

Dariusz RZESZOTARSKI

POLITECHNIKA ŁÓDZKA, INSTYTUT ELEKTRONIKI,
ul. Wólczarska 211/215, 90-924 Łódź

Algorytmy kalibracji stereoskopowego układu kamer i rekonstrukcji sceny trójwymiarowej na podstawie obrazów termowizyjnych

Mgr inż. Dariusz RZESZOTARSKI

W roku 2002 ukończył studia magisterskie na Wydziale Elektroniki i Elektrotechniki, na kierunku Elektronika i Telekomunikacja. W roku 2004 podjął prace w Instytucie Elektroniki na stanowisku naukowo-technicznym. Jego obecne prace naukowe koncentrują się na opracowywaniu programów komputerowych do rekonstrukcji scen trójwymiarowych na podstawie obrazów stereowizyjnych.



e-mail: dariusz.rzeszotarski@p.lodz.pl

Streszczenie

W niniejszej pracy pojęcie trójwymiarowej rekonstrukcji sceny na podstawie obrazów termowizyjnych jest rozumiane, jako przypisanie każdemu punktowi obrazu termowizyjnego współrzędnych przestrzennych. Kalibracja układu kamery (lub kamer) jest ważnym elementem takiej rekonstrukcji. W artykule opisano algorytmy do kalibracji kamer pod kątem ich zastosowania do trójwymiarowej rekonstrukcji sceny termowizyjnej. Na tle istniejących rozwiązań w omawianej tematyce opisano podejście zaproponowane przez autora. Algorytmy napisano w języku C++ oraz poddano weryfikacji, której wyniki opisano w końcowej części pracy.

Słowa kluczowe: stereowizja, kalibracja kamer, trójwymiarowa rekonstrukcja, obrazy termowizyjne.

Calibration methods for stereoscopic cameras used in 3D scene reconstruction

Abstract

In this paper reconstruction of 3D scene refers to assigning 3D coordinates to each pixel of a thermal image. Calibration of cameras is a crucial element of such a system. There is presented classification and review of camera calibration techniques in the paper. The first perspective model of a single camera is given (Fig. 1) and the basics regarding 3D reconstruction by means of a stereoscopic set of cameras are provided (Fig. 2). Classification of 3D scene reconstruction techniques according to calibration algorithms is summed up in Tab. 1. The calibration algorithm of a single camera by means of a special board is described in Section 5. Next, the more detailed description of the algorithms providing extrinsic parameters i.e. the rotation matrix and translation vector between two cameras or two different positions of the same camera is given. Finally, a robust calibration technique proposed by the author is outlined. The stereovision set integrated with a thermal camera used as a test bed for the implemented calibration algorithms is shown in Fig. 4. The obtained results of calibration and reconstruction are presented in Tabs. 3 and 4. The reconstructed object is shown in Fig. 5. According to Tab. 4, the best reconstruction results are obtained by means of a stereovision set consisting of two visual cameras calibrated by means of a classical calibration board (Fig. 3). In the case of a single moving thermographic camera calibrated by means of the method proposed by the author, the obtained reconstruction results are worse; the reconstruction error is about 5 mm, while the distances between the reconstructed points are 300mm (Fig. 5).

Keywords: stereovision, camera calibration, 3D reconstruction, thermal images.

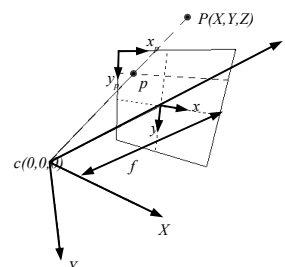
1. Wstęp

Systemy trójwymiarowej rekonstrukcji obrazów termowizyjnych są coraz szerzej stosowane. Dzięki nim można jeszcze dokładniej oszacować rozkład temperatury na badanym obiekcie uwzględniając emisyjność kierunkową materiału [7] lub dokładniej zlokalizować w przestrzeni źródło promieniowania podczerwonego [6, 7, 8, 9]. Istniejące rozwiązania składają się z stereowizyjnego układu kamer służącego do trójwymiarowej rekonstrukcji sceny oraz kamery termowizyjnej, której obraz jest nakładany na rekonstruowany obraz wizyjny [6, 7, 8, 9]. Innym podejściem opisanym w literaturze jest system składający się z układu stereowizyjnego kamer termowizyjnych [6]. W każdym przypadku istotnym elementem jest kalibracja układu kamer, tzn. określenie wartości parametrów geometrycznego modelu każdej z kamer oraz określenie wzajemnego położenia kamer. W pracy zawarto przegląd istniejących rozwiązań kalibracji kamer. Zaproponowano system rekonstrukcji sceny składający się z pojedynczej kamery termowizyjnej, której położenie względem rekonstruowanego obiektu jest zmieniane w czasie akwizycji obrazów.

zyjnego układu kamer służącego do trójwymiarowej rekonstrukcji sceny oraz kamery termowizyjnej, której obraz jest nakładany na rekonstruowany obraz wizyjny [6, 7, 8, 9]. Innym podejściem opisanym w literaturze jest system składający się z układu stereowizyjnego kamer termowizyjnych [6]. W każdym przypadku istotnym elementem jest kalibracja układu kamer, tzn. określenie wartości parametrów geometrycznego modelu każdej z kamer oraz określenie wzajemnego położenia kamer. W pracy zawarto przegląd istniejących rozwiązań kalibracji kamer. Zaproponowano system rekonstrukcji sceny składający się z pojedynczej kamery termowizyjnej, której położenie względem rekonstruowanego obiektu jest zmieniane w czasie akwizycji obrazów.

2. Model kamery perspektywicznej

Sposób powstawania obrazu w kamerze dobrze ilustruje prosty model kamery perspektywicznej pokazany na rysunku 1.



Rys. 1. Model kamery perspektywicznej
Fig. 1. Pin-hole model of a perspective camera

Na rysunku tym jest zaznaczony punkt P , który w układzie współrzędnych związanym z ogniskiem kamery c ma współrzędne X, Y, Z . Zgodnie z przyjętym modelem płaszczyzna detektora znajduje się w odległości f od środka optycznego kamery c ; f jest ogniskową układu optycznego kamery. Według modelu, obrazem punktu P jest punkt p , który powstaje przez przecięcie się z płaszczyzną detektora prostej łączącej punkt P z ogniskiem kamery c .

Osie x, y układu współrzędnych obrazowych metrycznych pokrywają się z osiami X, Y układu współrzędnych związanej z kamerą. Detektor kamery, można potraktować, jako dwuwymiarową tablicę, której elementami są pojedyncze czułe na światło lub promieniowanie podczerwone elementy detektora dalej nazywane pikselami. Zazwyczaj piksel modelowany jest, jako prostokątny obszar o określonych rozmiarach $h_x \times h_y$. Współrzędne obrazowe tzn. współrzędne obrazu na płaszczyźnie detektora definiowane są, jako współrzędne pikseli w dwuwymiarowej tablicy detektora. Układ współrzędnych związany z tablicą detektora ma początek w lewym górnym rogu tablicy. Zależność między obrazowymi współrzędnymi pikseli x_p, y_p a współrzędnymi przestrzennymi X, Y, Z związanymi z układem kamery można określić za pomocą wzoru:

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f/h_x & 0 & c_x \\ 0 & f/h_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

gdzie: $x_n = X/Z$, $y_n = Y/Z$; h_x, h_y są rozmiarami pojedynczego piksela odpowiednio w kierunku osi x i y dwuwymiarowego układu odniesienia związanego z płaszczyzną detektora. c_x, c_y są współrzędnymi przecięcia osi Z układu kamery z płaszczyzną detektora.

W układzie optycznym kamery mogą występować zniekształcenia geometryczne.

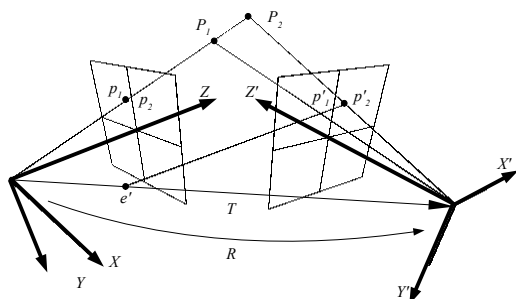
W przypadku, gdy punkt w przestrzeni jest dany w innym układzie współrzędnych niż układ kamery, zależność między współrzędnymi punktu $P = [X, Y, Z]^T$ w układzie kamery a współrzędnymi $P' = [X', Y', Z']^T$ pewnego innego układu współrzędnych można zapisać za pomocą wzoru:

$$P = RP' + T, \quad (5)$$

gdzie: R jest macierzą obrotu, a T wektorem przesunięcia między układami współrzędnych. Parametry z wzoru (1): f, h_x, h_y, c_x, c_y są wewnętrznymi parametrami kamery, parametry R i T są zewnętrznymi parametrami kamery [2, 3]. Pojęcie kalibracji kamery odnosi się do procedury umożliwiającej określenie parametrów wewnętrznych i zewnętrznych kamery.

3. Rekonstrukcja sceny trójwymiarowej na podstawie obrazów stereowizyjnych

Na rysunku 2 przedstawiony jest układ dwóch kamer i związane z nimi układy współrzędnych X, Y, Z oraz X', Y', Z' . Współrzędne obrazowe punktów P_1 i P_2 są w kamerze związanej z układem X, Y, Z nierozróżnialne ($p_1 = p_2$). W celu określenia współrzędnych przestrzennych punktów P_1 i P_2 konieczna jest znajomość ich współrzędnych obrazowych w kamerze w innym położeniu. Znając parametry wewnętrzne obydwu kamer oraz macierz obrotu i wektor przesunięcia między układami współrzędnych kamer można określić współrzędne przestrzenne danego punktu jedynie na podstawie znanych współrzędnych obrazowych. Układ dwóch kamer wykorzystywanych do trójwymiarowej rekonstrukcji nazywany jest układem stereowizyjnym [2, 3]. Stereowizyjny układ kamer może się składać z dwóch różnych kamer lub z jednej kamery znajdującej się kolejno w dwóch różnych położeniach.



Rys. 2. Trójwymiarowa rekonstrukcja dwóch punktów za pomocą stereowizyjnego układu kamer

Fig. 2. 3D reconstruction of two points by means of a set of stereoscopic cameras

4. Metody trójwymiarowej rekonstrukcji sceny termowizyjnej przy pomocy układu kamer

W przypadku trójwymiarowej rekonstrukcji sceny termowizyjnej stosuje się zwykle dwa podejścia. Rekonstrukcja obserwowanego obiektu dokonywana jest za pomocą tradycyjnego stereowizyjnego układu kamer [6, 7, 8]; zrekonstruowane współrzędne przestrzenne nakładane są wówczas na obraz termowizyjny, przy założeniu, że układ trzech kamer jest skalibrowany, tzn. znane są parametry wewnętrzne wszystkich trzech kamer oraz macierze obrotu i wektory przesunięcia określające względne położenie kamer. Innym rozwiązaniem może być zastosowanie skalibrowanego układu dwóch kamer termowizyjnych zamiast tradycyjnego układu stereowizyjnego [6]; w takim przypadku rekonstrukcja odbywa się bezpośrednio na podstawie pary obrazów termowizyjnych.

W artykule zaproponowano nieco inne podejście polegające na wykorzystaniu do rekonstrukcji dwóch obrazów termowizyjnych pochodzących z tej samej kamery, lecz znajdującej się dla każdego rejestrowanego obrazu w innym położeniu. W tabeli 1 zostały

zestawione cechy charakterystyczne wymienionych trzech podejść. W każdym przypadku zostało założone, że użyte kamery są skalibrowane [4], tzn. znane są ich parametry wewnętrzne. Natomiast użyte w tabeli pojęcie kalibracji układu kamer odnosi się do określenia macierzy obrotów i wektorów przesunięć określających związek między współrzędnymi przestrzennymi związanymi z układami użytymi w danym przypadku kamer.

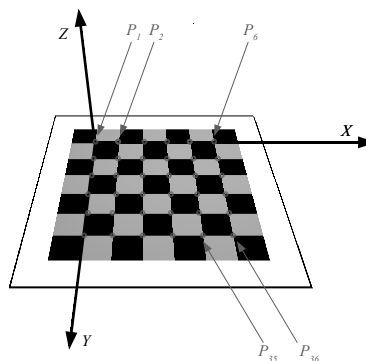
Zaletą zaproponowanej metody jest fakt, iż wykorzystana jest w niej tylko jedna kamera termowizyjna; wadą w porównaniu z innymi metodami jest konieczność określania przemieszczenia między dwoma położeniami kamery.

Tab. 1. Zestawienie trzech różnych układów kamer do rekonstrukcji trójwymiarowej
Tab. 1. Classification of sets of 3D reconstruction cameras

Cechy charakterystyczne	Układ stereowizyjny + kamera termowizyjna	Dwie kamery termowizyjne	Kamera termowizyjna w dwóch różnych położeniach
Konieczność mapowania współrzędnych 3D na obraz termowizyjny	Tak	Nie	Nie
Liczba potrzebnych kamer termowizyjnych	1	2	1
Rodzaj kalibracji układu kamer	Za pomocą tradycyjnego płaskiego obiektu kalibracyjnego	Za pomocą tradycyjnego płaskiego obiektu kalibracyjnego dostosowanego do kamery termowizyjnej	Za pomocą punktów kluczowych dostępnych w obrazach termowizyjnych
Konieczność dokonywania kalibracji za każdym razem przed trójwymiarową rekonstrukcją obrazów termowizyjnych	Nie	Nie	Tak
Rodzaj trójwymiarowej rekonstrukcji [3, 4]	Rekonstrukcja bezwzględna	Rekonstrukcja bezwzględna	Rekonstrukcja z dokładnością do współczynnika skalującego

5. Kalibracja pojedynczej kamery

Zadaniem kalibracji pojedynczej kamery jest wyznaczenie jej parametrów wewnętrznych. Istotnym elementem procedury kalibracji kamery jest obiekt kalibracyjny o znanym kształcie i wymiarach, posiadający zbiór punktów kluczowych o znanym położeniu [1, 2, 3]. Do kalibracji kamer wizyjnych wykorzystano tradycyjny obiekt kalibracyjny w postaci płaskiej tablicy z naniesionym wzorem szachownicy o liczbie kwadratowych pól 6×6 , o długości boku pojedynczego kwadratu wynoszącej 60 mm; punktami kluczowymi są wierzchołki kwadratowych pól (rys. 3).



Rys. 3. Tablica kalibracyjna w postaci szachownicy z zaznaczonym układem współrzędnych i punktami kluczowymi P1, P2...P6...P35, P36

Fig. 3. Calibration board with the associated reference frame and key points

W przypadku kamery termowizyjnej obiekt kalibracyjny był o identycznych wymiarach jak w przypadku obiektu kalibracyjnego

go dla kamer wizyjnych; jednak w celu zwiększenia różnicy emisyjności, pola białe zostały pokryte folią aluminiową; ponadto obiekt kalibracyjny był przed kalibracją podgrzewany, dzięki czemu uzyskano wyraźny obraz obiektu w kamerze termowizyjnej umożliwiający wykrycie punktów kluczowych. Obiekt kalibracyjny ustawiany był w różnych położeniach względem kalibrowanej kamery tak, aby przy każdej rejestracji obrazu w całości był on widoczny w obrazie kamery. Znaczącymi wymiary obiektu kalibracyjnego można określić współrzędne przestrzenne punktów kluczowych obiektu w układzie współrzędnych związanym z obiektem. W przypadku szachownicy układ współrzędnych związany jest z nią w ten sposób, że osie X , Y układu biegną wzdłuż krawędzi szachownicy, a oś Z jest prostopadła do powierzchni tablicy (rys. 3).

Procedura kalibracji składa się z następujących etapów. (1) Znalezienie współrzędnych obrazowych wszystkich wierzchołków kwadratów tablicy kalibracyjnej dla wszystkich jej położenia względem kalibrowanego układu kamer. (2) Znalezienie dla każdego położenia tablicy kalibracyjnej macierzy przekształcenia rzutowego między współrzędnymi punktów znajdujących się na płaszczyźnie tablicy a współrzędnymi odpowiadających im punktów na płaszczyźnie obrazu kamery. (3) Oszacowanie na podstawie znalezionych macierzy przekształceń rzutowych wartości parametrów wewnętrznych i zewnętrznych kalibrowanej kamery. (4) Optymalizacja wstępnie oszacowanych wartości parametrów.

6. Algorytmy określające wzajemne położenie kamer

W artykule zaproponowano podział algorytmów określających wzajemne położenie kamer w zależności od rodzaju punktów kluczowych zlokalizowanych w obserwowanej scenie: (1) Kalibracja za pomocą płaskiego obiektu kalibracyjnego [2, 7, 8, 9]. (2) Kalibracja za pomocą punktów kluczowych o znanym położeniu w przestrzeni [1, 6]. (3) Kalibracja za pomocą współrzędnych obrazowych punktów kluczowych o nieznanym położeniu w przestrzeni, należących do płaszczyzny [6]. (4) Kalibracja za pomocą współrzędnych obrazowych punktów kluczowych o nieznanym położeniu w przestrzeni, nienależących do płaszczyzny [6].

Kalibracja za pomocą płaskiego obiektu kalibracyjnego stosowana jest do kalibracji układu kamer, których względne położenie nie zmienia się podczas rekonstrukcji. Metoda ta została wykorzystana do kalibracji parametrów zewnętrznych układu trzech kamer (rys. 4): dwóch wizyjnych i jednej termowizyjnej umieszczonych na specjalnie do tego celu zaprojektowanym statywie. Trzy pozostałe metody zostały użyte do kalibracji poruszającego się układu kamer, dzięki czemu w ogólnym przypadku można było dokonać trójwymiarowej rekonstrukcji sceny na podstawie pary obrazów z dowolnej kamery z trzech dostępnych, znajdującej się w dwóch różnych położeniach.

Kalibracja za pomocą współrzędnych obrazowych punktów kluczowych o znanym położeniu w przestrzeni wykorzystuje do określenia ruchu całego układu kamer informacje dostarczone przez część stereowizyjną (rys. 4). Metoda ta składa się z następujących kroków: (1) znalezienie punktów kluczowych w obrazach z obydwu kamer dla dwóch położenia. (2) Dla każdego położenia punkty kluczowe są dopasowywane, tzn. dla każdego punktu kluczowego z obrazu kamery lewej znajduje się odpowiadający mu punkt kluczowy w obrazie kamery prawej. (3) Dopasowane punkty kluczowe są zrekonstruowane w przestrzeni trójwymiarowej. (4) Na podstawie współrzędnych trójwymiarowych zrekonstruowanych punktów oraz odpowiadających im współrzędnym obrazowym dla dwóch położenia układu kamer, określana jest macierz obrotu i wektor przesunięcia między dwoma położeniami.

W przypadku kalibracji za pomocą punktów kluczowych należących do płaszczyzny przyjmuje się, że znalezione punkty kluczowe dla dwóch różnych położenia kamery są obrazami punktów należącymi w przestrzeni trójwymiarowej do tej samej płaszczyzny [4]. Na podstawie zbioru par punktów dla dwóch różnych położenia kamery, znajduje się macierz przekształcenia rzutowego

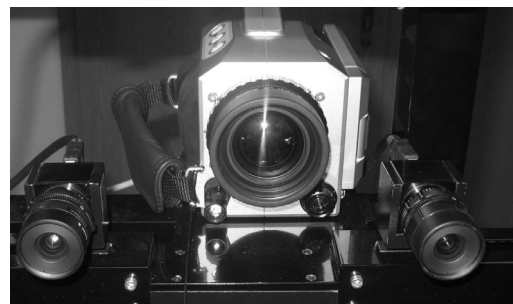
określająca zależność między współrzędnymi punktów będących obrazami punktów należących do tej samej płaszczyzny. Następnie z macierzy przekształcenia rzutowego wyodrębnione zostają macierz obrotu oraz wektor przesunięcia z dokładnością do pewnego współczynnika skalującego [4].

Kalibracja przy pomocy punktów kluczowych będących obrazami punktów w przestrzeni nienależących do płaszczyzny polega na znalezieniu par punktów dla dwóch różnych położenia kamery, będących obrazami punktów w przestrzeni trójwymiarowej, które nie są koplanarne [4]. Pary współrzędnych obrazowych są normalizowane na podstawie parametrów wewnętrznych kamery. Na podstawie znormalizowanych par współrzędnych obrazowych znajdowana jest macierz zasadnicza układu stereowizyjnego. Macierz zasadnicza jest to macierz o wymiarach 3×3 , na podstawie, której dla danego punktu o znanych współrzędnych w obrazie jednej kamery można określić równanie prostej, na której będzie leżał odpowiadający mu punkt w kamerze drugiej. Z macierzy zasadniczej wyodrębnione zostają macierz obrotu oraz wektor przesunięcia z dokładnością do pewnego współczynnika skalującego.

Dwie ostatnie metody wykorzystują do kalibracji obrazy pochodzące jedynie z jednej kamery znajdującej się w dwóch różnych położeniach. Zaprezentowane wyniki zostały uzyskane dla obrazów pochodzących z kamery termowizyjnej, choć w ogólnym przypadku dla określenia przemieszczenia się kamery termowizyjnej można wykorzystać również obraz z jednej z kamer wizyjnych, gdyż względne położenie wszystkich kamer jest znane. Wykorzystanie obrazu wizyjnego zamiast termowizyjnego do kalibracji jak i rekonstrukcji trójwymiarowej może okazać się korzystniejsze w przypadku, gdy scena wizyjna zawiera więcej punktów kluczowych niż obserwowana scena termowizyjna.

7. Wyniki

W celu weryfikacji opisanych powyżej metod zestawiono układ trzech kamer na specjalnie do tego celu zaprojektowanym statywie (rys. 4). Jako kamery wizyjne wykorzystano kamery firmy Point-Grey typu Flea o rozdzielczości 1024×768 ; jako kamerę termowizyjną zastosowano kamerę firmy InfraTec typu VarioCAM, z detektorem mikrobolometrycznym o rozdzielczości 640×480 . Algorytmy napisano w aplikacji opracowanej w środowisku Builder C++ z wykorzystaniem biblioteki OpenCV[1].



Rys. 4. Stereowizyjny układ kamer zintegrowany z kamerą termowizyjną na specjalnie do tego celu zaprojektowanym statywie

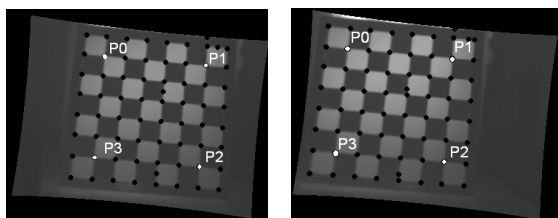
Fig. 4. Set of stereovision cameras integrated with a thermal camera

Każda z kamer została najpierw poddana kalibracji; do kalibracji kamer wizyjnych oraz termowizyjnej wykorzystano odpowiednie obiekty kalibracyjne opisane w części artykułu poświęconej kalibracji pojedynczej kamery. Dla każdej z kamer dokonano detekcji 36 punktów kluczowych szachownicy dla 20 różnych położenia tablicy kalibracyjnej.

Układ kamer wizyjnych został następnie skalibrowany przy pomocy tradycyjnej tablicy kalibracyjnej w celu określenia wzajemnego położenia kamer; w tym celu wykryto 36 punktów kluczowych szachownicy jednocześnie w obrazach z obydwu kamer dla 4 różnych położenia tablicy kalibracyjnej. W analogiczny sposób został skalibrowany układ kamery wizyjnej lewej i termowi-

zycznej, przy czym do kalibracji wykorzystano szachownicę wykonaną do kalibracji kamer termowizyjnych.

Układ kamer został również skalibrowany dla dwóch różnych położenia względem obserwowanego obiektu w postaci podgrzanej tablicy kalibracyjnej. Poruszający się układ kamer został skalibrowany za pomocą dwóch metod opisanych w punkcie 5: za pomocą punktów kluczowych o znanym położeniu w przestrzeni oraz za pomocą punktów kluczowych należących do płaszczyzny. Przykładowe dwa obrazy termowizyjne rekonstruowanego obiektu z zaznaczonymi punktami kluczowymi wykorzystanymi do kalibracji pokazano na rysunku 5.



Rys. 5. Obrazy termowizyjnej rekonstruowanego obiektu dla dwóch różnych położenia kamery

Fig. 5. Thermal images of the reconstructed object for two different viewpoints

W przypadku metody pierwszej do określenia ruchu został wykorzystany układ stereowizyjny kamer (rys. 4); wyniki kalibracji uzyskane za pomocą tej metody zamieszczone są w drugiej kolumnie tabeli 2; wyniki kalibracji dla metody drugiej wykorzystującej do określenia macierzy obrotu i wektora przesunięcia jedynie współrzędne obrazowe pochodzące z termogramów z kamery znajdującej się w dwóch różnych położeniach zamieszczone w trzeciej kolumnie tabeli 2;

Tab. 2. Parametry zewnętrzne określające wzajemne położenie kamery
Tab. 2. Extrinsic parameters identifying the mutual camera position

Parametry zewnętrzne.	Kalibracja za pomocą punktów kluczowych o znanym położeniu w przestrzeni	Kalibracja za pomocą punktów kluczowych o nieznanym położeniu w przestrzeni
Wektor obrotu	$[-0,8303; 0,5563; -0,03191]^T$	$[-0,2684; 0,96313; 0,0181]^T$
Kąt obrotu °	1,3095	2,2325
Wektor przesunięcia mm	$[107,3129; -15,0008; -7,4931]^T$	$[88,6576; -9,1048; -1,4163]^T$
Baza układu kamer mm	108,6151	89,1351
Błąd reprojekcji Δ	0,41597	0,11567

Przy pomocy uzyskanych parametrów zewnętrznych wyznaczono współrzędne przestrzenne czterech zaznaczonych na rysunku 4 punktów: P_0 , P_1 , P_2 , P_3 . Cechą charakterystyczną wybranych punktów jest to, że są one wierzchołkami kwadratu o długości boku 300 mm. Określając odległość między zrekonstruowanymi punktami i porównując ją z odległością rzeczywistą można w przybliżeniu oszacować dokładność rekonstrukcji jak i samej kalibracji układu kamer dla dwóch położenia.

Tab. 3. Odległości między zrekonstruowanymi punktami wyrażone w mm
Tab. 3. Distances between the reconstructed points given in mm

	Kalibracja za pomocą punktów kluczowych o znanym położeniu w przestrzeni	Kalibracja za pomocą punktów kluczowych o nieznanym położeniu w przestrzeni	Kalibracja za pomocą tablicy kalibracyjnej
$ P_1-P_0 $	298,9	304,65	300,81
$ P_2-P_1 $	291,95	304,02	299,59
$ P_3-P_2 $	288,3	305,12	300,72
$ P_0-P_3 $	310,12	299,88	297,18

Współrzędne przestrzenne punktów P_0, P_1, P_2, P_3 wyznaczono na podstawie znanych współrzędnych w wyprostowanych (doprowadzonych do układu kanonicznego [2, 3, 4]) dwóch obrazach termowizyjnych oraz odpowiednich parametrów zewnętrznych zebranych w tabeli 2. W tabeli 3 ograniczono się jedynie do zestawienia odległości pomiędzy kolejnymi punktami.

Zaproponowana metoda określająca wzajemne położenie kamery termowizyjnej na podstawie jedynie współrzędnych obrazowych daje błędy rzędu 5mm podczas, gdy maksymalny błąd pomiaru odległości przy pomocy tradycyjnego układu stereowizyjnego miał wartość ok. 3mm.

8. Wnioski

W pracy zawarto przegląd algorytmów kalibracji układów kamer pod kątem ich zastosowania w trójwymiarowej rekonstrukcji sceny przy pomocy obrazów termowizyjnych. Porównując wyniki rekonstrukcji zamieszczone w tabeli 3 można wysnuć wniosek, że najdokładniejsze wyniki daje tradycyjny układ stereowizyjny składający się z dwóch kamer wizyjnych, których wzajemne położenie nie zmienia się. W przypadku zaproponowanego przez autora algorytmu kalibracji dla poruszającego się układu kamer, wyniki rekonstrukcji są gorsze; błędy rekonstrukcji są rzędu kilku mm przy odległościach rzędu kilkuset mm. Na błędy te ma wpływ dokładność, z jaką wykrywano punkty kluczowe oraz dokładność, z jaką wykryte punkty są śledzone w obrazach z poruszającej się kamery. Zaletą zaproponowanej metody jest możliwość zastosowania tylko jednej kamery termowizyjnej.

9. Literatura

- [1] Bradski G., Kaehler A.: Learning OpenCV, O'Reilly Media, 2008.
- [2] Rzeszotarski D., Strumiłło P., Pelczyński P., Więcek B., Lorenc A.: System obrazowania stereoskopowego sekwencji scen trójwymiarowych, Zeszyty Naukowe Elektronika, Zeszyt nr 10/ 2005, 2006, str. 165–181.
- [3] Cyganek B., Siebert J. P.: An introduction to 3D computer vision techniques and algorithms, John Wiley & Sons, Ltd, 2009.
- [4] Ma Y., Soatto S., Kosecka J., Sastry S.: An invitation to 3D vision, from images to models, Springer Verlag, 2003.
- [5] Fusiello A., Trucco E. and Verri A.: A compact algorithm for rectification of stereo pairs, Machine Vision and Applications 2002, vol. 12, pp. 16–22.
- [6] Prakash S., Lee Y., Robles-Kelly A.: Stereo techniques for 3D mapping of object surface temperatures, QIRT Journal. Volume 4 – N° 1/2007, pp. 63–84.
- [7] Rzeszotarski D., Więcek B.: Trójwymiarowa rekonstrukcja obrazów termowizyjnych z wykorzystaniem systemu stereowizyjnego, VII Konferencja Krajowa Termografia i termometria w podczerwieni 16-18 listopada 2006, str. 229-234.
- [8] Rzeszotarski D., Więcek B.: Thermal Images 3D reconstruction with use of stereovision system, 15th International Conference on Thermal Engineering and Thermogrammetry (THERMO), pp. 27–29 June 2007, Budapest.
- [9] Rzeszotarski D., Więcek B.: Calibration for 3D reconstruction of thermal images, QIRT 2008. 9th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography.
- [10] Stein R., Sawicki P., Więcek B.: Directional Emissivity Correction by Photogrammetric 3D Object Reconstruction, Proc. Quantitative Infrared Thermography, QIRT'98, Eurotherm Seminar No 60, Łódź, Poland, Międzynarodowy Komitet Naukowy 7-10 września, 1999.

otrzymano / received: 02.08.2011

przyjęto do druku / accepted: 05.09.2011

artykuł recenzowany