

Damian M. DZIAK\*  
Bartosz S. JACHIMCZYK\*

## **WPLYW AUTOMATYCZNEJ KALIBRACJI WIZYJNEGO SYSTEMU POZYCJONOWANIA NA DOKŁADNOŚĆ LOKALIZACJI ELEMENTU ROBOCZEGO**

W artykule przedstawiono strukturę i działanie automatycznego wizyjnego systemu pozycjonowania (PVS), który został zainstalowany na maszynie waterjet (WJ). Ponadto przeprowadzono analizę wpływu kalibracji na działanie PVS. Podstawę systemu stanowią dwie kamery internetowe zamontowane na przemysłowej maszynie WJ. W połączeniu z algorytmem identyfikacji, system przeznaczony jest do pozycjonowania WJ z dużą dokładnością. W tym celu opracowano dwustopniową procedurę kalibracyjną wykorzystującą zestaw znaczników kalibracyjnych w kolorze kontrastującym do tła. Analiza uzyskanych wyników, pokazuje że proponowana metoda pomimo wymagających warunków środowiskowych pozwala na niezawodne pozycjonowanie maszyny WJ z wysoką dokładnością.

### **1. WSTĘP**

W większości technik komputerowego sterowanie urządzeniami numerycznymi (CNC) operator jest zobowiązany do manualnego określenia punktu startowego przed procesem cięcia. Jest to zadanie czasochłonne i z powodu ograniczonej dokładności powodujące straty materiału [1]. System wizyjny zainstalowany na maszynie typu waterjet (WJ) umożliwia skrócenie procesu pozycjonowania oraz zwiększenie dokładność lokalizacji elementu roboczego.

W artykule tym przedstawiono wizyjny system pozycjonowania (PVS) zaimplementowany na maszynie waterjet w Swedish Waterjet Lab w Ronneby w Szwecji [1]. Artykuł dotyczy głównie analizy zastosowanej metody kalibracji systemu, oraz wpływu tej metody na precyzję pozycjonowania systemu.

Otrzymane wyniki pokazują znaczącą poprawę dokładność lokalizacji elementów w obszarze roboczym maszyny WJ w przypadku stosowania proponowanej metody automatycznej kalibracji PVS. Udowodniono również, że zastosowanie automatycznej kalibracji systemu wizyjnego umożliwia dokładność pozycjonowania nieosiągalną dla oka ludzkiego.

---

\* Politechnika Gdańska.

Aranda Penaranda i inni do celów inspekcji i optymalizacji procesu cięcia techniką WJ, wykorzystali system wizyjny z kamerą z obiektywem zmiennoogniskowym sterowanym serwomechanizmem [2]. Kalibracja systemu oparta jest na zastosowaniu szachownicy, jako wzorca kalibracyjnego. Dodatkowo do celów kompensacji aberracji optycznych wykorzystano algorytm wyznaczający macierz korekcji zależną od długości ogniskowej obiektywu.

W [3] system wizyjny wyposażony w szereg kamer liniowych monitorujących pracę maszyny WJ do celów kalibracji wykorzystuje wzorcowy blok kalibracyjny z naklejonymi znacznikami odniesienia. W rezultacie zastosowanej procedury zdefiniowane są wektory korekcyjne niezbędne do transformacji układów współrzędnych kamer w odpowiadający układ współrzędnych maszyny.

## 2. PROBLEM BADAWCZY

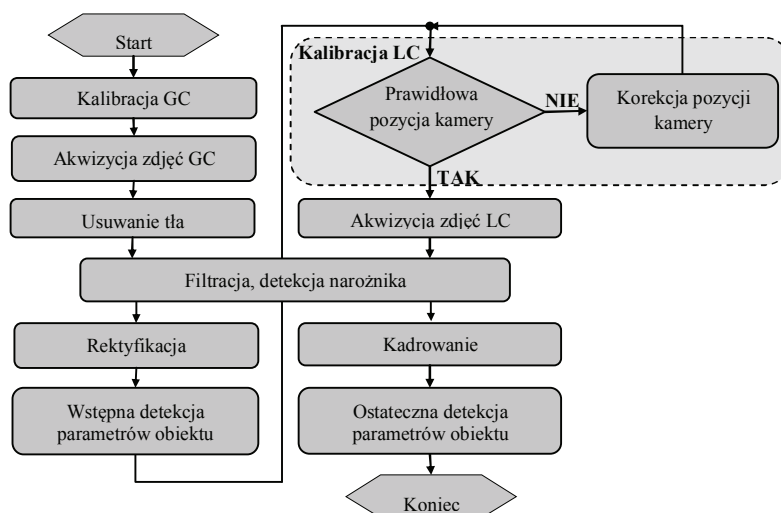
Istotą procesu kalibracji systemu wizyjnego jest określenie precyzyjnej relacji pomiędzy układem współrzędnych kamery, a odpowiadającym układem współrzędnych maszyny WJ. Precyzja tej relacji jest ograniczona strukturą przestrzeni roboczej (ponacinana kratownica), warunkami środowiskowymi (ścierniwo, woda, pozostałości ciętych materiałów) oraz wpływami niedostatecznego poziomu oświetlenia. Dlatego opracowanie niezawodnej i odpornej na wymienione zakłócenia procedury kalibracji może stanowić interesujący problem tak inżynierski jak i naukowy.

Zgodnie z wymaganiami użytkownika rozważany problem kalibracji zdefiniowano następująco: jaka metoda kalibracji dwukamerowego systemu wizyjnego zastosowanego do pozycjonowania maszyny waterjet w warunkach rzeczywistych, zapewnia dokładność lokalizacji elementu roboczego na poziomie  $\pm 0.5$  mm? Tak sformułowany ogólny problem prowadzi do dwu kolejnych pytań. Po pierwsze, w jaki sposób skalibrować kamerę globalną (GC) tak, aby możliwa była poprawna lokalizacja elementu roboczego wykorzystując kamerę lokalną (LC)? Ponadto, jaki końcowy wpływ na niedokładność lokalizacji elementu roboczego ma proces kalibracji lokalnej kamery PVS?

Uwzględniając budowę dwukamerowego systemu wizyjnego, strukturę rzeczywistej przestrzeni roboczej maszyny WJ oraz trudne warunki środowiskowe, można przyjąć, że dwustopniowa kalibracja systemu PVS, oparta o detekcję wzorców kalibracyjnych w kolorze kontrastującym do obszaru roboczego maszyny zapewnienia wymaganą dokładność identyfikacji obiektu. Poprzez wykorzystanie czterech znaczników kalibracyjnych wyznaczających rzeczywistą przestrzeń roboczą maszyny WJ, największy błąd systematyczny kamery globalnej nie przekroczy 60 mm, co umożliwi poprawną lokalizację narożnika elementu kamerą lokalną. Poprzez właściwe zamontowanie markera referencyjnego, niedokładność lokalizacji elementu roboczego przez PVS może być zminimalizowana do wartości poniżej 0.5 mm.

### 3. WIZYJNY SYSTEM POZYCJONOWANIA

Głównym zadaniem prezentowanego systemu wizyjnego jest lokalizacja elementu roboczego i automatyczne pozycjonowanie maszyny WJ. Poprzez detekcję pozycji i rotacji elementu umieszczonego w przestrzeni roboczej, system z wymaganą dokładnością określa macierz transformacji układu współrzędnych. Dwie powszechnego użytku kamery internetowe stanowią cechę charakterystyczną prototypowego systemu wizyjnego. Kamera globalna zamontowana nad maszyną służy do lokalizacji przybliżonej pozycji elementu roboczego. Do określenia dokładnej pozycji narożnika oraz rotacji elementu, jest wykorzystana kamera lokalna przymocowana do głowicy tnącej. Aby zapewnić kalibrację in situ, w obszarze roboczym umieszczono cztery markery referencyjne wyznaczające rzeczywistą przestrzeń pracy maszyny. Komputer typu PC sterujący systemem wizyjnym jest połączony z systemem sterowania Sinumeric 840d sl, który bezpośrednio kontroluje pracę maszyny WJ.



Rys. 1. Schemat blokowy algorytmu PVS

System wizyjny wykorzystuje algorytm identyfikacji przedstawiony na rys. 1, który zapewnia dokładne określenie koordynaty narożnika i odchylenie kątowe elementu. Wstępna filtracja ma na celu wyodrębnienie elementu z obszaru roboczego maszyny oraz ekstrakcji jego cech charakterystycznych. Jest to niezbędna część algorytmu, umożliwiająca pracę systemu przy dużym poziomie zakłóceń w tle elementu w warunkach zwykłego oświetlenia. W kolejnej fazie algorytmu, na obrazie uprzednio poddanym procesowi binaryzacji, zastosowano funkcję wykrywania krawędzi, opartą na metodzie Canny'ego. W rezultacie tego

działania wyznaczone są kontury elementu w obszarze roboczym. W następnym etapie zastosowano transformację Hough'a [4], która na podstawie konturów elementu aproksymuje linie proste, znajdujące się na obrazie. Identyfikując punkt przecięcia wyznaczonych linii krawędzi elementu, część decyzyjna określa narożnik szukanego elementu.

## 4. KALIBRACJA PVS

Kalibracja *in situ* proponowanego systemu wizyjnego stanowi kluczową część algorytmu umożliwiającą integrację systemów współrzędnych PVS i maszyny WJ. Przy założonym poziomie dokładności rzędu 0.5 mm manualna kalibracja jest niewystarczająca, dlatego niezbędne było opracowanie automatycznej procedury kalibrującej. W tym celu zastosowano zestaw składający się z czterech znaczników referencyjnych w kolorze kontrastującym do otoczenia. Markery te wykorzystywane są zarówno do kalibracji kamery globalnej jak i lokalnej. Procedura określa zależności pomiędzy układami współrzędnych maszyny i kamery i podzielona jest na dwa etapy: kalibrację kamery globalnej, a następnie kalibrację kamery lokalnej.

### 4.1 Kalibracja kamery globalnej

Do kalibracji kamery globalnej wykorzystano cztery znaczniki kalibracyjne w kolorze kontrastującym do tła obrazu tak, aby wyodrębnić je na histogramie. Markery rozmieszczone w narożnikach stołu roboczego, patrz rys. 2a, wyznaczają rzeczywistą przestrzeń pracy maszyny WJ, patrz rys. 2b.

Pierwszym etapem jest wyodrębnienie markerów od tła obrazu, wykorzystując proces segmentacji koloru poprzez progowanie według:

$$g(x,y) = \begin{cases} 0 & \text{gdy } f(x,y) < K_1 \\ f(x,y) & \text{gdy } K_1 \leq f(x,y) \leq K_2 \\ 0 & \text{gdy } f(x,y) \geq K_2 \end{cases} \quad (1)$$

gdzie  $g(x,y)$  jest przetworzonym obrazem;  $f(x,y)$  jest segmentowanym obrazem;  $K_1$ ,  $K_2$  są wektorami progowymi koloru wyznaczonymi na podstawie analizy histogramu obrazu.

W kolejnej fazie kalibracji dokonane zostają: binaryzacja obrazu, filtracja zakłóceń oraz detekcja konturów. Wykorzystując aproksymację linii transformacją Hough'a wyznaczone zostają narożniki markerów. Wierzchołki markerów kalibracyjnych znajdujące się najbliżej środka obrazu wyznaczają przybliżony obszar roboczy maszyny. Opierając się na współrzędnych tych punktów w procesie rektyfikacji wyznaczona zostaje macierz transformacji układu współrzędnych kamery do układu współrzędnych maszyny. Rysunek 2b przedstawia obraz przestrzeni roboczej po rektyfikacji.

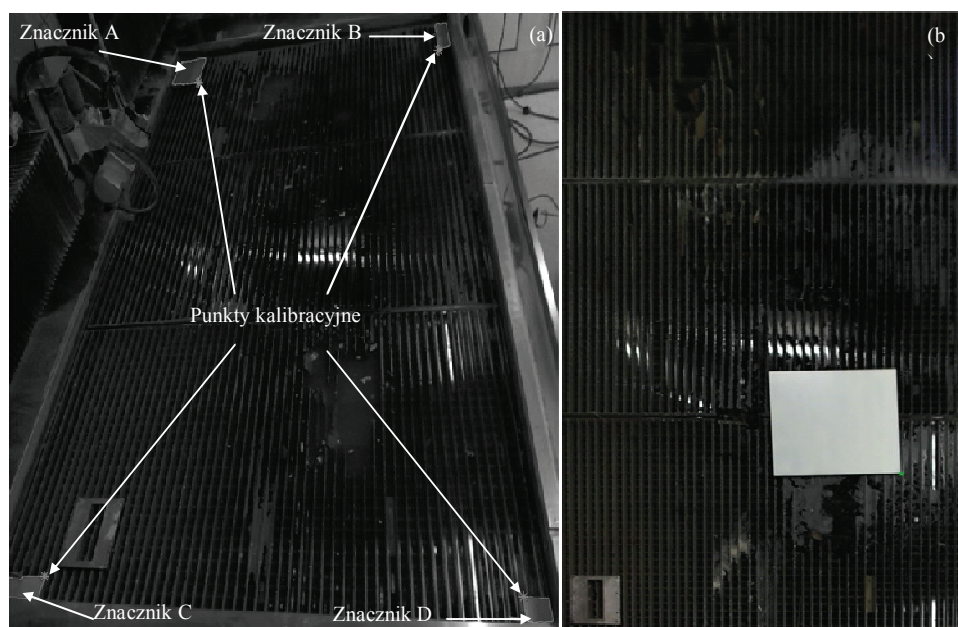


## 4.2 Kalibracja kamery lokalnej

Ze względu na wymaganą dokładność lokalizacji elementu oraz brak dodatkowego obiektywu, LC została zamontowana przy głowicy tnącej maszyny. W tym celu przygotowany został element mocujący, który umożliwia szybki demontaż. Obrazy uzyskiwane z LC wykorzystywane są zarówno do precyzyjnej detekcji narożnika elementu roboczego, jak i w procesie kalibracji samej kamery.

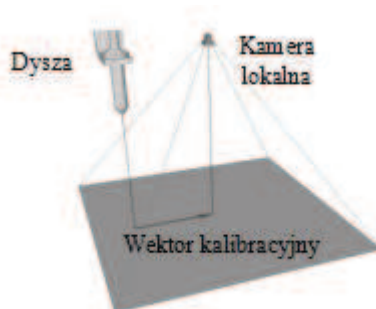
Procedura kalibracji wykorzystuje jeden ze znaczników kalibracyjnych używany podczas procesu kalibracji GC. Ze względu na ograniczenia obszaru pracy maszyny oraz sposobu zamontowania LC, do tego celu wybrano marker A, patrz rys. 2a. Zadaniem procesu kalibracji LC jest wyznaczenie wektora kalibracji rys. 3. Na jego podstawie obliczana jest odległość o jaką należy przesunąć dyszę maszyny WJ, aby jej środek znalazł się dokładnie nad wyznaczonym narożnikiem.

Proces kalibracji rozpoczyna się przesunięciem dyszy maszyny na domyślną pozycję, w której środek sensora LC znajduje się nad narożnikiem znacznika kalibracyjnego. Następnie, analogicznie jak przy kalibracji GC, następuje detekcja narożnika znacznika kalibrującego. Po korekcji położenia maszyny wyznaczana jest dokładność z jaką zidentyfikowany narożnik znajduje się w środku obrazu. Cały proces kalibracji jest powtarzany dopóki wykryty narożnik nie znajdzie się na środku obrazu w odległości  $\pm 1$  piksel, co uwzględniając wysokość zamontowania kamery oraz jej rozdzielczość odpowiada 0.1278 mm.



Rys. 2. (a) Rozmieszczenie markerów na stole roboczym, (b) obraz po rektyfikacji

Uzyskane współrzędne położenia dyszy są odejmowane od znanych współrzędnych narożnika markera kalibrującego. W ten sposób obliczany jest wektor, o który należy przesunąć maszynę WJ tak, aby po zlokalizowaniu narożnika elementu roboczego, dysza tnąca znajdowała się nad nim, z dokładnością  $\pm 0.5$  mm. Interpretacja graficzna wektora kalibracyjnego przedstawiona jest na rys. 3.



Rys. 3. Interpretacja graficzna wektora kalibracyjnego

Na podstawie przeprowadzonych testów można stwierdzić, że do uzyskania wymaganej dokładności kalibracji wystarczają dwie iteracje. W przypadku, gdy potrzeba ich więcej, może to świadczyć o tym, że kamera jest nieprawidłowo zamontowana i niemożliwe jest wyznaczenie pozycji z wymaganą dokładnością.

## 5. WERYFIKACJA WPLYWU KALIBRACJI NA DOKŁADNOŚĆ LOKALIZACJI ELEMENTU ROBOCZEGO

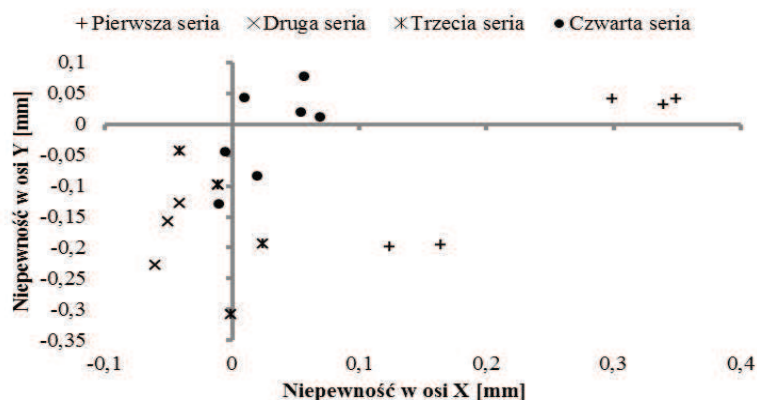
W celu określenia wpływu kalibracji PVS na dokładność lokalizacji elementu roboczego, przeprowadzono dwuetapowy proces weryfikacji. W pierwszym etapie sprawdzono dokładność kalibracji kamery globalnej, drugim zaś zweryfikowano dokładność kamery lokalnej.

Kamera globalna służy do wstępnej, przybliżonej lokalizacji elementu umieszczonego w obszarze roboczym maszyny WJ. Wyznaczone współrzędne wykorzystywane są w części programu odpowiedzialnej za precyzyjną detekcję narożnika przez LC. Wymagana dokładność lokalizacji elementu za pomocą GC według założeń wynosiła  $\pm 60$  mm. Wartość ta wynika z ograniczenia pola widzenia kamery lokalnej. W przypadku dokładności lokalizacji GC gorszej niż 60 mm, element mógłby znaleźć się poza polem widzenia LC.

Dokładność kalibracji GC określona jest na podstawie porównania współrzędnych narożnika wykrytego przez GC ze współrzędnymi narożnika wykrytego za pomocą skalibrowanej LC. Uwzględniając pozycję zamontowania kamery globalnej, w największej odległości od sensora kamery znajdował się znacznik A, patrz rys. 2a, co warunkuje potencjalnie największą niedokładność lokalizacji elementu roboczego. W

trakcie badań dokładności lokalizacji GC wykonano serię 15 pomiarów, z których średni błąd systematyczny dokładności lokalizacji narożnika znacznika A za pomocą GC wynosił 14.55 mm przy odchyleniu standardowym 1.1 mm. Z uzyskanych pomiarów wynika, że zaproponowana metoda kalibracji zapewnia dokładność cztery razy lepszą od wymaganej, co zapewnia, że element wstępnie zlokalizowany zawsze znajdzie się w polu widzenia LC.

Aby określić dokładność procesu kalibracji LC, weryfikacja została przeprowadzona w czterech seriach pomiarowych. Rysunek 4 prezentuje wyniki pomiarów w poszczególnych seriach. Podczas pierwszej serii testów, dokładność lokalizacji narożnika elementu roboczego, spełniła wymagane założenia projektowe. Dalsza analiza wykazała, że dostosowując położenie markera kalibracyjnego możliwe jest uzyskanie jeszcze większych dokładności. Pomiary z ostatniej, czwartej serii wskazują dokładność precyzji lokalizacji narożnika elementu roboczego na poziomie  $\pm 0.1$  mm. Dalsze manipulacje markerem generowały niepewności pomiarowe oscylujące wokół wartości 0.1 mm. Biorąc pod uwagę niepewność pomiarową (ograniczenia) maszyny oraz dokładność algorytmu PVS 0, błąd kalibracji był bliski zeru.



kalibrującego, bądź równoważną kompensację odpowiednim wektorem korekcyjnym, niedokładność kalibracji kamery lokalnej może być zredukowana do wartości bliskiej zeru. Tak dokładna kalibracja w połączeniu z PVS zapewniła detekcję narożnika elementu roboczego na poziomie  $\pm 0.1$  mm, co jest wynikiem pięć razy lepszym od wymaganego w projekcie.

### LITERATURA

- [1] D. Dziak, B. Jachimczyk, T. Jagusiak, "Automatic Waterjet Positioning Vision System," Praca magisterska, Dept. Elect. Eng, Blekinge Institute of Technology, Karlskrona, Szwecja, 2012. Praca dostępna na stronie: <http://www.bth.se/fou/cuppsats.nsf/all/4ff555e8246b1acec1257a610034549f?Dostęp> [8 Stycznia 2013].
- [2] J. D. Aranda Penaranda, J. A. Ramos Alcazar, L. M. Tomas Balibrea, J. L. Munoz Lozano, R. Torres Sanchez, "Inspection and measurement of leather system based on artificial vision techniques applied to the automation and waterjet cut direct application," in *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, San Antonio, Texas, 1994, vol. 1, str. 863–867.
- [3] J. Paakkari, H. Ailisto, M. Niskala, M. Makarainen, K. Vainamo, "Machine-vision-guided waterjet cutting," in *EUROPTO Conference on Diagnostic Imaging Technologies and Industrial Applications*, Munich, 1999, str. 44–51.
- [4] L. Yimin, L. Naiguang, L. Xiaoping, S. Peng, "A novel approach to sub-pixel corner detection of the grid in camera calibration," in *International Conference on Computer Application and System Modeling*, Taiyuan, 2010, str. V5-18-V521.
- [5] D. Dziak, B. Jachimczyk, W. Kulesza, "A Survey of Uncertainty and Robustness of Waterjet Machine Positioning Vision System," in the 17th International Conference Electronics 2013, Palanga, Lithuania, Czerwiec, 2013 (submitted).

### THE IMPACT OF AUTOMATIC CALIBRATION ON POSITIONING VISION SYSTEM ON WORKPIECE LOCALIZATION ACCURACY

This paper presents the structure and principle of operation of the Automatic Waterjet Positioning Vision System (PVS), which was implemented on the waterjet (WJ) machine. Moreover, it presents the impact of calibration method on PVS performance. Two webcams mounted on industrial WJ, form a basis of the system, and constitute its characteristics features. By a combination with the identification algorithm, the PVS was designed for high accuracy positioning of WJ machine. For this purpose, the two-step calibration procedure that uses a set of specific calibration markers in color contrasting to the background, has been developed. The analysis of results shows that, proposed method despite demanding environmental conditions, enables reliable high accuracy positioning of WJ machine.