchodzić w kontakt z narzędziem.
- Maksymalna odległość między dwoma kolejnymi głowicami nie może być większa niż D_{max} .

- Głowice nie mogą na siebie zachodzić a maksymalna ich odległość (liczona jako najmniejsza odległość punktów konturu będących rzutami dwóch „aktywnych” części obu głowic) wynosi D_h .

3.2.2. Ograniczenia dla baz

Przydział dla zmiennej decyzyjnej baz odpowiedniego stanu baz musi spełniać zbiór ograniczeń dla baz (rys. 6). Po pierwsze, muszą być spełnione ograniczenia na brak kolizji między dwoma agentami, czyli brak kolizji między głowicami i bazami. Następnie musi być spełnione ograniczenie zdefiniowane dla stanu bazy \mathbf{b}_k przypisanemu zmiennej \mathbf{X}_k i odpowiadającemu jej stanowi głowicy \mathbf{h}_k , takie że, głowica znajduje się w przestrzeni roboczej robota: $W_przestrzeni(\mathbf{b}_k, \mathbf{h}_k)$, dla $k = i - 1, \dots, i + 1$. Ostatnim ograniczeniem jest warunek, że trakcie przemieszczania się robota z jednej pozycji bazy \mathbf{b}_{i-1} do następnej pozycji \mathbf{b}_{i+1} baz może wykonać tylko jeden obrót (wokół jednej z nóg): $Jeden_krok(\mathbf{b}_{i-1}, \mathbf{b}_{i+1})$.

3.2.3. Ograniczenia dla manipulatora równoległego

Mamy trzy rodzaje ograniczeń dla manipulatora PKM (rys. 7):

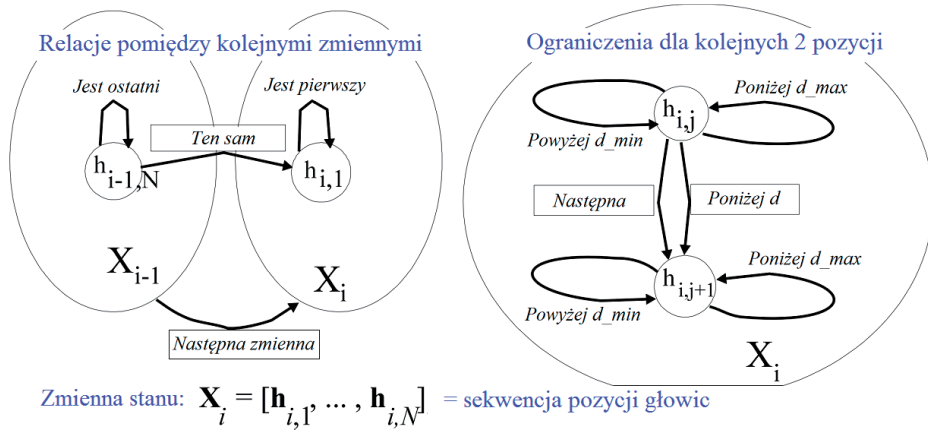
- *Kinematyka_odwrotna* $(\mathbf{h}_{i+1,k}, \mathbf{p}_{i+1,k})$ – stan głowicy \mathbf{h} i stan PKM \mathbf{p} muszą spełniać równania kinematyki odwrotnej dla manipulatora równoległego;
- *Brak_kolizji* $(\mathbf{S}_i, \mathbf{S}_{i+1,k-1}, \mathbf{S}_{i+1,k})$ – brak kolizji między przemieszczającym się agentem ze stanu $\mathbf{S}_{i+1,k-1}$ do stanu $\mathbf{S}_{i+1,k}$ i nieruchomym w tym czasie drugim agentem (będącym w stanie \mathbf{S}_i);
- *Nastepny_stan* $(\mathbf{p}_{i+1,k-1}, \mathbf{p}_{i+1,k})$ – wybór odpowiedniej kolejności stanów PKM.

4. Wyniki

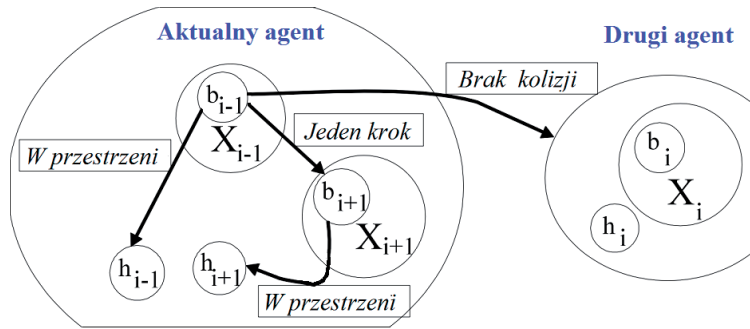
Przy obliczaniu pozycji głowic przyjęto następujące wartości parametrów $d_{min} = 2$ mm, $d_{max} = 20$ mm, $d_h = 20$ mm. Dla wybranych dwóch elementów wyznaczono wstępne plany rozmieszczenia głowic i baz wzdłuż konturu Na rys. 8 przedstawiono sekwencje pozycji głowic i odpowiadające im pozycje baz dla procesu frezowania konturu. Kolejne pozycje głowic zaznaczono trójkątami a odpowiadające im pozycje baz okręgami (kolorami rozrózniono roboty). Można zauważyć, że jednej pozycji bazy może odpowiadać jedna, dwie lub trzy pozycje głowicy. Oznacza to, że w pewnych przypadkach przemieszczenie robota do kolejnej pozycji podparcia nie wymaga obrotu bazy a jedynie przemieszczenia PKM. Dla przedmiotu numer 2 pokazano wyniki procesu wiercenia otworów rozmieszczonych na okręgu. Ponieważ liczba otworów wynosi 7, możemy aproksymować okrąg za pomocą siedmiokąta równobocznego. Boki leżą na prostych stycznych do okręgu w punktach „naprzeciw” otworów. Ponieważ ta aproksymacja może nie być wystarczająco dokładna, pokazujemy wyniki testów wykonanych dla 15-boku (rys. 9).

5. Podsumowanie

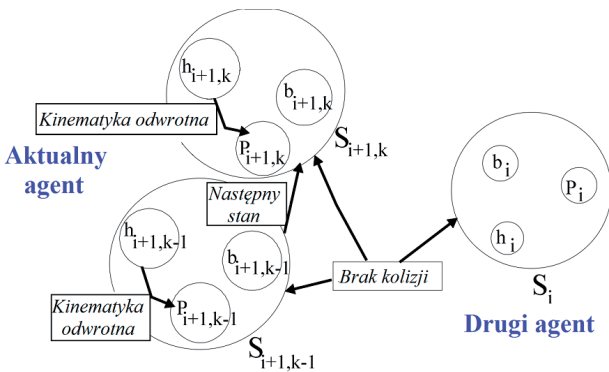
W pracy przedstawiono system planowania rozmieszczenia konfigurowalnych podpór dla cienkich blach o dużych rozmiarach realizowanych przez specjalizowane roboty – manipulatory mobilne. Proponowany system mocowań umożliwił szybką rekonfigurację podpór oraz dostosowanie się do



Rys. 5. Ograniczenia geometryczne dla rozmieszczenia głowic
 Fig. 5. Geometric constraints of head locations



Rys. 6. Graf ograniczeń dla planera baz
 Fig. 6. Graph of constraints for the base planner



Rys. 7. Graf ograniczeń dla planera manipulatora
 Fig. 7. Graph of constraints for the PKM planner

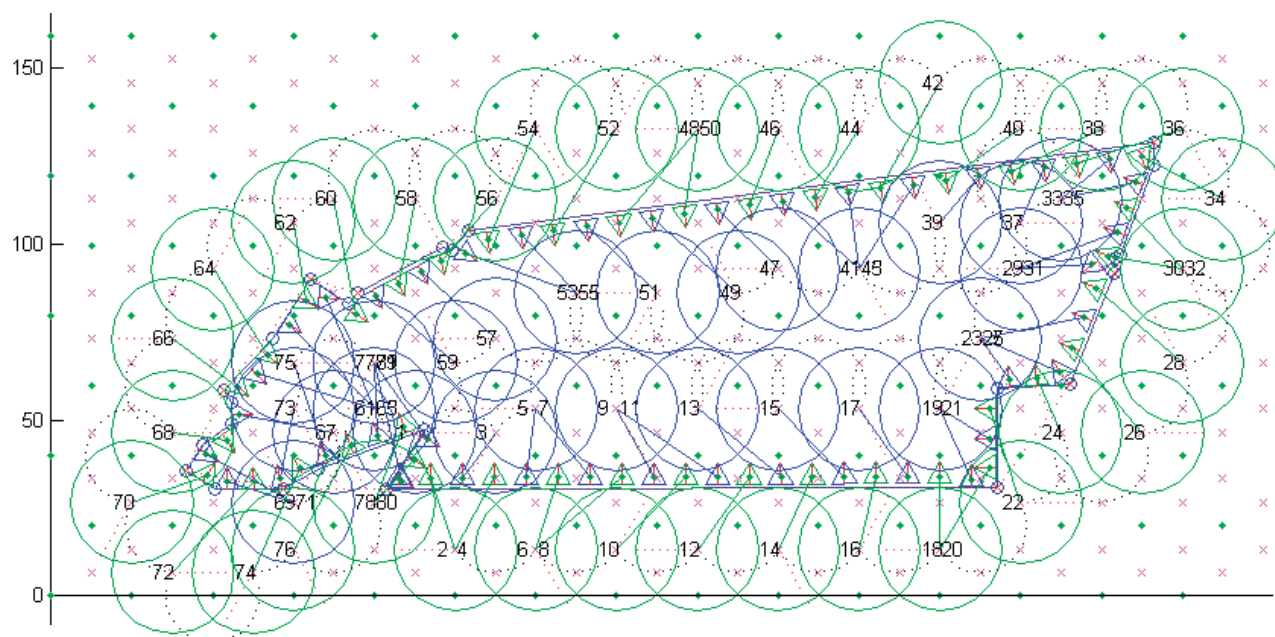
różnych kształtów i rozmiarów elementów. Istotną zaletą jest możliwość szybkiego przemieszczania się robotów w porównaniu do dotychczas stosowanych w przemyśle elastycznych systemów mocowań, co z kolei umożliwia stosowanie mniejszej liczby podpór-mocowań i ich koncentrację w obszarach aktualnie poddawanych obróbce. Przedstawiono ogólną strukturę systemu planowania i jego dekompozycję. Do rozwiązania zadania planowania wykorzystano algorytm CSP. Proponowane podejście umożliwiło uzyskanie dopuszczalnych planów rozmieszczania ruchomych podpór. Zaprezentowano przykładowe wyniki dla dwóch detali i dwóch operacji obróbczych.

Podziękowanie

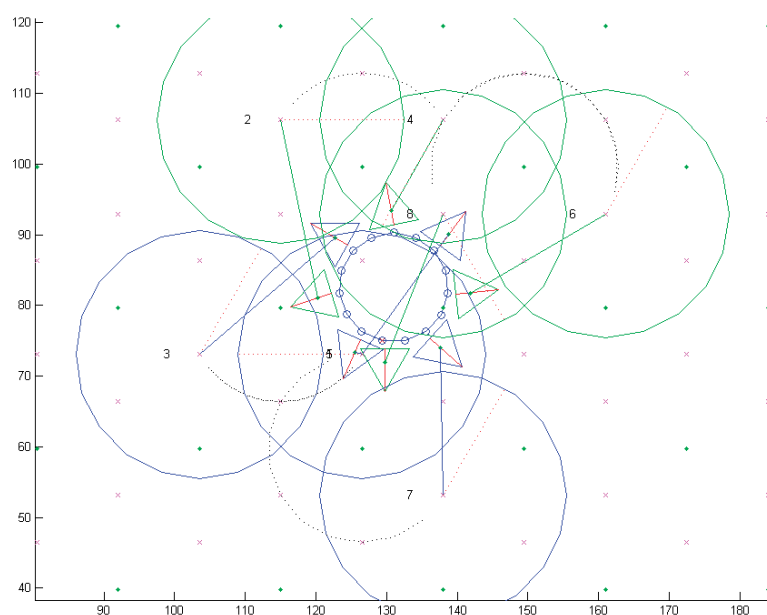
Prace wykonano w ramach projektu UE FP7-214678 SwarmItFix.

Bibliografia

1. Cai W., Hu S., Yuan J. (1996): *Deformable sheet metal fixturing: principles, algorithms, and simulations*, „Journal of Manufacturing Science and Engineering”, Trans. of the ASME, 118(3), 318–324.
2. Sela M.N., Gaudry O., Dombre E., Benhabib B. (1997): *A reconfigurable modular fixturing system for thin-walled flexible objects*, „Int. J. of Advanced Manufacturing Technology”, 13(9), 611–617.
3. Bi Z.M., Zhang W.J. (2001): *Flexible Fixture Design and Automation: Review, issues and future directions*. „Int. J. of Production Research”, 39(13), 2867–2894.
4. Kang Y., Rong Y., Yang J., Ma W. (2002): *Computer-aided fixture design verification*, „Assembly Automation”, 22(4), 350–359.
5. 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), 1–12.
6. Molfino R., Zoppi M., Zlatanov D. (2009): *Reconfigurable swarm fixtures*, [in:] REMAR 2009. Proc. of the ASME/IFToMM Int. Conference on Reconfigurable Mechanisms and Robots, 730–735.
7. Gonzalez-Rodriguez A.G., Gonzalez-Rodriguez A. (2011): *Collision-free motion planning and scheduling*,



Rys. 8. Plan rozmieszczenia głowic i baz dla frezowania pierwszej części
Fig. 8. Head and base path plan in milling of first workpiece



Rys. 9. Plan dla głowic i baz dla wiercenia otworów w drugim konturze – aproksymacja konturu wielokątem 15-bocznym
Fig. 9. Head and base path plan in hole drilling – contour approximation by a 15-sided-polygon.

„Robotics and Computer-Integrated Manufacturing”, 27(3), 657–665.

8. Li X., Zoppi M.i, Molfino R., de Leonardo Girard L.M. (2011): *Design of mobile base for a self-reconfigurable intelligent swarm fixture system*, [in:] CLAWAR 2011. The 14th Int. Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Paris, France, 917–921.
9. Neumann K.-E. (2008): *Structure concept of Exechon PKM*, Tech. Rep. 34, Exechon, Stockholm.
10. Avenente R., Khan M., Li X., Zoppi M., Zlatanov D., Molfino R. (2010): *Development and analy-*

- sis of a shape-conformable supporting head for a self-reconfigurable intelligent swarm fixture system*, [in:] ISR/ROBOTIK 2010, Proc. for the Joint Conference of 41st Int. Symposium on Robotics and 6th German Conference on Robotics, Munich, Germany, 792–799.
11. Russel S., Norvig P. (2002): *Artificial Intelligence. A Modern Approach*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
12. Kondrak G., van Beek P. (1997): *A theoretical evaluation of selected backtracking algorithms*, „Artificial Intelligence”, 89(1–2), 365–387. ■

Mobile fixture planning as a discrete constraint satisfaction problem

Abstract: The paper presents a planner module of a self-reconfigurable fixture system needed in the machining of thin-sheet large work-parts, namely milling and hole drilling processes. The proposed system consists of a power-supplying bench and two or more mobile robotic agents. The objective is to create an action plan for the positioning and reconfiguring of two or more mobile robotic fixtures that satisfies geometric and time-related constraints. The path planner structure, called Triple-CSP, consists of three levels of constraint satisfaction search. We propose an incremental, constraint-driven backtracking search to solve three hierarchic path planning tasks: for the supporting heads, the mobile bases, and the Parallel Kinematic Machine configurations of the mobile fixtures. The paper concentrates on the planner design and implementation and shows example plans obtained for milling and hole drilling processes.

Keywords: fixture planning, mobile fixtures, constraint satisfaction, cooperating agents, robotized machining

dr inż. Wojciech Szynkiewicz

Wojciech Szynkiewicz jest adiunktem w Instytucie Automatyki i Informatyki Stosowanej Politechniki Warszawskiej. Jego zainteresowania badawcze dotyczą planowania ruchu i sterowania pojedynczymi robotami oraz systemami wielorobotowymi. Zajmuje się również problematyką planowania zadań manipulacji dla robotów usługowych, w szczególności algorytmów syntezy chwytów i manipulacji zręcznej za pomocą wielopalczastych rąk. Jest autorem ponad 70 prac poświęconych tym zagadnieniom.
e-mail: w.szynkiewicz@elka.pw.edu.pl



dr hab. inż. Włodzimierz Kasprzak

Włodzimierz Kasprzak jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym Politechniki Warszawskiej od 1997 r. Wcześniej, w latach 1988-1996, prowadził badania naukowe w Niemczech i Japonii w zakresie wizji komputerowej i analizy sygnałów. Z zawodu jest inżynierem informatykiem, w 2002 r. uzyskał stopień doktora habilitowanego ze specjalnością Automatyka i Robotyka, a od 2005 r. jest profesorem nadzwyczajnym w Politechnice Warszawskiej. Specjalizuje się w zagadnieniach rozpoznawania obrazów i sygnałów mowy oraz metod sztucznej inteligencji. Jest autorem ponad 100 publikacji naukowych z tej dziedziny, w tym 3 książek.

e-mail: w.kasprzak@elka.pw.edu.pl



prof. dr hab. inż. Teresa Zielińska

Profesor Teresa Zielińska zajmuje się zagadnieniami robotyki, a w szczególności metodami syntezy ruchu robotów w tym robotów mobilnych, maszyn kroczących i robotów humanoidalnych. Obszarem jej zainteresowań badawczych jest wykorzystanie informacji pochodzących z czujników do generowania ruchu robotów w czasie rzeczywistym. Opracowała ona m.in. polimerowy czujnik sił ścinających o optycznym pomiarze oraz systemy sterowania i auto-nawigacji grupy maszyn kroczących. Teresa Zielińska jest zatrudniona na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej.

e-mail: teresaz@meil.pw.edu.pl

