
Planowanie rozmieszczenia ruchomych podpór przy obróbce przedmiotów o dużych rozmiarach*

Wojciech Szyrkiewicz¹, Włodzimierz Kasprzak¹, Teresa Zielińska²,
Dimitar Zlatanov³

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. Tego typu detale są powszechnie wykorzystywane w przemyśle samochodowym i lotniczym. W proponowanym rozwiązaniu system mocowań-podpór składa się z ruchomych agentów – manipulatorów mobilnych. Zadaniem planera jest wygenerowanie sekwencji wykonalnych pozycji dla każdego agenta spełniających ograniczenia geometryczne i czasowe. W niniejszej pracy omówiono strategię tworzenia planu dla pary zrobotyzowanych podpór oraz plan rozmieszczenia głowic dla obróbki dwóch wybranych części będących elementami kadłubu samolotu.

1. WPROWADZENIE

System mocujący jest urządzeniem do pozycjonowania, unieruchamiania oraz podpierania przedmiotu w trakcie procesu obróbczego. Istniejące systemy mocowań do obróbki cienkich blach o dużych rozmiarach można podzielić na trzy grupy: (1) duże formy o kształcie odwzorowującym docelowy kształt podpieranego przedmiotu, (2) modułowe, elastyczne systemy mocowań, (3) elastyczne systemy mocowań o pojedynczej strukturze. Duże formy, zazwyczaj stosowane jako podparcia w obróbce części z metalowych cienkich blach, są specyficzne dla danej części i nie są rekonfigurowalne. Modułowe systemy mocowań mogą być częściowe rekonfigurowalne z ręcznym przestawianiem podpór lub samo-rekonfigurowalne z matrycą podpór, z których każda ma wbudowany siłownik [6, 7]. Oprócz tradycyjnych systemów mocowań są stosowane systemy robotyczne, gdzie rolę mocowań i uchwytów pełnią manipulatory wyposażone w odpowiednie chwytaki [1, 4].

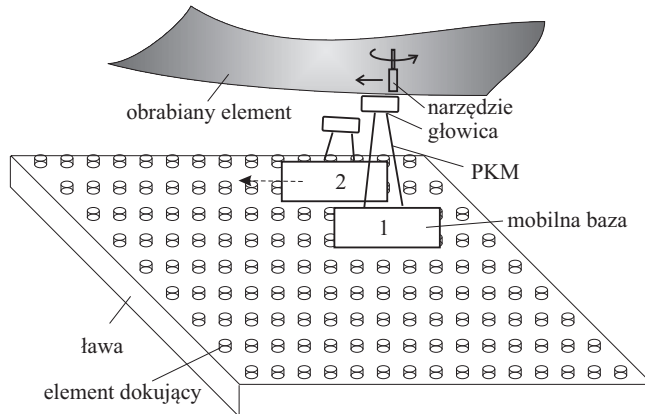
Jednym z istotnych etapów procesu projektowania systemów mocujących jest

*Prace wykonano w ramach grantu UE FP7-214678 pt. SwarmItFix.

¹Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej, Politechnika Warszawska, ul. Nowowiejska 15/19, 00-665 Warszawa, W.Szyrkiewicz@ia.pw.edu.pl

²Instytut Lotnictwa i Mechaniki Stosowanej, Politechnika Warszawska, ul. Nowowiejska 24, 00-665 Warszawa, teresaz@meil.pw.edu.pl

³DIMEC – Department of Mechanics and Machines Design, Faculty of Engineering, University of Genoa Via all'Opera Pia 15 a – 16145 Genoa, Italy.



Rys. 1. Ogólna struktura systemu ruchomych mocowań-podpór

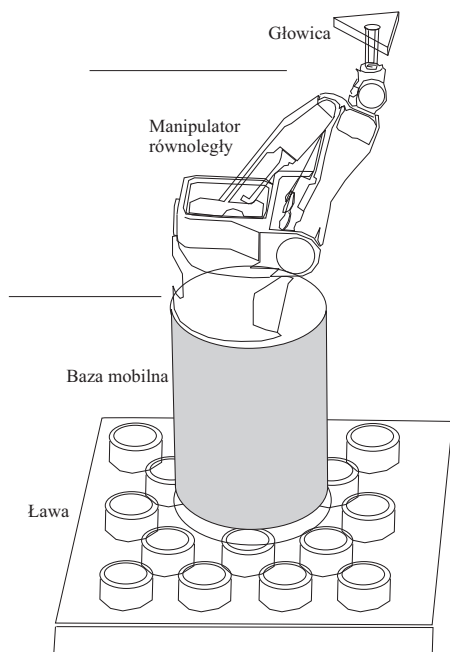
optymalizacja rozmieszczenia uchwytów i podpór w celu minimalizacji deformacji przedmiotu pod wpływem sił zaciskowych oraz sił obróbczych [3, 5, 8]. Do modelowania deformacji podatnych części stosuje się metodę elementów skończonych i określa się rozmieszczenie elementów mocujących w wyniku optymalizacji zadane-go wskaźnika jakości jako funkcji odkształcenia w węzłach siatki [2, 5].

Proponowany system rekonfigurowalnych mocowań-podpór łączy zalety modułowych systemów mocowań i systemów robotycznych z manipulatorami pełniącymi taką rolę. Każdy element systemu jest fizycznym agentem zbudowanym z bazy mobilnej wraz z posadowionym na niej manipulatorem równoległym (*parallel kinematic machine* – PKM), którego końcówką jest głowica samoadaptująca się do lokalnego kształtu podpieranego przedmiotu. Rozwiązanie to umożliwia łatwą i szybką rekonfigurację podpór przy jednoczesnym zapewnieniu odpowiedniej sztywności podparcia.

2. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU

2.1. Budowa agenta

Ideę systemu rekonfigurowalnych mocowań-podpór przedstawia rysunek 1. Składa się on z dwóch lub więcej agentów (manipulatorów mobilnych) przemieszczających się po ławie i podpierających od spodu obrabiany przedmiot. 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 okolicy miejsc poddawanych maszynowej obróbce. Każdy manipulator mobilny składa się z: głowicy adaptującej się do kształtu podpieranego materiału, manipulatora równoległego oraz mobilnej bazy (rys. 2). Głowica ma kształt trójkąta równobocznego o długości boku $L = 70 \text{ mm}$. Można wyróżnić dwa sposoby adaptacji głowicy: przez orientację głowicy odpowiednio do kierunku normalnej do powierzchni materiału i przez samoczynną deformację powierzchni głowicy, dociska-



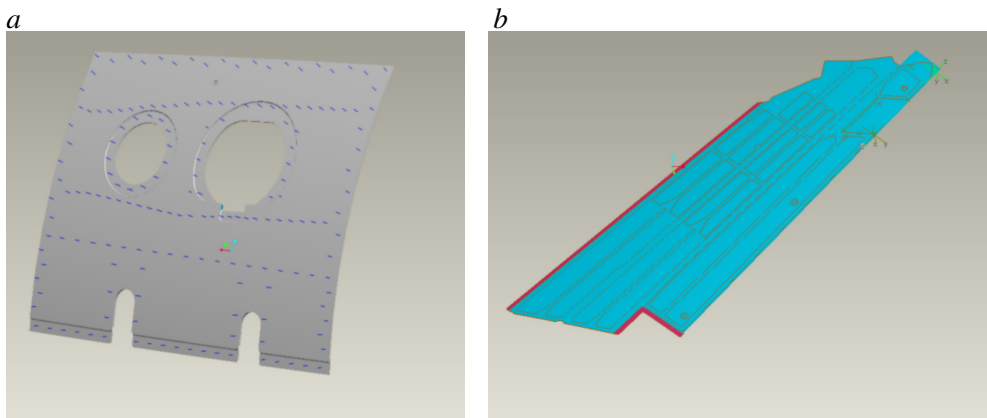
Rys. 2. Budowa pojedynczego agenta – podpory

nej do powierzchni materiału. Mobilna baza umożliwia przemieszczanie się podpory po ławie, zaś odpowiednie mechanizmy dokujące zapewniają stabilność i sztywność w trakcie operacji podpierania obrabianego elementu. W rozważanym przypadku proces obróbczy składa się z dwóch operacji: frezowania konturów oraz wiercenia otworów.

Celem pracy jest przedstawienie koncepcji planera dla systemu ruchomych agentów podpierających. Dysponując danymi CAD/CAM – geometrycznymi i czasowymi o obrabianym materiale, operacjach maszynowych i narzędziu obróbczym – planer powinien obliczyć odpowiednie sekwencje wykonalnych pozycji agentów, tak aby zapewnić odpowiednią sztywność podparcia w otoczeniu poruszającego się narzędzia.

2.2. Obrabiane elementy

Jako typowe przykłady elementów do procesu obróbki wybrano dwie części stosowane w przemyśle lotniczym – panel skrzydła i fragment pionowego statecznika. Ich charakterystyki pod względem kształtu konturu i rozmiarów są różne. 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 mm^{-1} wobec 0.0003 mm^{-1} dla drugiego elementu. Pierwsza część ma w miarę regularny kształt i duży środkowy otwór (rys. 3a). Do frezowania konturu jest stosowane narzędzie o średnicy 8 mm . Wiercone są też trzy otwory o średnicy 10 mm



Rys. 3. Obrabiane elementy

a – panel skrzydła (regularna część z otworami), b – pionowy statecznik (część o niejednorodnym kształcie)

i 98 otworów o średnicy 4.8 mm . Druga część ma stosunkowo niejednorodny kształt (rys. 3b). Do frezowania jest stosowane narzędzie o średnicy 8 mm . Celem wiercenia 2 otworów o średnicy 6 mm jest uzyskanie punktów bazowych dla mocowań.

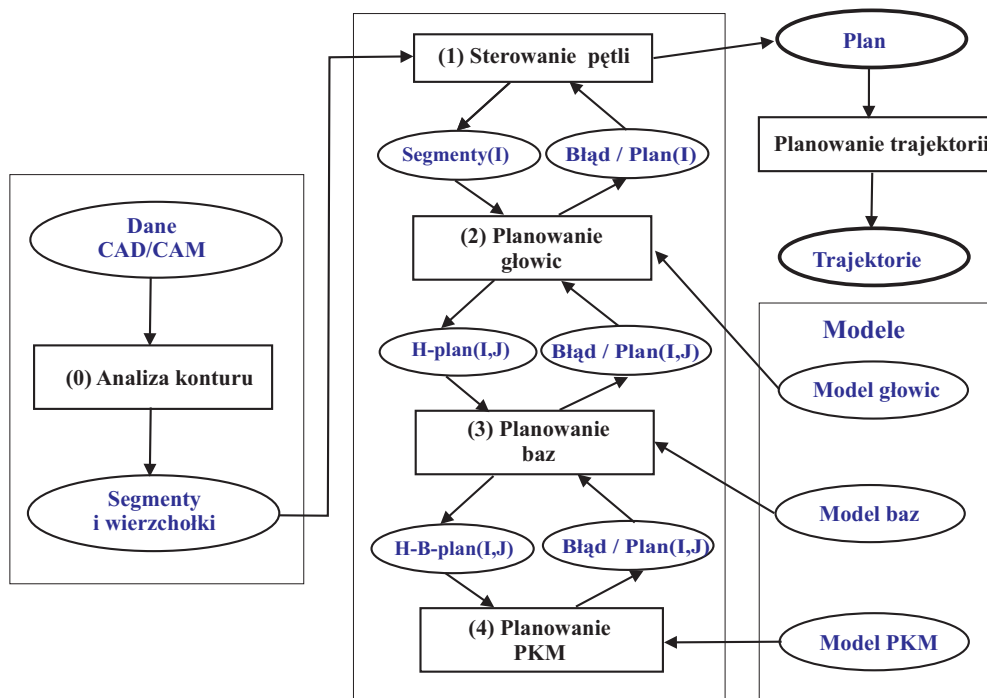
3. SYSTEM PLANOWANIA ROZMIESZCZENIA PODPÓR

Zadanie planowania dekomponujemy na cztery etapy: wyznaczenie sekwencji lokalizacji głowic podpierających, wyznaczenie odpowiadających im pozycji baz mobilnych, planowanie ścieżek dla manipulatorów równoległych oraz baz mobilnych. Na podstawie obliczonego planu system sterowania agenta generuje pożądane trajektorie ruchu dla manipulatorów równoległych i baz mobilnych.

3.1. Ogólna struktura planera

Na projekt systemu planowania ma wpływ wstępne wymaganie o możliwie jednolitej strukturze planera dla obu zadań: frezowania i wiercenia. Dlatego też proponujemy 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.

W strukturze planera wyróżniamy 5 warstw (rys. 4), oznaczonych cyframi od 0 do 4. Warstwa numer 0, określana też mianem początkowej, ma na celu analizę materiału. Dysponując danymi CAD wyznaczmy kontur dla procesu frezowania lub



Rys. 4. Ogólna struktura planera

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. Warstwa numer 1 stanowi 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 wywoływana warstwa 2, ewentualnie zwracająca plan częściowy dla agentów podpierających. W celu wykonania zadania w warstwie 2 musi być odwołanie do warstwy 3 a w tej z kolei następuje odwołanie do warstwy 4. W każdej z warstw 2, 3 i 4 wyróżniono moduły 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.

Warstwa 2 odpowiada za wyznaczenie sekwencji pozycji głowic. Taki plan powinien spełniać minimalny zbiór wymagań (ograniczeń) o charakterze geometrycznym nałożonych na: odległości pomiędzy kolejnymi dwoma głowicami, odległości pomiędzy każdą głowicą a konturem.

Hipotetyczny plan dla głowic wymaga weryfikacji w postaci istnienia odpo-

wiedniego planu dla baz. Celem warstwy 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.

W kolejnym kroku jest weryfikowany plan dla głowic i baz pod względem czasowym. Jest to cel warstwy 4, która dysponuje informacją o przebiegu operacji w czasie a także o parametrach dynamicznych dla głowicy, manipulatora i bazy.

4. PLAN ROZMIESZCZENIA GŁOWIC

4.1. Segmentacja konturu

W warstwie początkowej planera wykonuje się analizę konturu lub krzywej odpowiadającej procesowi frezowania względnie wiercenia szeregu otworów. Analizując kontur wyznaczone są punkty charakterystyczne – punkty nagłych zmian kierunku krzywej. Niektóre z nich zamieniane są na wierzchołki. Warunkiem takiej zamiany jest wystarczająco duży odstęp od najbliższych sąsiednich wierzchołków. W ten sposób unikamy krótkich segmentów konturu o długości porównywalnej z długością boku trójkątnej głowicy.

Wierzchołki są klasyfikowane w zależności od miary kąta między dwoma segmentami liniowymi tworzącymi kąt wierzchołkowy α . Z kolei od rodzaju segmentu i jego ograniczających wierzchołków zależy strategia rozmieszczania głowic. Wyróżniane są następujące typy wierzchołków w zależności od miary kąta α :

typ 1: $\alpha < 60^\circ$, typ 2: $60^\circ \leq \alpha < 90^\circ$, typ 3: $90^\circ \leq \alpha < 120^\circ$, typ 4: $120^\circ \leq \alpha < 165^\circ$, typ 5: $165^\circ \leq \alpha < 180^\circ$, typ 6: $\alpha \geq 180^\circ$).

4.2. Punkty zatrzymania

Pierwsze dwa typy wierzchołków są szczególnie interesujące z punktu widzenia planu rozmieszczania głowic. Wierzchołek typu 1 (jeśli istnieje) z dużym prawdopodobieństwem spowoduje niemożność kontynuowania procesu obróbki, gdyż zapewne nie będzie możliwe umieszczenie głowicy wystarczająco blisko jednego segmentu i jednocześnie nie spowoduje „wystawiania” części głowicy poza kontur drugiego segmentu. Taki wierzchołek nazwiemy „punktem zatrzymania” i uczynimy go punktem początkowym dla naszego planu rozmieszczenia głowic. Jeśli jest co najwyżej jeden taki wierzchołek to nadal jest duża szansa utworzenia jednego planu dla całego konturu, umożliwiającego frezowanie całego konturu bez zatrzymywania narzędzia. Jeśli jest więcej takich wierzchołków to jeden staje się początkowy a pozostałe są punktami oczekiwanego podziału planu na niezależne części.

Przy braku wierzchołków typu 1, wybieramy jeden z wierzchołków typu 2 (o kącie równym lub większym od 60°) jako punkt początkowy planu. Jest to bowiem idealny wierzchołek dla jednoznacznego związania z nim początkowej pozycji głowicy.

4.3. Ograniczenia geometryczne

W dalszych rozważaniach zakładamy, że kontur obrabianego elementu jest aproksymowany jako dwuwymiarowy (2D) wielobok z daną liczbą odcinków liniowych. Łamana zamknięta P jest opisana przez zbiór wierzchołków:

$$P = \{p_1, \dots, p_{M+1}\} = \{(x_1, y_1), \dots, (x_{M+1}, y_{M+1})\}, \quad (1)$$

gdzie pierwszy i ostatni wierzchołek pokrywają się $p_{M+1} = p_1$. Kontur składa się zatem z M odcinków, każdy opisany równaniem:

$$y = a_j x + b_j, \quad j = 1, \dots, M \quad (2)$$

Współczynniki a_j and b_j są liczone na podstawie współrzędnych punktów początkowego p_j i końcowego p_{j+1} dla danego odcinka konturu:

$$a_j = \frac{y_{j+1} - y_j}{x_{j+1} - x_j}, \quad b_j = y_j - a_j x_j \quad (3)$$

Głowica R_i jest modelowana jako trójkąt równoboczny

$$R_i = \{r_1, \dots, r_4\}, \quad \text{gdzie } r_4 = r_1 \quad (4)$$

o długości boku równym L .

Pozycja głowicy $q = [x, y, \theta]^T$, gdzie x, y są współrzędnymi kartezjańskimi a θ kątem orientacji w globalnym układzie odniesienia (w ogólnym przypadku pozycja głowicy jest opisywana w przestrzeni 3D). Dla każdego boku k głowicy i określamy wektor normalny $n_k^{R_i}$ oraz wektor normalny n_j^P do każdego odcinka P_j konturu P . Dla każdej pozycji głowicy R_i są nałożone następujące ograniczenia:

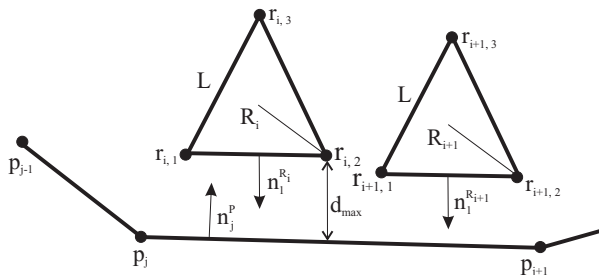
- Maksymalna odległość między głowicą a brzegiem obrabianego elementu musi być mniejsza niż d_{max} w celu uniknięcia wibracji w trakcie frezowania konturu.
- Głowica nie może wchodzić w kontakt z narzędziem.
- Maksymalna odległość między dwoma kolejnymi głowicami nie może być większa niż D_{max} .
-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

Na rysunku 5 zilustrowano ograniczenia geometryczne dla rozmieszczenia głowic: Odległość w metryce euklidesowej d punktu $p_k = (x_k, y_k)^T$ od odcinka $y = a_j x + b_j$ można obliczyć jako:

$$d = \frac{|y_k - a_j x - b_j|}{\sqrt{1 + a_j^2}} \quad (5)$$

Największa dopuszczalna odległość między głowicą R_i a konturem P musi być mniejsza niż d_{max} aby uniknąć wibracji

$$d_i(P, R_i) \leq d_{max}, \quad i = 1, \dots, N - 1 \quad (6)$$



Rys. 5. Ograniczenia geometryczne dla rozmieszczenia głowic

Oznacza to, że odległość między konturem obrabianego elementu a najbliższą do niego krawędzią $E_k^{R_i}$ głowicy R_i musi być mniejsza d_{max} . Głowice nie mogą zachodzić na siebie

$$\text{int}(R_i) \cap \text{int}(R_{i+1}) = \emptyset, \quad i, = 1, \dots, N-1, \quad (7)$$

gdzie $\text{int}(R_i)$ oznacza wnętrze głowicy. Możliwy jest jednak, kontakt głowic krawędziami lub wierzchołkami. Głowice stykają się jeśli spełnione są następujące warunki:

$$(r_{i,j-1}(\theta_i) - r_{i,j}(\theta_i)) \cdot n_k^{R_{i+1}}(\theta_{i+1}) \geq 0 \wedge (r_{i,j+1}(\theta_i) - r_{i,j}(\theta_i)) \cdot n_k^{R_{i+1}}(\theta_{i+1}) \geq 0, \\ i, = 1, \dots, N-1, j, k = 1, 2, 3. \quad (8)$$

Jeśli powyższy warunek jest spełniony wówczas krawędź $E_k^{R_{i+1}}$, głowicy R_{i+1} i wierzchołka $r_{i,j}$ głowicy R_i stykają się. W jednym skrajnym przypadku pokrywają się wierzchołki $r_{i,j}$ i $r_{i+1,k}$, a w drugim skrajnym przypadku wierzchołki $r_{i,j}$ i $r_{i+1,k+1}$.

Analogicznie, gdy spełniony jest warunek

$$(r_{i+1,j-1}(\theta_{i+1}) - r_{i+1,j}(\theta_{i+1})) \cdot n_k^{R_i}(\theta_i) \geq 0 \wedge \\ (r_{i+1,j+1}(\theta_{i+1}) - r_{i+1,j}(\theta_{i+1})) \cdot n_k^{R_i}(\theta_i) \geq 0, \\ i, = 1, \dots, N-1, j, k = 1, 2, 3. \quad (9)$$

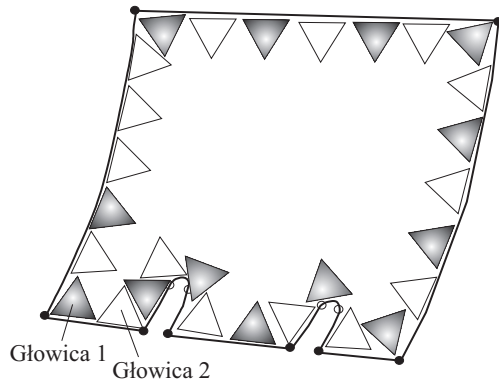
krawędź $E_k^{R_i}$ głowicy R_i i wierzchołka $r_{i+1,j}$ głowicy R_{i+1} stykają się. Podobnie jak wyżej, w skrajnych przypadkach, pokrywają się odpowiednie wierzchołki sąsiednich głowic. Głowice nie mogą wchodzić w kontakt z narzędziem, gdyż mogą ulec zniszczeniu

$$d_i(P, R_i) \geq d_{min}, \quad i = 1, \dots, N. \quad (10)$$

Podane wyżej warunki muszą być spełnione dla każdej lokalizacji głowicy podpierającej.

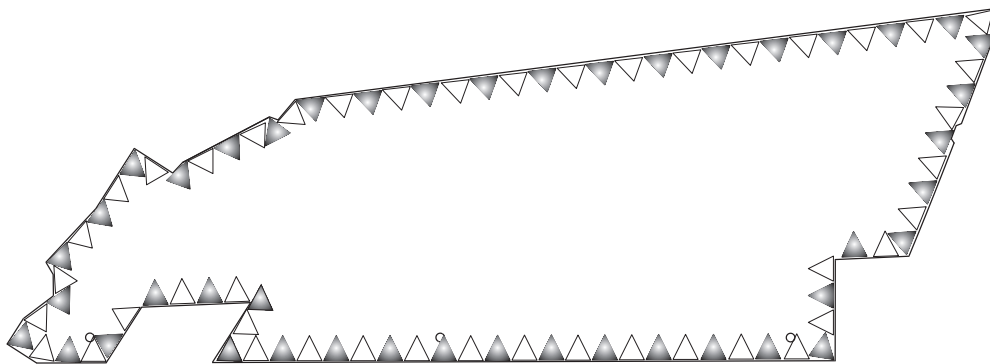
5. PRZYKŁAD

Przy obliczaniu pozycji głowic przyjęto następujące wartości parametrów $d_{min} = 2 \text{ mm}$, $d_{max} = 20 \text{ mm}$, $D_{Max} = 20 \text{ mm}$. Dla wybranych dwóch elementów wyznaczono wstępny plan rozmieszczenia głowic wzdłuż konturu. Kontur jest na przemian



Rys. 6. Plan rozmieszczenia głowic dla frezowania pierwszego konturu

podpierany przez dwa agenty (rys. 6 oraz rys. 7). Ze względu na kształt i rozmia-



Rys. 7. Plan dla głowic dla frezowania drugiego konturu

ry głowic obszary krytyczne pod względem spełnienia ograniczeń znajdują się przy wierzchołkach, dla których miara kąta przywierzchołkowego jest z zakresu $60^\circ < \alpha < 120^\circ$.

6. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono koncepcję systemu planowania rozmieszczenia konfigurowalnych podpór dla cienkich paneli (blach) o dużych rozmiarach realizowanych przez specjalizowane agenty – manipulatory mobilne. Proponowane urządzenie umożliwia szybką rekonfigurację podpór oraz dostosowanie się do różnych kształtów i rozmiarów elementów. Istotną zaletą jest możliwość szybkiego przemieszczania się agentów 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. W niniejszej pracy przedstawiono ogólną strukturę systemu planowania i jego dekompozycję. Zaprezentowano wstępne wyniki dla dwóch pierwszych etapów procesu planowania rozmieszczenia podpór: inicjalizacji i rozmieszczenia głowic wzdłuż obrabianego konturu. Dalsze prace będą koncentrowały się na kolejnych etapach procesu planowania rozmieszczenia ruchomych podpór.

LITERATURA

- [1] Z.M. Bi, W.J. Zhang. Flexible fixture design and automation: Review, issues and future directions. *Int. J. of Production Research*, 2001, wolumen 39, numer 13, s. 2867–2894.
- [2] W. Cai, S.J. Hu, J.X. Yuan. Deformable sheet metal fixturing: principles, algorithms, and simulations. *T ASME, J. Manufacturing Sci. Eng.*, 1996, wolumen 118, numer 3, s. 318–324.
- [3] E. C. DeMeter. Fast support layout optimization. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 1998, wolumen 38, numer 10–11, s. 1221–1239.
- [4] Y. Kang et al. Computer-aided fixture design verification. *Assembly Automation*, 2002, Vol. 22, No. 4, s. 350–359.
- [5] R. Menassa, W. De Vries. Optimization methods applied to selecting support positions in fixture design. *ASME J. of Engineering for Industry*, 1991, Vol. 113, No. 4, s. 412–418.
- [6] M.N. Sela et al. A reconfigurable modular fixturing system for thin-walled flexible objects. *Int. J. of Adv. Manufacturing Technology*, 1997, wolumen 13, numer 9, s. 611–617.
- [7] B. Shirinzadeh, Y. Tie. Experimental investigation of the performance of a reconfigurable fixture system. *Int. J. of Adv. Manufacturing Technology*, 1995, wolumen 10, numer 5, s. 330–341.
- [8] S. Vallapuzha et al. An investigation of the effectiveness of fixture layout optimization methods. *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*, 2002, Vol. 42, No. 2, s. 251–263.

PLANNING OF ACTIVE SUPPORTS PLACEMENT IN MACHINING OF BIG WORKPIECES

A planner for self adaptable, reconfigurable fixture system is proposed. This system is composed of mobile agents supporting thin sheet metal parts to minimize part dimensional deformation during drilling and milling operations. Compliant sheet metal parts are widely used in various manufacturing processes including automotive and aerospace industries. The main role of the planner is to generate the feasible plan of relocation of the mobile agents. It has to find admissible locations for the supporting heads that provide continuous support in close proximity to the tool.