

**Stefan DOMEK¹, Paweł DWORAK¹, Marek GRUDZIŃSKI²
Krzysztof OKARMA³, Mateusz TECŁAW³**

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Wydział Elektryczny, Katedra Automatyki Przemysłowej i Robotyki (1)
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, Instytut Technologii Mechanicznej (2)
Wydział Elektryczny, Katedra Przetwarzania Sygnałów i Inżynierii Multimedialnej (3)

Wpływ oświetlenia i czasu ekspozycji na dokładność kalibracji kamer w wizyjnym systemie pozycjonowania detali na obrabiarkach CNC

Abstract. *The article presents the results of experimental studies on the impact of lighting on the accuracy of the camera calibration process in the system of the vision based positioning of workpieces on numerically controlled machine tools. The influence of exposure time on the accuracy of the obtained camera parameters necessary for its calibration has been also analysed, allowing to develop a method of automatic adjustment of exposure time useful for more accurate calibration results.*

Słowa kluczowe: kalibracja kamery, obrabiarki CNC, pozycjonowanie detali, systemy wizyjne

Wprowadzenie

Dokładność kalibracji kamery, jak również projektorów światła strukturalnego stanowi kluczowy element każdego systemu skanowania trójwymiarowego, mający istotny wpływ na dokładność odzworowania skanowanego obiektu. Wizyjny system pozycjonowania przedmiotów obrabianych na obrabiarkach CNC wykorzystywany w niniejszej pracy, stanowi zasadniczy element projektu badawczego realizowanego aktualnie w Centrum Mechatroniki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Składa się on z trzech zestawów kamera-projektor zamontowanych na stelażu umożliwiającym niezależną regulację ich położenia oraz stolika obrotowego, jak również systemu komputerowego zapewniającego poprawną współpracę urządzeń, a także akwizycję i analizę obrazów.

W celu stworzenia trójwymiarowego modelu skanowanego detalu, poza akwizycją obrazu z kamery, niezbędne jest pozyskanie informacji o „głębokości” poszczególnych punktów reprezentujących obiekt na obrazie. Dane te uzyskiwane są za pomocą procedur fotogrametrycznych wykorzystujących technikę oświetlenia strukturalnego. W wyniku analizy prążków oświetlających skanowany obiekt, tworzona jest mapa fazowa odzwierciedlająca zmianę głębokości poszczególnych punktów, co pozwala następnie na uzyskanie chmury punktów reprezentujących fragment detalu widoczny z jednej kamery. Końcowy model tworzony jest w wyniku fuzji danych pozyskanych z trzech kamer.

Wymagania dotyczące precyzji modelu, jak również konieczność dopasowania punktów uzyskanych z trzech zestawów kamera-projektor, stanowią o potrzebie wykonania kalibracji kamer (oraz projektorów), dzięki której możliwe jest precyzyjne określenie ich wzajemnej lokalizacji oraz skompensowanie błędów wynikających z niedoskonałości ich optyki.

Kalibracja kamer w systemach wizyjnych

Algorytmy kalibracji kamer w systemach wizyjnych mogą być podzielone na dwie zasadnicze grupy tj. kalibrację fotogrametryczną oraz techniki autokalibracji (ang. *self-calibration*). Fotogrametryczna kalibracja kamer wykonywana jest zwykle na podstawie analizy zarejestrowanych przez nie obrazów przedstawiających trójwymiarowy wzorzec testowy. Wymagana jest w takim wypadku bardzo dokładna znajomość trójwymiarowej geometrii wzorca kalibracyjnego warunkująca efektywną kalibrację.

Druga grupa metod nie wykorzystuje żadnych obiektów kalibracyjnych bazując na informacjach wynikających z ruchu kamery przy założeniu braku zmian jej parametrów podczas pozyskiwania co najmniej trzech obrazów. Możliwe jest w takim wypadku pozyskanie zarówno parametrów wewnętrznych, jak również zewnętrznych kamery pozwalających na rekonstrukcję struktury obiektu w przestrzeni 3D. Osobną grupę metod stanowią techniki wykorzystujące obrót kamery.

Zamiast używania nieruchomego trójwymiarowego obiektu wymagającego zaawansowanych procedur kalibracji, najczęściej wykorzystuje się szachownicę, znajdującą się w różnych położeniach względem kamery oraz nachyloną pod różnymi kątami. Jako typowe, stanowiące swego rodzaju połączenie obu przedstawionych podejść, zostało ono wykorzystane również w niniejszej pracy.

Do parametrów wewnętrznych kamery zalicza się długość ogniskowej f_c (ang. *focal length*), położenie środka obrazu c_c (ang. *principal point*), współczynnik pochylenia α_c (ang. *skew*) oraz wektor zniekształceń k_c (ang. *vector of distortion coefficients*).

Najbardziej typowym rodzajem zniekształceń układu optycznego kamery są zniekształcenia radialne, które są zwykle modelowane za pomocą wielomianów 4. lub 6. stopnia. Zniekształcenia takie mają charakter dominujący w obrazach pozyskiwanych z typowych kamer powodując przesunięcia współrzędnych w obrazie w sposób promienisty. Poza tego rodzaju zniekształceniami wyróżnić można także zniekształcenia styczne (ang. *tangential*) prostopadłe do radialnych, wynikające z niewspółliniowości środków krzywizny soczewek obiektywu, a także błędy położenia środka obrazu.

Zakładając brak jakichkolwiek zniekształceń dla typowego modelu kamery bazującego na ostrosłupie (ang. *pinhole camera*), rzut obrazu wyznaczyć można z równań rzutowania perspektywicznego dla każdego punktu:

$$(1) \quad \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_c/Z_c \\ Y_c/Z_c \end{bmatrix}$$

Zakładając $r^2 = x^2 + y^2$ po uwzględnieniu zniekształceń soczewki współrzędne tego samego punktu można wyznaczyć jako:

$$(2) \quad \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix} = \left(1 + k_c(1) \cdot r^2 + k_c(3) \cdot r^4 + k_c(5) \cdot r^6\right) \cdot \begin{bmatrix} X_c/Z_c \\ Y_c/Z_c \end{bmatrix} + dx$$

gdzie zniekształcenia styczne oblicza się jako:

$$(3) \quad dx = \begin{bmatrix} 2 \cdot k_c(3) \cdot x \cdot y + k_c(4) \cdot (r^2 + 2x^2) \\ k_c(3) \cdot (r^2 + 2y^2) + 2 \cdot k_c(4) \cdot x \cdot y \end{bmatrix}$$

Wektor k_c zawiera współczynniki opisujące oba rodzaje zniekształceń, które po uwzględnieniu pozostałych parametrów wewnętrznych kamery pozwalają na uzyskanie skorygowanych współrzędnych rzutowanych punktów jako:

VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

$$(4) \quad \begin{cases} x_p = f_c(1) \cdot (x_d + \alpha_c \cdot y_d) + c_c(1) \\ y_p = f_c(2) \cdot y_d + c_c(2) \end{cases}$$

W efekcie zależności pomiędzy wyznaczonymi współrzędnymi piksela a jego położeniem wynikającym z rzutowania perspektywicznego z uwzględnieniem korekcji zniekształceń można zapisać w układzie jednorodnym z zastosowaniem macierzy kamery (ang. *camera matrix*):

$$(5) \quad \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_c(1) & \alpha_c \cdot f_c(1) & c_c(1) \\ 0 & f_c(2) & c_c(2) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ 1 \end{bmatrix}$$

gdzie stosunek $f_c(2)/f_c(1)$ stanowi współczynnik kształtu piksela (ang. *aspect ratio*).

Osobną grupę stanowią parametry zewnętrzne kamery związane z jej położeniem oraz kątami obrotu (współczynniki translacji oraz rotacji). W systemach kalibracji kamer zakłada się, iż jeden z narożników wzorca kalibracyjnego (szachownicy) stanowi środek układu współrzędnych, względem którego wyznaczane jest położenie kamery, natomiast szachownica zlokalizowana jest na płaszczyźnie XY.

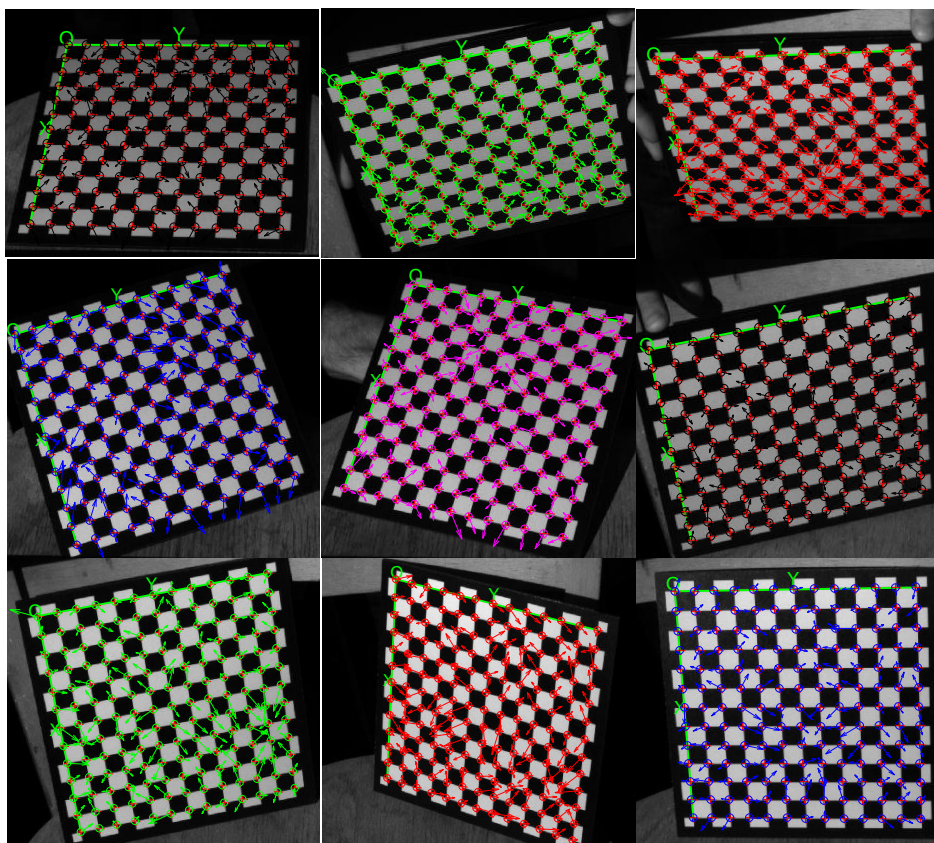
Poprawne wyznaczenie parametrów zewnętrznych kamery ma kluczowe znaczenie dla kalibracji całego systemu wizyjnego ze względu na fakt, iż umożliwia ono poprawne wyznaczenie wzajemnych pozycji kamer, jak też położenia skanowanego przedmiotu w przestrzeni obróbkowej. Warunkiem ich prawidłowego wyznaczenia jest jednak uwzględnienie parametrów wewnętrznych kamer, których dokładność wyznaczenia jest z kolei silnie uzależniona od efektów działania algorytmu detekcji narożników w obrazie kalibracyjnym. Ze względu na fakt, iż detekcja narożników powinna odbywać się z dokładnością subpikselową, najczęściej wykorzystywany jest detektor Harrisa [3] z dodatkowymi modyfikacjami w celu poprawienia dokładności wyznaczenia położenia narożników. Idea tego rodzaju detekcji narożników jest stosunkowo prosta, ponieważ opiera się na wyszukiwaniu punktów, dla których następuje znaczna zmiana lokalnej jasności obrazu przy przesunięciu okna w każdym kierunku. Zgodnie z tym założeniem gwałtowne zmiany jasności nie następują nigdy dla „płaskich” obszarów obrazu, natomiast w wypadku krawędzi nie występują przy przesuwaniu okna wzdłuż niej.

Biorąc pod uwagę fakt, iż detekcja narożników jest oparta na analizie gradientu jasności obrazu, istotny wpływ na uzyskiwane wyniki może mieć zarówno kontrast obrazu, jak również jego ostrość, a także kształt wykorzystywanego okna oraz wartość współczynnika progowego.

W systemie wizyjnym wykorzystywanym w niniejszej pracy wykorzystywane są projektory światła strukturalnego w postaci rzutników multimedialnych, które mogą również emitować jednolite światło o ustalonym kolorze, który może mieć wpływ na dokładność kalibracji kamer, w szczególności ze względu na fakt, iż stosowane są kamery monochromatyczne. W takim wypadku stosując światło białe należy oczywiście wybrać odpowiednio krótszy czas ekspozycji aniżeli dla kolorów podstawowych z palety RGB. Przeprowadzone na tym stanowisku badania eksperymentalne miały na celu określenie wpływu oświetlenia i czasu ekspozycji na dokładność kalibracji kamer, w szczególności wyznaczenia ich parametrów zewnętrznych. W celach testowych posłużono się przybornikiem *Camera Calibration Toolbox* [1] dla środowiska Matlab (możliwe jest także wykorzystanie jego odpowiednika z bibliotek OpenCV).

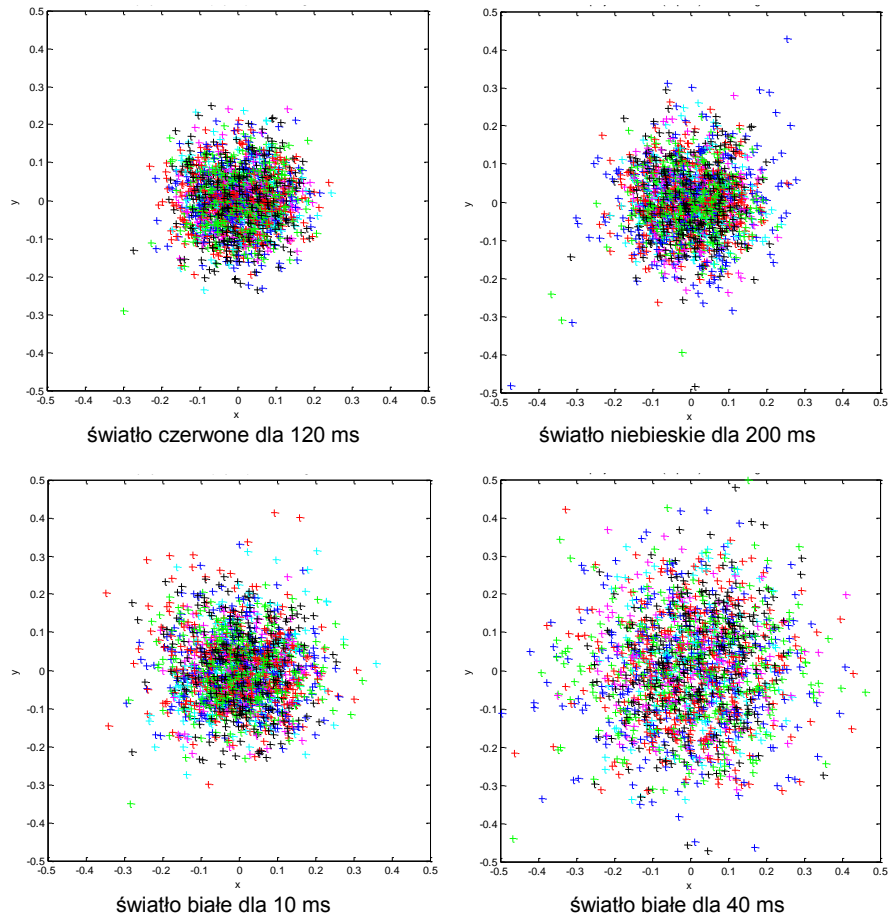
Badania eksperymentalne

W badaniach testowych dokonano akwizycji kilkudziesięciu zestawów obrazów przy oświetleniu światłem białym oraz kolorami podstawowymi RGB dla różnych czasów ekspozycji dobranych w taki sposób, aby nie uzyskać niedoświetlenia lub prześwietlenia obrazu utrudniającego poprawną detekcję narożników pól wzorca. Wykorzystano dwa rodzaje wzorców testowych w postaci szachownicy czarno-białej oraz czerwono-niebieskiej. Zestaw przykładowych 9 obrazów testowych wraz z wykrytymi narożnikami przedstawiono na rysunku 1. Długości strzałek są powiększone proporcjonalnie do błędów reprojekcji. Rozkłady błędów reprojekcji pikseli dla przykładowych zestawów obrazów zilustrowano na rysunku 2, natomiast rysunek 3 przedstawia lokalizację wzorca testowego względem kamery podczas akwizycji obrazów testowych. Procedura akwizycji obrazów testowych przeprowadzana była dla nieruchomych tablic kalibracyjnych oświetlanych kolejno światłem czerwonym, zielonym, niebieskim oraz białym przy programowej zmianie czasu akwizycji dla kamery, co zapewnia porównywalne dane wejściowe dla procedury kalibracji. Dzięki zastosowaniu takiego podejścia parametry wewnętrzne oraz zewnętrzne kamery powinny być identyczne dla każdego zestawu obrazów testowych.

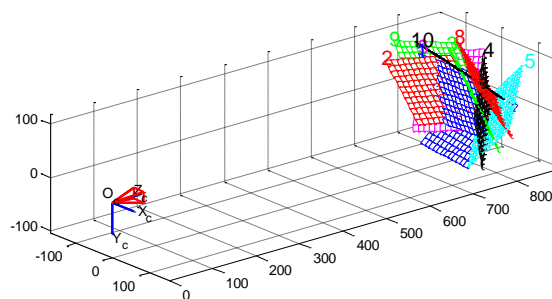


Rys. 1. Zestaw przyciętych 9 obrazów testowych uzyskanych dla światła czerwonego przy czasie ekspozycji 120 ms wraz z zaznaczonymi wykrytymi narożnikami oraz wynikami ich reprojekcji.

VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

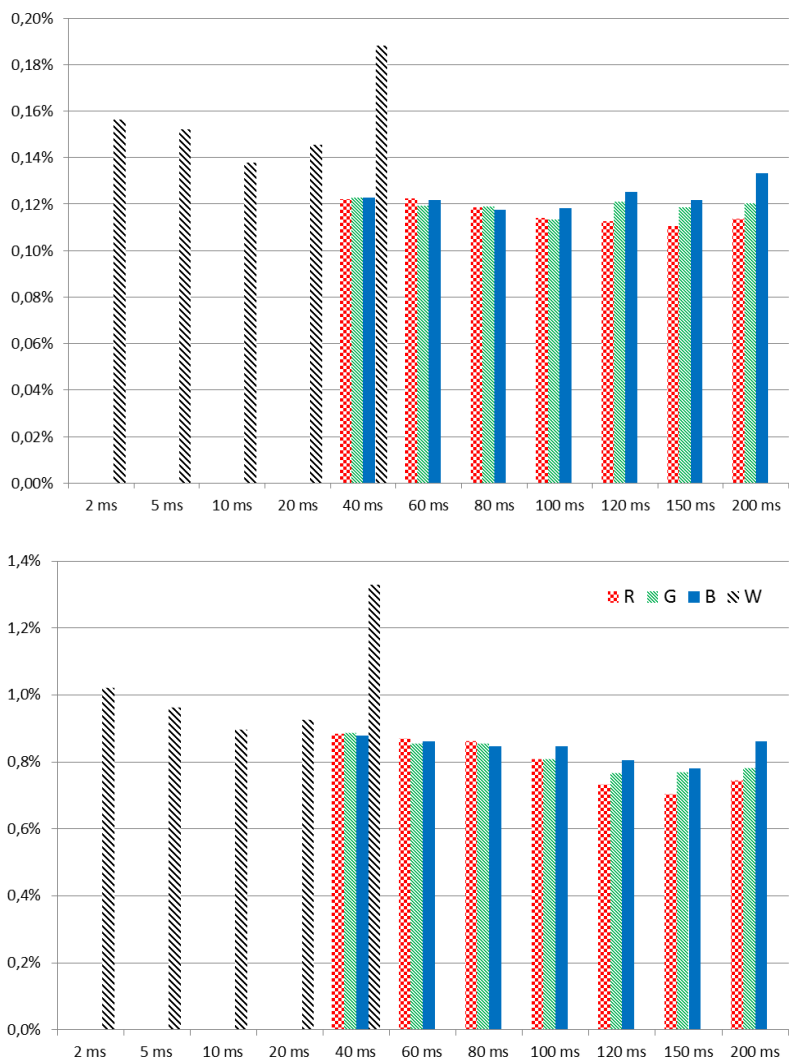


Rys. 2. Wykresy rozrzutu błędów reprojekcji pikseli (wartości wyrażone w pikselach) dla przykładowych zestawów obrazów testowych przy różnych czasach ekspozycji.



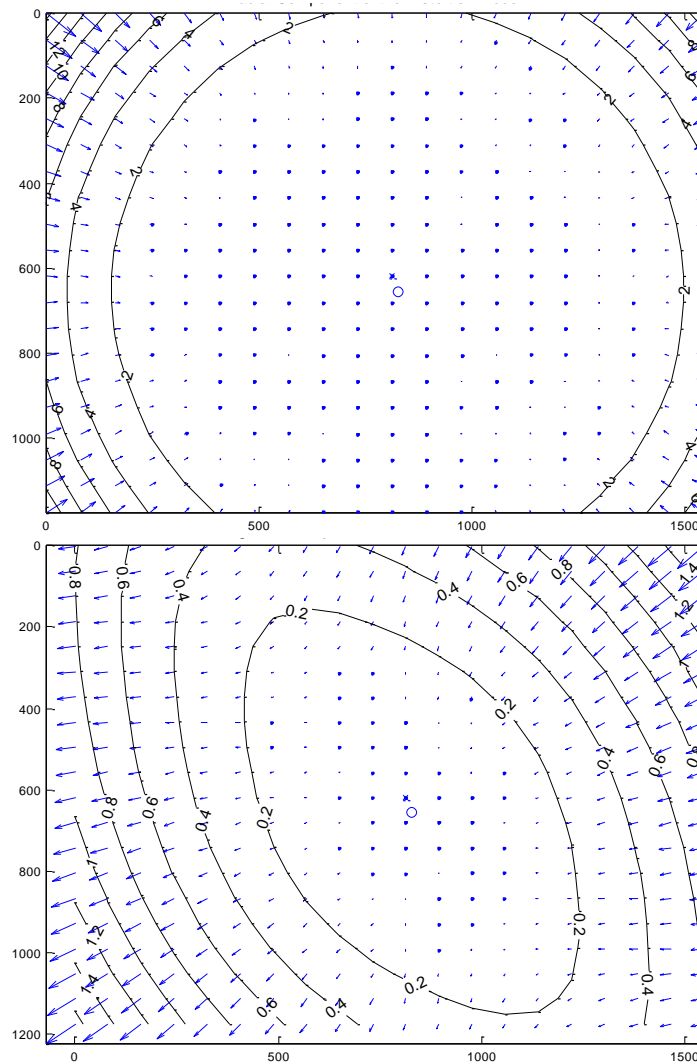
Rys. 3. Ilustracja graficzna parametrów zewnętrznych kamery podczas eksperymentów dla wzorca czarno-białego – położenie wzorca testowego względem kamery.

Ilustrację zmiany względnej dokładności wyznaczenia wewnętrznych parametrów kamery tj. długości ogniskowej kamery (wartość średnia z $f_c(1)$ oraz $f_c(2)$) oraz położenia środka obrazu (średnia z $c_c(1)$ oraz $c_c(2)$) dla wzorca czarno-białego przedstawiono na rysunku 4 (dla wzorca czerwono-niebieskiego uzyskano nieco niższą dokładność kalibracji). Wykresy uzyskanego modelu zniekształceń radialnych oraz stycznych dla składowej czerwonej przy czasie ekspozycji 150 ms przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 4. Względna dokładność wyznaczenia długości ogniskowej kamery (wykres górny) oraz położenia środka obrazu (wykres dolny) dla różnych czasów ekspozycji i różnych kolorów oświetlenia.

VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012



Rys. 5. Wykresy uzyskanego modelu zniekształceń radialnych (wykres górny) oraz stycznych (wykres dolny) dla światła czerwonego przy czasie ekspozycji 150 ms.

Dokładność wyników uzyskanych dla kolorów RGB jest zbliżona - najwyższą dokładność uzyskano dla światła czerwonego. Jak wspomniano wcześniej, dla światła białego (W) przy kamerze monochromatycznej należy odpowiednio skrócić czas ekspozycji, jednak uzyskana wówczas dokładność kalibracji jest znacząco niższa. Automatyczny dobór czasu ekspozycji jest również możliwy na podstawie analizy histogramów obrazów i detekcji wyraźnie separowalnych maksimów lokalnych histogramu reprezentujących odcienie szarości dla pól szachownicy.

Analizując wartości współczynników zniekształceń radialnych oraz stycznych (rysunek 5) można łatwo zauważyć dominujący charakter zniekształceń radialnych, w związku z czym uzyskany pełny model zniekształceń dla badanej kamery różni się od modelu zniekształceń radialnych w sposób niezauważalny (stąd zrezygnowano z jego zamieszczenia).

Podsumowanie

Kalibracja kamer w systemach wizyjnych jest szczególnie ważna w zastosowaniach przemysłowych związanych z estymacją wymiarów obiektów i odległości wykonywaną na podstawie analizy obrazu. W niektórych aplikacjach, w szczególności związanych z rozpoznawaniem wzorców, czy też klasyfikacją np. opartą na algorytmach wymagających redukcji liczby analizowanych cech, dokładność kalibracji kamer ma nieco mniejsze znaczenie. Biorąc jednakże pod uwagę możliwość stosunkowo łatwego doboru czasu ekspozycji oraz zastosowania światła o jednolitej barwie, możliwe jest uzyskanie zauważalnie większej dokładności kalibracji. Jest to szczególnie istotne w systemach wielokamerowych, jak również w wypadku, gdy dodatkowo zachodzi potrzeba kalibracji projektorów, jak ma to miejsce w zastosowaniach fotogrametrycznych opartych na projekcji światła strukturalnego.

Pomimo, iż algorytmy kalibracji kamer są coraz powszechniej stosowane, m.in. w systemach skanowania 3D, czy też zastosowaniach sterowizyjnych, ulegają one nadal modyfikacjom i ulepszeniom [2, 4-6] wynikającym zarówno ze wzrastającej mocy obliczeniowej powszechnie dostępnych urządzeń, jak również postępu technologicznego związanego z rozwojem szeroko pojętego sprzętu optycznego i fotograficznego.

Bibliografia

1. Bouguet Jean-Yves. Camera Calibration Toolbox for Matlab. http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc, 2005.
2. Funk Nathan, Yang Yee-Hong. Using a raster display for photometric stereo. Proceedings of the 4th Canadian Conference on Computer and Robot Vision - CRV'07, Montreal, Canada, 2007.
3. Harris Chris, Stephens Mike. A combined corner and edge detection. Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference – AVC, Manchester, UK, 1988.
4. Komagata Hideki, Ishii Ikuo, Takahashi Akira, Wakatsuki Daisuke, Imai Hiroei. A geometric method for calibration of internal camera parameters of fish-eye lenses. Systems and Computers in Japan, Vol. 38 № 12, 2007.
5. Mazurek Przemysław Mobile system for the estimation of internal parameters of distributed cameras. Pomiar Automatyka Kontrola 2010, Vol. 56 № 11, Warsaw, Poland.
6. Zhan Zongqian. Camera calibration based on Liquid Crystal Display (LCD). The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII, Part B3b, 2008.

Artykuł powstał częściowo dzięki wsparciu w ramach grantu MNiSW nr N502 147238 pt. „Wykorzystanie technik wizyjnych do pozycjonowania przedmiotów obrabianych na obrabiarkach CNC” – umowa nr 1472/B/T02/2010/38

Autorzy: dr hab. inż. Stefan Domek, prof. ZUT; dr inż. Paweł Dworak; dr inż. Krzysztof Okarma; mgr inż. Mateusz Teclaw; Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, e-mail: stefan.domek@zut.edu.pl; pawel.dworak@zut.edu.pl; krzysztof.okarma@zut.edu.pl; mateusz.teclaw@zut.edu.pl; mgr inż. Marek Grudziński, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, al. Piastów 19, 70-310 Szczecin, e-mail: marek.grudzinski@zut.edu.pl;