

Pomiary ustawienia uchwytów nożowych na pobocznicy głowicy urabiającej kombajnu górniczego z wykorzystaniem widzenia stereoskopowego

Amadeus Jagieła-Zajac
Piotr Cheluszka

Measurement of the pick holders position on the side surface of the cutting head of a mining machine with the use of stereoscopic vision

Streszczenie:

O efektywności urabiania skał kombajnami górniczymi decyduje w dużym stopniu układ noży, a więc liczba i sposób ich rozmieszczenia na organie roboczym maszyny urabiającej. Istotne znaczenie ma nie tylko prawidłowy dobór układu noży do danych warunków na etapie projektowania, lecz również zapewnienie zgodności z projektem gotowego wyrobu. Dąży się m.in. dlatego do robotyzacji procesu wytwarzania głowic/organów urabiających kombajnów górniczych. Z punktu widzenia możliwości robotyzacji procesu spawania uchwytów nożowych niezbędna jest ocena w czasie rzeczywistym ustawienia uchwytów nożowych względem powierzchni pobocznicy kadłuba głowicy urabiającej. Dogodnym sposobem jest tu wykorzystanie bezstykowych metod pomiaru, opartych na systemach wizyjnych. W artykule przedstawiono metodę wyznaczania ustawienia uchwytów nożowych względem pobocznicy kadłuba głowicy urabiającej kombajnu chodnikowego, w trakcie ich pozycjonowania, z wykorzystaniem systemu wizyjnego 3D. Przetwarzanie danych zrealizowane zostało w środowisku Matlab z wykorzystaniem bibliotek pakietu Computer Vision Toolbox. Przetawiono model matematyczny opisujący transformację obrazów zarejestrowanych przez kamery, w oparciu o którą wyznaczono rozkład odległości pomiędzy punktami podstawy uchwytu nożowego i pobocznicy kadłuba głowicy urabiającej, dla zadanego ustawienia uchwytu nożowego. Opracowaną metodę pomiaru przetestowano na stanowisku doświadczalnym zbudowanym w Laboratorium robotyki Katedry Mechanizacji i Robotyzacji Górnictwa Politechniki Śląskiej

Abstract:

The efficiency of rock cutting with mining machines is largely determined by the arrangement of picks, i.e. the number and their arrangement on the working unit of the mining machine. Not only the correct selection of the pick system for given conditions at the design stage is important, but also ensuring compliance with the design of the finished product. Strives, among others therefore, for robotisation of the process of manufacturing cutting heads/drums. From the point of view of the robotisation of the pick holders welding process, it is necessary to assess in real time the position of the pick holders relative to the side surface of the cutting head body. A convenient way is to use contactless measurement methods based on vision systems. The article presents a method of determining the position of pick holders relative to the side surface of the cutting head body of a roadheader, during their positioning, using a 3D vision system. Data processing was carried out in the Matlab software using the libraries of the Computer Vision Toolbox. A mathematical model describing the transformation of images recorded by cameras has been presented. On the basis of this model, the distribution of distances between the pick holder base points and the side surface of the cutting head was determined for a given pick holder setting. The developed measurement method was tested on an experimental stand built in the Laboratory of robotics of the Department of Mining Mechanization and Robotisation at the Silesian University of Technology.

Słowa kluczowe: głowica urabiająca, uchwyty nożowe, widzenie stereoskopowe, pomiary stereometrii

Keywords: cutter head, pick holders, stereoscopic vision, stereometry measurements

1. Wprowadzenie

Dla zapewnienia wysokiej dokładności i powtarzalności produkcji głowic/organów urabiających kombajnów górniczych dąży się do robotyzacji tego procesu [1, 2].

Głowice/organy urabiające składają się z korpusu i uchwytów nożowych przyspawanych do pobocznicy głowicy, w których umieszczone są noże. Pozycję przestrzenną układu nóż–uchwyt nożowy determinują wartości sześciu parametrów, ustalone na etapie projektowania. Korpusy głowic urabiających kombajnów chodnikowych i organów urabiających kombajnów ścianowych, powszechnie są odzyskiwane w procesie remontowym i ich wymiary często nie są zgodne z wymiarami nominalnymi. Kontrola procesu pozycjonowania uchwytów nożowych w technologii zrobotyzowanej determinuje potrzebę opracowania metody pozwalającej na monitorowanie on–line i pomiar odległości pomiędzy podstawą uchwytu nożowego i pobocznica głowicy urabiającej w miejscu jego montażu, w trakcie dojazdu ramienia robota do pozycji docelowej wynikającej z zadanego ustawienia danego uchwytu nożowego.

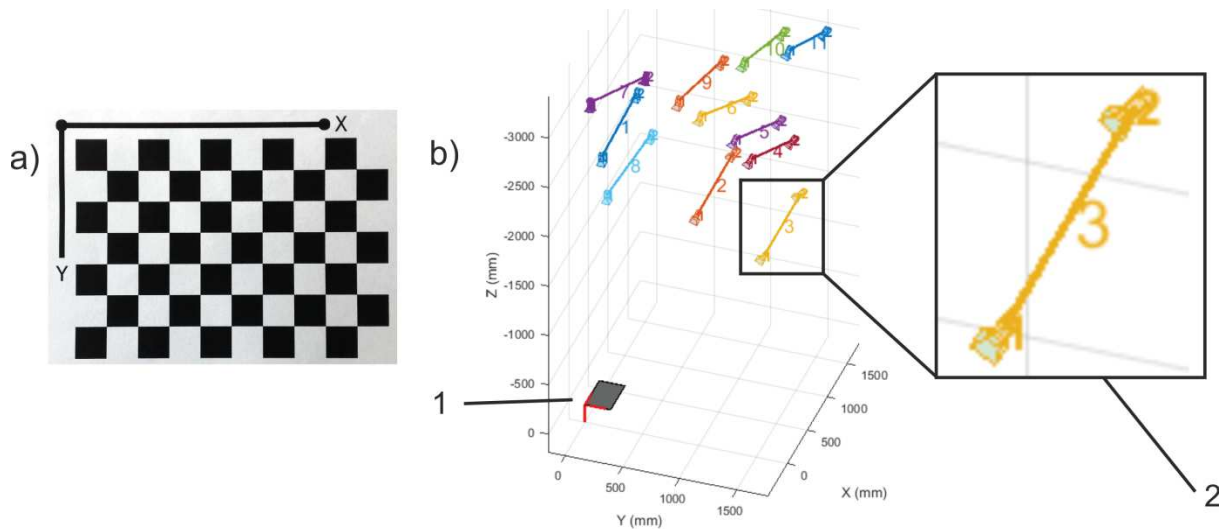
Posiadając informacje o przestrzennym położeniu punktów pobocznicy głowicy urabiającej i punktów podstawy uchwytu nożowego, możliwe jest wyznaczenie pozycji uchwytu nożowego względem korpusu głowicy urabiającej (organu urabiającego). Gdy rzeczywisty kształt tego korpusu odbiega od nominalnego możliwe będzie w ten sposób skorygowanie pozycji uchwytu nożowego, aby wyeliminować ryzyko kolizji uchwytu nożowego z kadłubem głowicy urabiającej oraz zapewnić możliwość jego przyspawania.

Prezentowana w niniejszym artykule metoda umożliwia pomiar odległości pomiędzy podstawą uchwytu nożowego i pobocznica głowicy urabiającej w dowolnym punkcie podstawy uchwytu nożowego. Oparta jest ona na analizie zdjęć pomiarowych uzyskanych z kamer systemu wizyjnego KUKA VisionTech. Zdjęcia te przetwarzane są przez pakiet Computer Vision Toolbox w programie MatLab. Możliwe jest przy tym również wykorzystanie innych narzędzi, takich jak biblioteka OpenCV [3] czy środowisko LabView.

2. Metoda wyznaczania odległości pomiędzy podstawą uchwytu nożowego i pobocznica głowicy urabiającej z wykorzystaniem widzenia stereoskopowego

Istnieje wiele możliwości uzyskania efektu stereoskopowego [4]. To na nim opiera się widzenie przestrzenne. Jeżeli jakiś punkt jest bowiem zarejestrowany na przynajmniej dwóch zdjęciach wykonanych z różnych stanowisk to możliwe jest jednoznaczne określenie jego współrzędnych w przestrzeni [5]. W zależności od posiadanych danych wejściowych istnieją różne możliwości określenia tych współrzędnych [6].

Punktem wyjścia procesu pomiarowego jest kalibracja kamery lub kamer. Dokonuje się jej po to, aby uzyskać macierz wartości parametrów wewnętrznych kamery [7]. Parametry wewnętrzne kamery określają właściwości optyczne obiektywu, jego zniekształcenia radialne i styczne. Wyznacza się również współrzędne środka obrazu (środku rzutu). Istnieje kilka sposobów kalibracji kamer, np. przy użyciu wzorca kalibracyjnego. Stosuje się takie metody, jak: Direct Linear Transform, Tsai, Zhang, Heikkila, Bougueta oraz wiele innych [8]. Kalibracji kamer można dokonać na podstawie jednego zdjęcia lub wielu zdjęć. Niektóre metody uwzględniają radialne i styczne dystorsje, a niektóre nie. Niezależnie od użytej metody wyniki są dość podobne. W opracowanej metodzie pomiarowej użyto metody Zhenga. Jest to domyślna metoda zaimplementowana w środowisku MatLab, w której użyto domyślnej tablicy kalibracyjnej (rys. 1a). W celu kalibracji kamer wykonano jedenaście zdjęć przy różnym ich ustawieniu względem tablicy kalibracyjnej (rys. 1b).



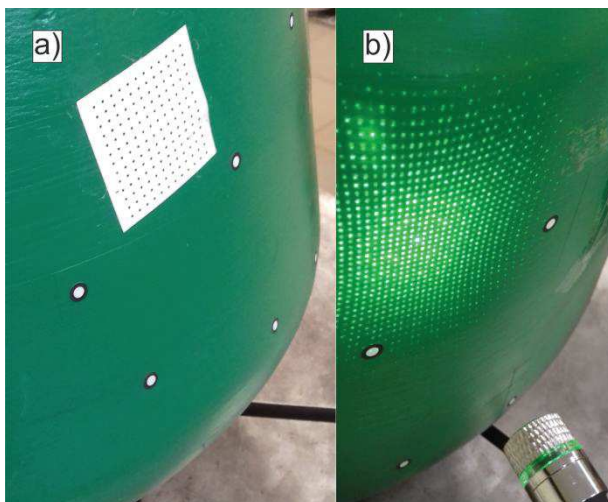
Rys. 1. Tablica kalibracyjna (a) i położenie kamer względem tablicy kalibracyjnej w trakcie kalibracji (b): 1 – płyta kalibracyjna, 2 – zespół kamer (kolorowe odcinki oznaczone numerami od 1 do 11 odwzorowują ustawienie bazy zespołu kamer względem tablicy kalibracyjnej)

Aby uzyskać efekt stereoskopowy nie jest konieczne wykorzystanie dwóch kamer [9]. Algorytmy zaimplementowane w narzędziach komputerowych umożliwiają przestrzenną wizualizację punktów widocznych na pobranych obrazach bez wiedzy na temat parametrów zewnętrznych układu kamer [10]. Parametry zewnętrzne układu kamer określają przesunięcie i obrót kamer względem układu współrzędnych związanego z obserwowaną sceną. Przy użyciu odpowiednich funkcji i na podstawie pewnych odpowiadających sobie punktów na obu obrazach możliwe jest zbudowanie modelu przestrzennego fotografowanej sceny. Nie mniej jednak, posiadając wiedzę na temat parametrów zewnętrznych kamer, rekonstrukcja ta jest łatwiejsza i dokładniejsza [11, 12]. Różne metody kalibracji wymagają różnej liczby punktów pomiarowych potrzebnych do obliczeń. Stosowane są między innymi algorytmy: siedmiopunktowy, ośmiopunktowy, Ransac, czy LMedS [13]. W wyniku ich działania otrzymujemy wartości elementów macierzy, które określają związki pomiędzy punktami zarejestrowanymi na zdjęciach. Kalibrację kamer umożliwiają narzędzia komputerowe. W środowisku MatLab podstawową metodą jest algorytm ośmiopunktowy.

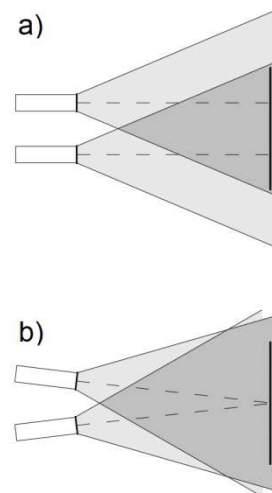
Mając do dyspozycji robota przemysłowego, możliwa jest akwizycja kolejnych zdjęć pomiarowych jedną kamerą, przy zmianie jej pozycji w przestrzeni za pomocą robota [14]. Wówczas można przy użyciu jednej kamery uzyskać taki sam efekt, jak przy użyciu dwóch kamer.

W przypadku użycia dwóch kamer, znając ich parametry zewnętrzne i wewnętrzne, korzystając z triangulacji można wyznaczyć współrzędne przestrzenne odpowiadających sobie punktów znajdujących się na parze analizowanych zdjęć [15]. Jeżeli układ kamer jest kanoniczny, to na podstawie wewnętrznych i zewnętrznych parametrów kamery można stworzyć mapę dysparycji [16, 17]. Obrazuje ona różnicę położenia pikseli pomiędzy parą obrazów stereo [18]. Model przestrzenny zbudowany na podstawie mapy dysparycji obejmuje scenę zarejestrowaną na zdjęciach.

W celu określenia odległości pomiędzy pobocznicą kadłuba głowicy urabiającej i powierzchnią podstawy danego uchwytu nożowego niezbędne jest określenie kształtu pobocznicy głowicy w bezpośrednim otoczeniu rozpatrywanego uchwytu nożowego. Dokonuje się tego na podstawie położenia markerów (znaczników) naniesionych na pobocznicę kadłuba głowicy urabiającej [19]. W trakcie realizacji badań stanowiskowych znaczniki te miały postać siatek punktów wydrukowanych na kartce papieru (rys. 2a). Kartka ta naklejona została na korpus głowicy urabiającej w miejscu, w którym znajdować się będzie podstawa uchwytu nożowego po jego ustawieniu za pomocą ramienia robota. Alternatywnym i bardziej praktycznym rozwiązaniem jest projekcja siatki punktów za pomocą projektora lub lasera [20] (rys. 2b). Ze względu na to, że podstawa uchwytu nożowego jest płaska, w celu określenia jej położenia w przestrzeni wystarczające jest wyznaczenie współrzędnych trzech, spośród czterech, jej narożników.



Rys. 2. Znaczniki naniesione na korpus głowicy urabiającej: a) w formie siatki wydrukowanej na kartce papieru, b) wyświetlone za pomocą lasera



Rys. 3. Kanoniczne ustawienie kamer (a) oraz zbieżne ustawienie kamer (b)

W badaniach stanowiskowych użyto dwóch kamer cyfrowych, będących częścią systemu wizyjnego. Użycie dwóch kamer przyspiesza akwizycję danych pomiarowych. Pomimo tego, iż są to takie same kamery, tego samego producenta, to zdjęcia zarejestrowane przez te kamery cechować się mogą różną jakością. Utrudnia to realizację procesu odnajdywania przez oprogramowanie na obrazach odpowiadających sobie punktów. Z pomocą przychodzą rozmaite techniki poprawy jakości zdjęć, takie jak: segmentacja, metody wyrównywania kontrastu, filtry liniowe, operacje morfologiczne, czy metody wyrównywania histogramu [21].

Ze względu na wzajemne ustawienie kamer mogą one pracować w układzie kanonicznym (równoległym) lub zbieżnym [22]. Ponieważ w badaniach wykorzystano dwie kamery wąskokątne a obszary, które fotografowano są niewielkie, użyto zbieżnego układu kamer (rys. 3b). W przypadku kanonicznego układu (rys. 3a), kamery te w trakcie akwizycji obrazów musiałyby się bowiem znajdować daleko od fotografowanych obiektów, aby zapewniony był odpowiedni stosunek długości bazy (odległości między kamerami) do odległości od fotografowanych obiektów [23]. W przypadku, gdy kamery znajdują się blisko fotografowanego obiektu jest on odwzorowany z większą rozdzielczością. Z tego powodu znaczniki naniesione na pobocznicę głowicy urabiającej powinny być możliwie małe i gęsto rozmieszczone, co zwiększa dokładność pomiaru. W wyniku zastosowania zbieżnego układu

kamer otrzymujemy dwa obrócone względem siebie zdjęcia interesujących nas obiektów. Podobnie, jak w metodzie opisanej w pracy [24] kamery powinny być umieszczone w odpowiedni sposób względem podstawy uchwytu nożowego i poboczniczy głowicy urabiającej w trakcie akwizycji zdjęć pomiarowych.

Pomiar z użyciem systemu stereowizyjnego realizowany jest podczas pozycjonowania uchwytu nożowego względem poboczniczy głowicy urabiającej. W trakcie dojeżdżania uchwytem nożowym do poboczniczy dokonywana jest akwizycja zdjęć pomiarowych. Kierunek natarcia chwytaka zabudowanego na ramieniu robota, trzymającego pozycjonowany uchwyt nożowy, jest prostopadły do podstawy uchwytu nożowego. Ponieważ układ sterowania robota w trakcie pozycjonowania uchwytów nożowych korzysta z informacji o położeniu i orientacji układu współrzędnego narzędzia ($X_T Y_T Z_T$) należy dokonać jego transformacji na układ współrzędnych związany z podstawą uchwytu nożowego ($X_P Y_P Z_P$).

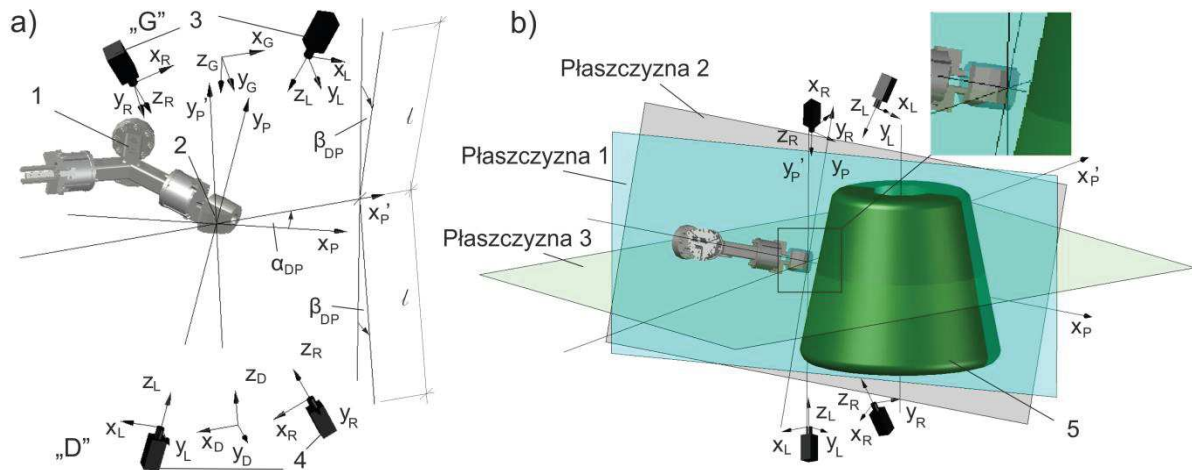
Rozpatrzono dwa ustawienia kamer względem fotografowanych obiektów – górne (oznaczone jako “G”) oraz dolne (oznaczone jako “D”) (rys. 4). Stanowiska fotograficzne położone są z dwóch przeciwnych stron danego uchwytu nożowego w taki sposób, aby zapewnić kamerom możliwość zarejestrowania wszystkich interesujących punktów. Oś: X_G i X_D układu współrzędnych związanego z systemem wizyjnym dla poszczególnych jego ustawień pokrywają się z płaszczyzną rozciągającą się pomiędzy osią obrotu głowicy urabiającej i środkiem podstawy uchwytu nożowego (płaszczyzna 1). Jeżeli na zarejestrowanych zdjęciach z pozycji górnej nie można odnaleźć wszystkich punktów, układ sterowania robotem pozycjonujący system wizyjny może ustawić kamery w pozycji dolnej. Wyznaczenie położenia i orientacji system wizyjnego w przestrzeni dla poszczególnych stanowisk fotogrametrycznych jest możliwe w oparciu o złożone jednorodne macierze transformacji:

$$- \text{ustawienie górne: } \mathbf{B}_G = \mathbf{Rot}(Z, \alpha_{DP}) \cdot \mathbf{Rot}\left(X, -\frac{\pi}{2}\right) \cdot \mathbf{Rot}(Y, \beta_{DP}) \cdot \mathbf{Trans}(\mathbf{0}, \mathbf{0}, -l) \quad (1)$$

$$- \text{ustawienie dolne: } \mathbf{B}_D = \mathbf{Rot}(Z, \alpha_{DP}) \cdot \mathbf{Rot}\left(X, \frac{\pi}{2}\right) \cdot \mathbf{Rot}(Y, \beta_{DP}) \cdot \mathbf{Trans}(\mathbf{0}, \mathbf{0}, -l) \quad (2)$$

gdzie:

- α_{DP} – kąt zawarty pomiędzy osią X_P układu współrzędnych związanego z podstawą danego uchwytu nożowego i osią X_P' układu współrzędnych $X_P' Y_P' Z_P'$, będącą częścią wspólną płaszczyzny podstawy uchwytu nożowego (płaszczyzna 2 na rys. 4b) oraz płaszczyzny prostopadłej do osi obrotu poboczniczy głowicy urabiającej (płaszczyzna 3 na rys. 4b),
- β_{DP} – kąt pomiędzy podstawą uchwytu nożowego i osią optyczną kamery,
- l – odległość początku układów współrzędnych systemu wizyjnego od początku układu współrzędnych podstawy uchwytu nożowego ($X_P Y_P Z_P$).



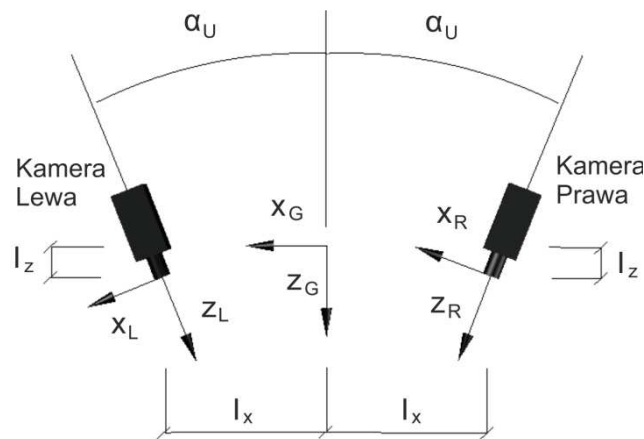
Rys. 4. Ustawienie kamer w czasie akwizycji zdjęć pomiarowych: a) względem podstawy uchwytu nożowego, b) względem pobocznic kadłuba głowy urabiającej: 1 – chwytak, 2 – uchwyt nożowy, 3 – kamery w górnym położeniu (umieszczone od strony czołowej głowy urabiającej), 4 – kamery w dolnym położeniu (umieszczone od strony podstawy głowy urabiającej), 5 – pobocznica głowy urabiającej

Ponieważ współrzędne przestrzenne znaczników otrzymane w wyniku przetwarzania zdjęć pomiarowych w środowisku Matlab określone są w układzie współrzędnych związanym z kamerą lewą ($X_L Y_L Z_L$), aby otrzymać wartości współrzędne tych punktów w układzie współrzędnych względem podstawy uchwytu nożowego, należy w pierwszej kolejności dokonać transformacji układu współrzędnych do układu współrzędnych związanego z systemem wizyjnym ($X_G Y_G Z_G$ lub $X_D Y_D Z_D$) (rys. 5). Układ współrzędnych kamery jest tak zorientowany, że oś Z pokrywa się z osią optyczną kamery, a osie X i Y tworzą płaszczyznę równoległą do płaszczyzny tłowej (matrycy światłoczułej kamery). Aby dokonać takiej transformacji należy wektor wodzący każdego punktu pomiarowego pomnożyć przez jednorodną złożoną macierz transformacji C :

$$C = \text{Rot}(Y, \alpha_U) \cdot \text{Trans}(-l_X, 0, -l_Z) \quad (3)$$

gdzie:

- α_U – kąt zawarty pomiędzy osiami optycznymi kamer i osią Z_G (lub Z_D) układu współrzędnego związanego z systemem wizyjnym,
- l_X – odległość początku układu współrzędnych związanego z układem optycznym kamery lewej od początku układu współrzędnych $X_G Y_G Z_G$ (lub $X_D Y_D Z_D$) kamer wzdłuż osi X_G (X_D),
- l_Y – odległość początku układu współrzędnych $X_G Y_G Z_G$ (lub $X_D Y_D Z_D$) od początku układu współrzędnych kamery lewej mierzona wzdłuż osi Z_G (Z_D).



Rys. 5. Relacje pomiędzy układami współrzędnych związanymi z kamerami ($X_L Y_L Z_L$ i $X_R Y_R Z_R$) i układem współrzędnych systemu wizyjnego w położeniu górnym ($X_G Y_G Z_G$)

W drugim etapie dokonuje się przekształcenia układu współrzędnych systemu wizyjnego ($X_G Y_G Z_G$ lub $X_D Y_D Z_D$) na układ współrzędnych podstawy uchwytu nożowego ($X_P Y_P Z_P$). Opisane jest ono następującymi złożonymi jednorodnymi macierzami transformacji:

– dla ustawienia górnego systemu wizyjnego:

$$\mathbf{D}_G = \mathbf{Trans}_1(\mathbf{0}, \mathbf{0}, l) \cdot \mathbf{Rot}_1(Y, -\beta_{DP}) \cdot \mathbf{Rot}_1\left(X, \frac{\pi}{2}\right) \cdot \mathbf{Rot}_1(Z, -\alpha_{DP}) \quad (4)$$

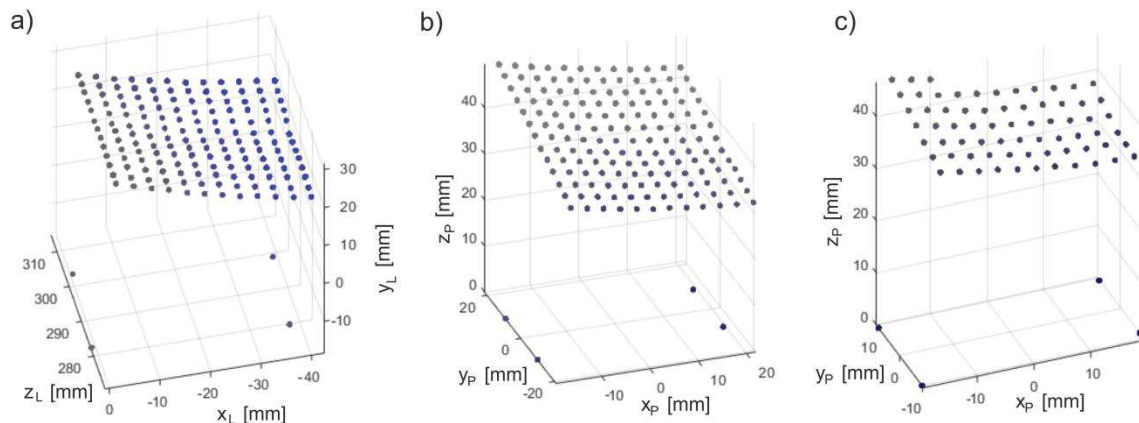
– dla ustawienia dolnego systemu wizyjnego:

$$\mathbf{D}_D = \mathbf{Trans}_2(\mathbf{0}, \mathbf{0}, l) \cdot \mathbf{Rot}_2(Y, -\beta_{DP}) \cdot \mathbf{Rot}_2\left(X, -\frac{\pi}{2}\right) \cdot \mathbf{Rot}_2(Z, -\alpha_{DP}) \quad (5)$$

W rezultacie wyznacza się składowe wektorów wodzących każdego punktu pomiarowego w układzie współrzędnych związanym z podstawą uchwytu nożowego ($X_P Y_P Z_P$):

$$[x_{Pi}, y_{Pi}, z_{Pi}, \mathbf{1}]^T = \begin{cases} \mathbf{C} \cdot \mathbf{D}_G \cdot [x_{Li}, y_{Li}, z_{Li}, \mathbf{1}]^T \\ \mathbf{C} \cdot \mathbf{D}_D \cdot [x_{Li}, y_{Li}, z_{Li}, \mathbf{1}]^T \end{cases} \quad \text{dla } i = 1, \dots, N, \quad (6)$$

gdzie współrzędna z_P jest odległością mierzoną w kierunku natarcia chwytaka w trakcie pozycjonowania uchwytu nożowego (rys. 6). Rozpatruje się wszystkie punkty, które znajdują w obrębie podstawy uchwytu nożowego, to jest te których wartości współrzędnych x_P i y_P znajdują się w granicach prostokąta reprezentującego podstawę uchwytu nożowego.

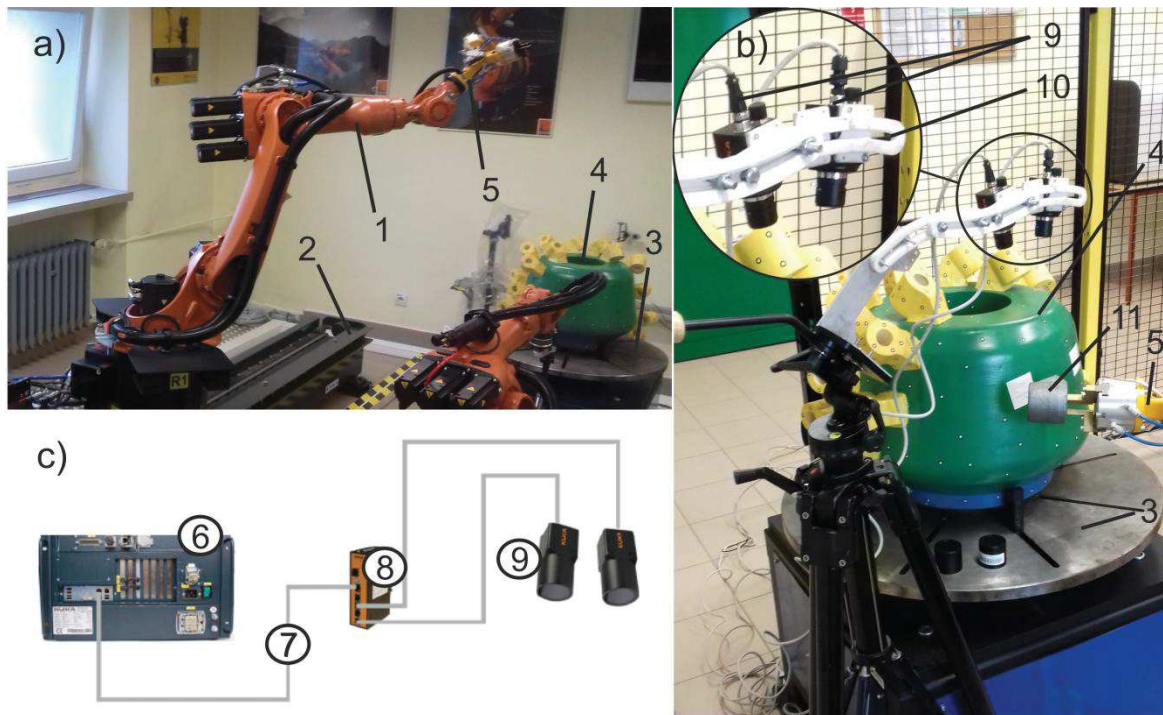


Rys. 6. Położenie markerów: a) w układzie współrzędnych związanym z lewą kamerą $X_L Y_L Z_L$, b) w układzie współrzędnych związanym z podstawą uchwytu nożowego $X_P Y_P Z_P$, c) znajdujących się w obrębie podstawy uchwytu nożowego w układzie współrzędnych związanym z podstawą uchwytu nożowego

W przypadku braku danych o ustawieniu systemu wizyjnego w trakcie akwizycji zdjęć pomiarowych, można określić wartości współrzędnych znaczników w układzie współrzędnych związanym z podstawą uchwytu nożowego na podstawie informacji o położeniu charakterystycznych punktów podstawy. W tym celu należy przekształcić układ współrzędnych związany z lewą kamerą ($X_L Y_L Z_L$), w którym określone są wartości współrzędnych punktów pomiarowych, na układ współrzędnych związany z podstawą uchwytu nożowego ($X_P Y_P Z_P$). Sprowadza się to do translacji układu współrzędnych kamery do punktu podstawy uchwytu nożowego o znanych współrzędnych (np. jednego z narożników). Składowe wektora translacji są przy tym równe wartościom współrzędnych tego punktu. Następnie wykonujemy rotacje tego układu współrzędnych tak, aby osie układu X i Y były równoległe do krawędzi podstawy uchwytu nożowego.

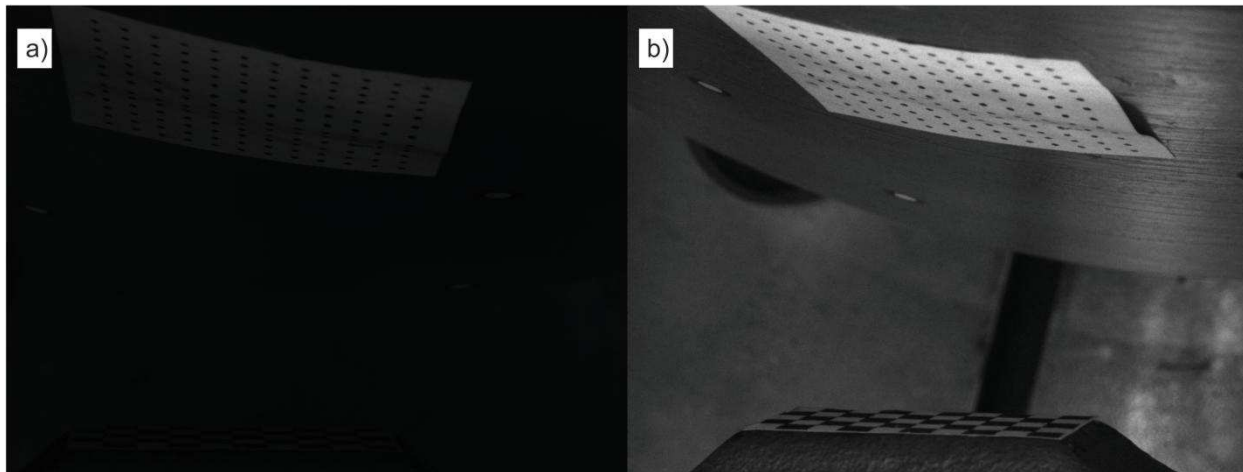
3. Stanowisko pomiarowe

Opracowaną metodę pomiaru testowano w Laboratorium robotyki Katedry Mechanizacji i Robotyzacji Górnictwa Wydziału Górnictwa, Inżynierii Bezpieczeństwa i Automatyki Przemysłowej Politechniki Śląskiej (rys. 7). Uchwyty nożowe pobierane z zasobnika są pozycjonowane za pomocą robota KUKA KR 16–2 (1) umieszczonego na jednostce liniowej KL 250–3 (2), względem pobocznicy głowicy urabiającej (4) posadowionej na stole pozycjonera PEV–1–2500 (3). Na potrzeby badań kamery (9) umieszczone były na statywie z zamocowanym wspornikiem specjalnej konstrukcji (10) – rys. 7b. Kamery KUKA MXG20 (9) za pomocą switcha (8) połączone są z szafą sterowniczą robota (6). Zdjęcia pomiarowe pobierane są z pamięci robota i przetwarzane na komputerze z zainstalowanym oprogramowaniem MatLab wraz z odpowiednimi toolboxami. W opracowanym programie pomiarowym przetwarzane są pary zdjęć w wyniku czego otrzymuje się współrzędne przestrzenne punktów reprezentujących podstawę uchwytu nożowego i pobocznicę korpusu głowicy urabiającej w obrębie miejsca jego montażu.

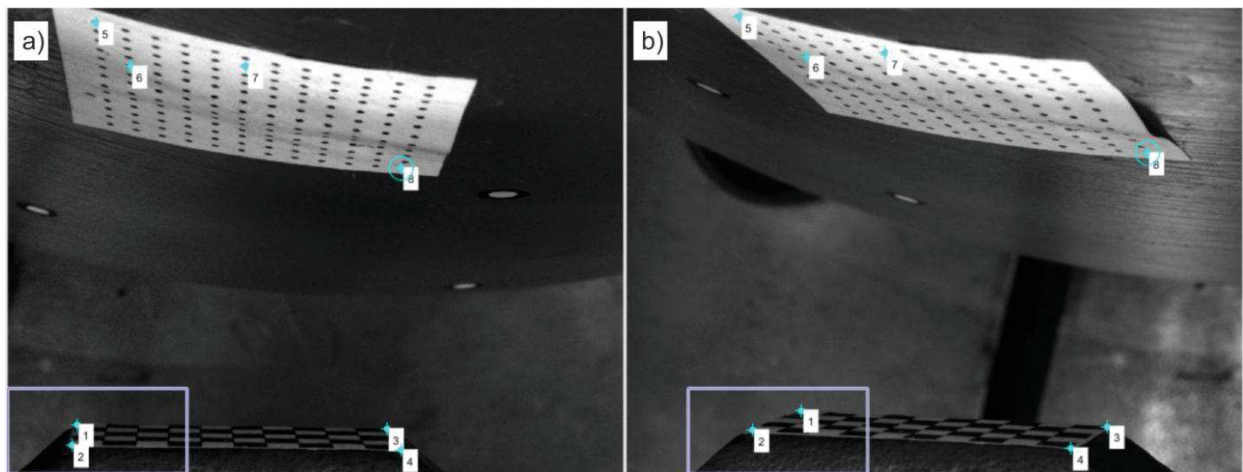


Rys. 7. Stanowisko doświadczalne w Laboratorium robotyki Katedry Mechanizacji i Robotyzacji Górnictwa (a i b) oraz schemat ideowy podłączenia kamery do układu sterowania robota (c):
 1 – robot KUKA KR 16–2, 2 – jednostka liniowa KL 250–3, 3 – pozycjoner PEV–1–2500,
 4 – korpus głowicy urabiającej, 5 – chwytak, 6 – kontroler robota, 7 – kabel, 8 – switch,
 9 – dwie kamery, 10 – uchwyt specjalny, 11 – pozycjonowany uchwyt nożowy

Zbiór współrzędnych przestrzennych znaczników rozmieszczonych na poboczniczy korpusu głowicy urabiającej uzyskuje się w wyniku przetwarzania i analizy zdjęć pomiarowych. Wykorzystuje się w tym celu funkcje i procedury zaimplementowane w programie pomiarowym z biblioteki Computer Vision Toolbox. Każda z tych funkcji jest odpowiedzialna za pewien proces. Funkcja *imadjust* dostosowuje intensywność obrazu surowego (rys. 8), co zmienia kontrast tak aby piksele wyraźnie wyróżniały się na obrazie (rys. 9). Na podstawie danych pochodzących z kalibracji kamer, funkcja *undistortimage* usuwa z pobranych zdjęć zniekształcenia wynikające dystorsji układu optycznego. Odpowiadające sobie punkty pomiarowe na zdjęciach dopasowywane są za pomocą funkcji *cpsselect*. Na podstawie pozycji punktów pomiarowych na zdjęciach i wartości parametrów zewnętrznych kamer funkcja *triangulate* wyznacza wartości przestrzennych współrzędnych punktów pomiarowych w układzie współrzędnych związanym z kamerą lewą ($X_L Y_L Z_L$). Korzystając ze wzorów (3) – (6) wyznacza się następnie wartości współrzędnych tych punktów w układzie współrzędnych $X_P Y_P Z_P$.



Rys. 8. Zdjęcia surowe zarejestrowane w czasie pomiarów: a) obraz z kamery lewej, b) obraz z kamery prawej



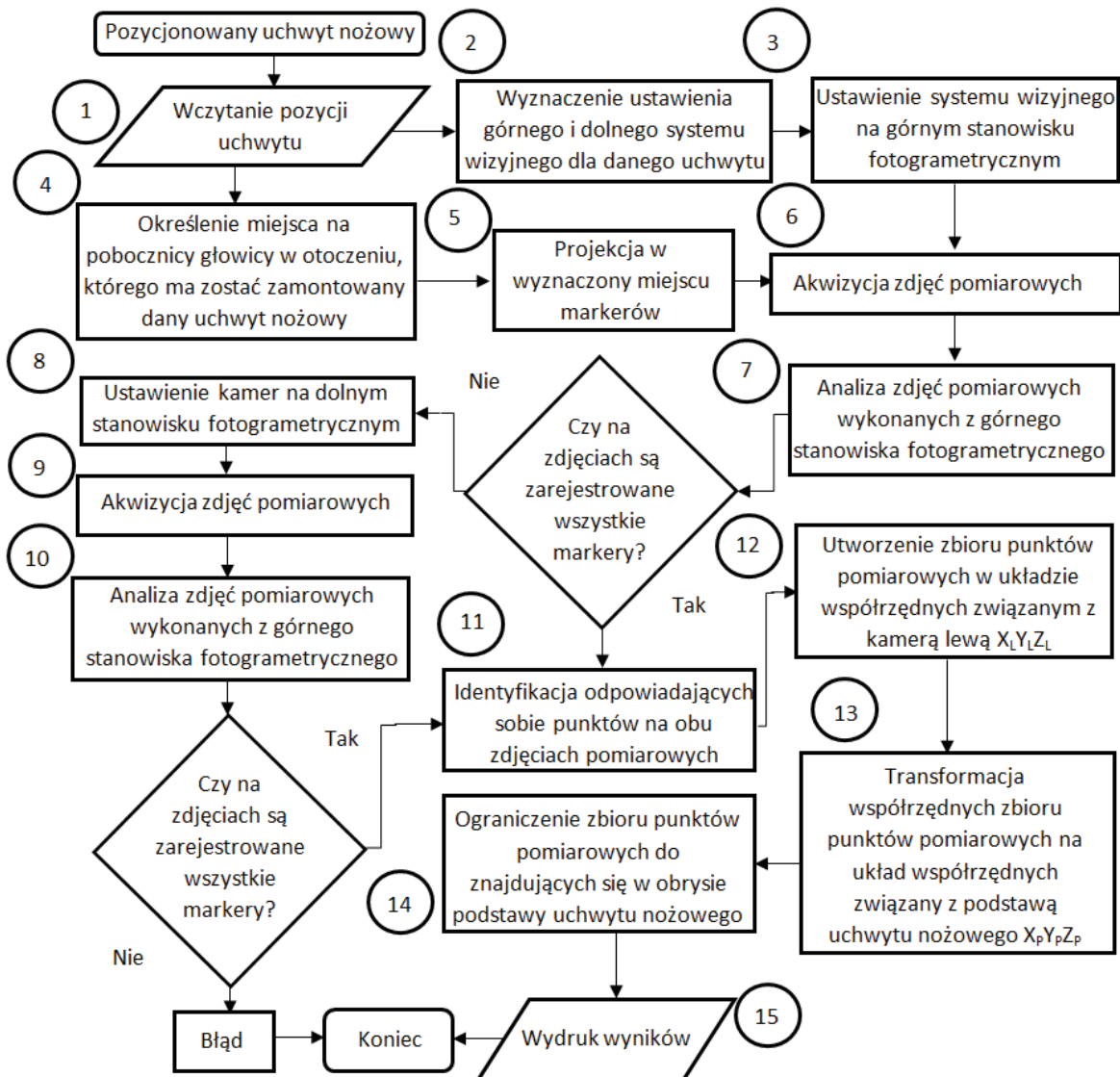
Rys. 9. Zastosowanie funkcji *imadjust* – na zdjęciach widoczne są odpowiadające sobie punkty na zdjęciach: a) z kamery lewej, b) z kamery prawej

Opracowana metoda pomiaru ustawienia uchwytów nożowych na pobocznicę głowicy urabiającej opiera się na identyfikacji punktów pomiarowych (markerów). Im większa będzie gęstość punktów naniesionych na dany obszar pobocznicę korpusu głowicy w trakcie akwizycji zdjęć pomiarowych tym dokładniejszy będzie jego przestrzenny model. Dysponując współrzędnymi punktów pobocznicę w układzie współrzędnych związanym z podstawą uchwytu nożowego, możemy wyznaczyć rozkład odległości pomiędzy tą podstawą i pobocznicą głowicy urabiającej w miejscu, gdzie uchwyt nożowy ma zostać zamocowany. Odległość podstawy uchwytu nożowego od pobocznicę pomiędzy punktami pomiarowymi wyznaczyć można wykorzystując interpolację liniową. Algorytm procedury pomiarowej przedstawiono na rysunku 10.

4. Wyniki testów stanowiskowych

Wykorzystując zaproponowaną metodę dokonano pomiaru odległości podstawy uchwytów nożowych od pobocznicę korpusu głowicy urabiającej. Na rysunku 11 pokazano przykładowe wyniki pomiaru. Pozycję i orientację układu współrzędnego związanego z narzędziem robota pozycjonującego rozpatrywany uchwyt nożowy w trakcie pomiaru, opisują wartości punktu

TCP chwytaka: $x_T = 1088$ mm, $y_T = 1437$ mm, $z_T = 951$ mm oraz kątów definiujących orientację układu współrzędnych narzędzia robota w układzie podstawowym: $A = 47^\circ$, $B = 10^\circ$, $C = 159^\circ$. Postępując zgodnie z algorytmem procedury pomiarowej (rys. 10) wyznaczono rozkład odległości powierzchni podstawy uchwytu nożowego od pobocznicy korpusu głowicy urabiającej (rys. 11). Odległości te odpowiadają wartościom współrzędnej z_p .

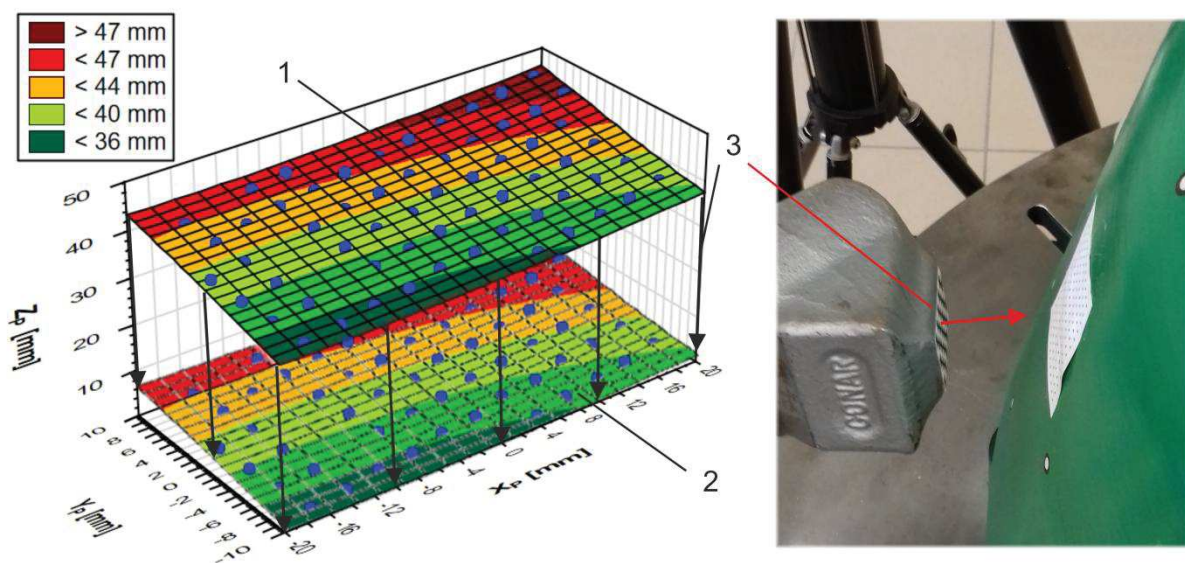


Rys. 10. Algorytm procedury pomiarowej

Poszukiwana jest najmniejsza odległość pomiędzy rozpatrywanymi powierzchniami. Determinuje ona maksymalne dosunięcie uchwytu nożowego do pobocznicy korpusu głowicy. Odległość ta powinna odpowiadać dystansowi, jaki pozostał do pokonania przez narzędzie robota, aby ustawić uchwyt nożowy zgodnie z projektem. W rozpatrywanym przypadku najmniejsza odległość wynosi 35.1 mm. Ze względu na kształt pobocznicy korpusu głowicy urabiającej oraz sposób ustawienia uchwytu nożowego najbliżej położone są tu punkty zlokalizowane w obrębie jednego z narożników.

5. Podsumowanie

Opracowana metoda pomiarowa umożliwia określenie w czasie rzeczywistym rozkładu odległości pomiędzy podstawą uchwytów nożowych i pobocznica kadłuba głowicy/organu urabiającego. Ma to szczególnie istotne znaczenie w przypadku ponownego wykorzystania w procesie produkcji korpusów głowic/organów urabiających, z których usunięto stare uchwyty nożowe. W takim przypadku bowiem powierzchnia pobocznic tego korpusu, jeżeli nie będzie poddawana regeneracji mającej na celu przywrócenie jej kształtu nominalnego, jest nierówna. Wynika to z pozostałości resztek spoin łączących usunięte uchwyty nożowe oraz ubytków powstałych podczas ich usuwania. W zrobotyzowanej technologii wytwarzania głowic/organów urabiających kombajnów górniczych taka sytuacja prowadzić może do kolizji uchwytów nożowych z pobocznica ich kadłuba lub uniemożliwić proces ich montażu (spawania).



Rys. 11. Rozkład odległości podstawy uchwytu nożowego od pobocznic korpusu głowicy urabiającej:
 1 – wartości zmierzone, 2 – wartości po dosunięciu uchwytu nożowego do pobocznic głowicy urabiającej,
 3 – kierunek, w którym dosuwany jest uchwyt nożowy do pobocznic głowicy urabiającej (kierunek natarcia narzędzia robota)

Pomiar on-line odległości podstawy poszczególnych uchwytów nożowych od pobocznic korpusu głowicy/organu urabiającego w trakcie zrobotyzowanego ich ustawiania leży u podstaw sterowania adaptacyjnego robotem pozycjonującym uchwyty nożowe. Możliwa jest bowiem na tej podstawie korekta ustawienia uchwytu nożowego, tak aby nie dopuścić do wyżej wymienionych sytuacji w trakcie wytwarzania tych ważnych, z punktu widzenia efektywności procesu urabiania skał, elementów kombajnów górniczych.

Literatura

- [1] Cheluszka P. 2010 Zrobotyzowana technologia montażu uchwytów nożowych na organach roboczych górniczych maszyn urabiających *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa* 11(477) strony 11–17.
- [2] Dolipski M., Cheluszka P., Sobota P. 2008 Zrobotyzowane stanowisko do ustawiania uchwytów nożowych na pobocznicę zwłaszcza głowic i organów urabiających

- kombajnów górniczych oraz sposób ustawiania uchwytów nożowych opis patentowy 216341 [2010, 07, 386580].
- [3] Omosekiesi G. 2018 Industrial vision robot with Raspberry Pi using PIXY camera Information Technology Embedded System Engineering.
- [4] Schreer O., Brandenburg N., Kauff P. 2000 A Comparative Study on Disparity Analysis Based on Convergent and Rectified Views BMVC2000.
- [5] Graefe V., Wershofen K. P., Huber J, 1993 Dynamic Vision for Precise Depth Measurement and Robot Control Computer Vision for Industry München.
- [6] Peyman A. 2015 Object Distance Measurement Using a Single Camera for Robotic Applications.
- [7] Nedeveschi S., Marita T., Vaida M., Danescu R., Frentiu D., Oniga F., Pocol C., Moga D. Camera calibration method for stereo measurement.
- [8] Szeliski R. 2010 Computer Vision: Algorithms and Applications Springer.
- [9] Wubbena H., Nieves E., Nawab A., Garmann G. 2011 Welcome to Accurate Robotic 3D Vision An educational webinar sponsored by Universal Robotics and Yaskawa Motoman Robotics.
- [10] Fusiello A., Irsara L. 2011 Quasi-Euclidean Epipolar Rectification of Uncalibrated Images Machine Vision and Applications 22 Issue 4 pp 663–670.
- [11] Kyto M., Nuutinen M., Oittinen P. 2011 Method for measuring stereo camera depth accuracy based on stereoscopic vision The International Society for Optical Engineering.
- [12] Takahachi G., Matsuoka R. 2010 Accuracy of measurement using a pair of stereo images acquired by finepix real 3D w1 without controls, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (Newcastle upon Tyne UK) Vol XXXVIII Part 5.
- [13] Hartley R., Zissermann A. 2003 Multiple View Geometry in Computer Vision Cambridge University Press.
- [14] Ersu E., Wienand S. 1995 Verfahren zum Bestimmen der Lage eines Körpers im Raum, patent europejski EP 0 763 406 A1 [C.A., 1997, 19, 95114588.7].
- [15] Rzeszotarski D., Strumiło P., Pełczynski P., Wiecek B., Lorenc A. 2005 System obrazowania stereoskopowego sekwencji scen trójwymiarowych Elektronika: prace naukowe 10 strony 165–184.
- [16] Cutolo P., Ferrari V. 2018 The Role of Camera Convergence in Stereoscopic Video See-through Augmented Reality Displays International Journal of Advanced Computer Science and Applications 9 No 8.
- [17] Wright S. 2011 Parallel vs Converged the dabate over stereo camera.
- [18] Fusiello A, Trucco E and Verri A 2000 A compact algorithm for rectification of stereo pairs Machine Vision and Applications 12 Issue 1 pp 16–22.
- [19] Jeżewski S., Jaros M. 2008 Skanowanie trójwymiarowej przestrzeni pomieszczeń Automatyka 12 Zeszyt 3 strony 669–673.
- [20] Makoto Iwamoto 2018 Active pattern projection improves AOI 3D measurement accuracy Vision Systems Design, vision and automation solution for engineers and

integrators worldwide 23 no 2 pp 7–10.

- [21] Keselman Y., Dickinson S. 2001 Bridging the Representation Gap Between Models and Exemplars In IEEE Conf. on Comp. Soc. Work. on Models versus Exemplars in Comp. Vis.
- [22] Bernasik J., Mikrut S. 2007 Fotogrametria inżynieryjna (Kraków).
- [23] Gallup M., Frahm J. M., Mordohai P., Pollefeys M. 2008 Variable Baseline/Resolution Stereo CVPR08.
- [24] Cheluszka P., Jagieła–Zajac A. 2019 Determining the position of pick holders on the side surface of the working unit of the cutting machine in the robotic technology of their assembly IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Volume 261 Number 1.

Podziękowania

Publikacja wspierana w ramach własnego funduszu stypendialnego Politechniki Śląskiej, w roku 2018 – 2019.

*Niniejsza praca jest przedrukiem artykułu, który ukaże się w języku angielskim, w **Materialach konferencyjnych IMTech – Innovative Mining Technologies.***

*mgr inż. Amadeus Jagieła-Zajac
Amadeus.Jagiela-Zajac@polsl.pl,*

*dr hab. inż. Piotr Cheluszka prof. PŚ
Piotr.Cheluszka@polsl.pl*

*Politechnika Śląska,
Wydział Górnictwa, Inżynierii Bezpieczeństwa
i Automatyki Przemysłowej,
Katedra Mechanizacji i Robotyzacji Górnictwa
ul. Akademicka 2, 44–100 Gliwice*