

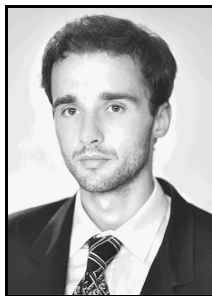
**Mateusz MODERHAK**

KATEDRA INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ WETI PG

**Poprawa kontrastu termicznego na potrzeby kalibracji kamer dla termicznej stereowizji**

Mgr inż. Mateusz MODERHAK

Urodzony w 1983r. W 2007 ukończył Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej na specjalności Inżynieria Biomedyczna. W tym samym roku przyjęty został na studia doktoranckie w Katedrze Inżynierii Biomedycznej WETI PG. Zajmuje się m. in. aplikacjami termografii w diagnostyce nowotworów piersi i czerniaka oraz problemami stereoskopii termicznej.



e-mail: matmod@biomed.eti.pg.gda.pl

**Streszczenie**

Praca przybliży sposób na poprawę kontrastu oraz dokładności kalibracji kamer na potrzeby termicznej stereoskopii. Stereoscopia termiczna oraz synteza trójwymiarowych termogramów nadal napotyka problemy techniczne, które w przypadku zwykłej stereoskopii zostały rozwiązane. Jednym z tych problemów jest dokładna kalibracja układu kamer. Omówiono prosty sposób na poprawę kontrastu w trakcie rejestracji sekwencji obrazów wzorca kalibracyjnego. Pozwala to na dokładniejszą kalibrację systemu 3D złożonego z pary kamer termicznych.

**Słowa kluczowe:** stereoscopia, kalibracja kamer.

**Thermal contrast enhancement in thermal stereo camera calibration****Abstract**

This paper describes a method of thermal contrast enhancement in 3D thermal stereo calibration. Thermal stereoscopy still encounters technical problems that have already been solved in visual stereoscopy. One of them is the accuracy of camera set calibration data which is one of the most important in the whole process of 3D image synthesis. There are many solutions to this problem but none of them is efficient nor easy to perform. Many of them due to the poor thermal image contrast are inaccurate. There is proposed slight modification of RGB camera calibration procedure which allows calibrating IR cameras using common software (Calibration-Toolbox for Matlab) and typical calibration patterns (checker board grid) with increased thermal contrast. A short introduction to the stereo calibration procedure is given in the paper. The calibration pattern is described and quantitative and qualitative comparison between the optical and thermal calibration is performed. The method of contrast enhancement and the analysis of thermal calibration results are presented. This method applied to thermal stereo pair calibration seems to provide better calibration accuracy and makes the procedure invulnerable to ambient IR radiation which can cause reflections disturbing the process.

**Keywords:** IR thermal stereo, camera calibration.

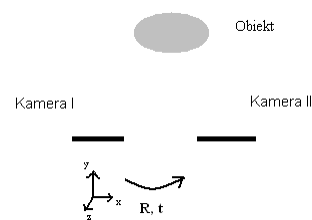
**1. Wstęp**

Stereoscopia jest dynamicznie rozwijającą się gałęzią techniki. Można wyróżnić aplikacje stereoskopii w takich dziedzinach jak sterowanie robotów, tworzenie obiektów trójwymiarowych, detekcja obiektów oraz medycyna [1, 2, 3, 4]. Wraz z rozwojem oraz spadkiem cen kamer termograficznych zaczęto podejmować także próby termicznej stereoskopii. Technika ta napotyka problemy techniczne już rozwiązane, lub nieistniejące w zwykłej stereoskopii. Obraz termiczny posiada cechy utrudniające lub zmieniające podejście do syntezy trójwymiarowych termogramów, takie jak: płytka głębia ostrości spowodowana dużym światłem obiektywów działających w dalekiej podczerwieni, niska rozdzielczość przestrzenna obrazu termicznego, czy wynikające z właściwości promieniowania podczerwonego: zjawiska obicia promieniowania, problem emisyjności, brak tekstur w obrazie. Mianem termicznej

stereoskopii określane są układy składające się z dwóch kamer termicznych [5], ale można do niej zaliczyć systemy hybrydowe składające się z dwóch kamer RGB i jednej termicznej [4, 6]. W pierwszym przypadku pozostajemy przy jednym rodzaju obrazu, który przetwarzamy tylko z dwóch źródeł, kalibracja jest łatwiejsza lecz problematyczny jest proces dopasowywania stereo – identyfikacji par odpowiadających sobie pikseli w lewym oraz prawym obrazie. W drugim przypadku mamy dodatkowe źródło obrazu, proces kalibracji jest trudniejszy ze względu na konieczność wspólnej kalibracji trzech kamer. Wzorec kalibracyjny musi mieć dobrze widoczne szczegóły zarówno w podczerwieni jak i w świetle widzialnym. Dopasowanie stereo jest łatwiejsze dla obrazów w świetle widzialnym.

**2. Kalibracja**

W tej pracy uwaga skupiona jest na układzie złożonym z pary kamer termicznych. Na rysunku 1 przedstawiony jest problem kalibracji układu stereo. Kalibracja polega na odnalezieniu wartości parametrów zewnętrznych ( $\mathbf{R}$ ,  $\mathbf{t}$ ) i wewnętrznych ( $\mathbf{K}_{I,II}$ ) kamer będących składnikami macierzy projekcji kamer  $\mathbf{P}_I$  i  $\mathbf{P}_{II}$ . Środek układu współrzędnych ustalany jest w punkcie centralnym jednej z kamer dlatego obliczane są parametry rotacji ( $\mathbf{R}$ ) i translacji ( $\mathbf{t}$ ) drugiej kamery względem pierwszej. Dla kamery znajdującej się w środku układu współrzędnych:  $\mathbf{R} = \mathbf{I}$  oraz  $\mathbf{t} = [\mathbf{0}]$ .



Rys. 1. Konfiguracja układu stereo z niewiadomymi parametrami zewnętrznymi  $\mathbf{R}$  oraz  $\mathbf{t}$

Fig. 1. Configuration of stereo rig; unknown extrinsic  $\mathbf{R}$ ,  $\mathbf{t}$  matrices

Macierze projekcji kamery I oraz II mają postać:

$$\mathbf{P}_I = \mathbf{K}_I [\mathbf{I} | \mathbf{0}] \quad (1)$$

$$\mathbf{P}_{II} = \mathbf{K}_{II} [\mathbf{R} | \mathbf{t}] \quad (2)$$

gdzie:

- $\mathbf{P}_I$ ,  $\mathbf{P}_{II}$  – macierze projekcji kamery I i II,
- $[\mathbf{I} | \mathbf{0}]$  – macierz rozszerzona dla kamery I, w której punkcie centralnym znajduje się układ współrzędnych,
- $[\mathbf{R} | \mathbf{t}]$  – macierz rozszerzona drugiej kamery (II), uwzględniająca jej rotację i przesunięcie względem pierwszej,
- $\mathbf{K}_I$ ,  $\mathbf{K}_{II}$  – macierze parametrów wewnętrznych kamery I i II:

$$\mathbf{K}_{I,II} = \begin{bmatrix} f_{x_{I,II}} & s_{I,II} & x_{0_{I,II}} \\ & f_{y_{I,II}} & y_{0_{I,II}} \\ & & 1 \end{bmatrix},$$

- $f_x$  – składowa ogniskowej wzdłuż osi 0X układu współrzędnych,
- $f_y$  – składowa ogniskowej wzdłuż osi 0Y układu współrzędnych
- $s$  – (ang. *skew*) współczynnik skosu osi 0X i 0Y,
- $x_0$  – odcięta punktu centralnego kamery,

$y_0$  – rzędna punktu centralnego kamery  
 $R$  – macierz rotacji względem ustalonego układu współrzędnych (najczęściej punkt centralny wybranej kamery):

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix},$$

$r_{ij}$  – współczynniki macierzy rotacji,  
 $t$  – wektor przesunięcia układu współrzędnych kamery względem ustalonego układu współrzędnych (najczęściej punkt centralny wybranej kamery):

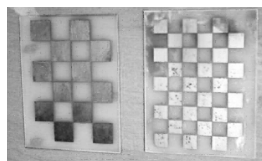
$$t = [t_1 \quad t_2 \quad t_3]^T,$$

$t_i$  – składowe wektora translacji.

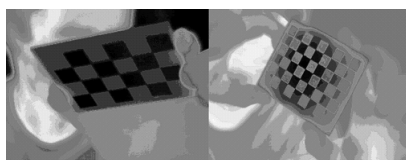
Jednym z etapów kalibracji jest akwizycja obrazów wzorca kalibracyjnego o znanych wymiarach geometrycznych i ustalonych cechach pozwalających na jednoznaczną identyfikację ich współrzędnych obrazowych. Bardzo dobrym wzorcem jest szachownica [7], której punkty charakterystyczne są łatwe do określenia przy pomocy algorytmów analizy obrazu. Seria obrazów wzorca (w różnych pozycjach w przestrzeni względem kamery) poddawana jest obróbce. Współrzędne punktów charakterystycznych zostają użyte w procesie optymalizacji, którego wynikiem są parametry kamer [7, 8]. Dokładna kalibracja jest niezbędna jeżeli chcemy dokonać poprawnej rektyfikacji obrazów, zidentyfikować odpowiadające sobie pary punktów i dokonać syntezy obrazu 3D bez dużych błędów estymacji współrzędnych przestrzennych rozpatrywanych par punktów (zwanych inaczej zniekształceniami rzutowymi).

### 3. Wzorec kalibracyjny

Do eksperymentów użyto dwóch płytek kalibracyjnych o wymiarach 75mm x 100mm ze wzorcem szachownicy o odpowiednio 4x6 i 6x9 polach. W pierwszym przypadku jedno pole miało wymiary 15mm x 15mm, w drugim 10mm x 10mm. Kontrast termiczny uzyskano poprzez naniesienie metalizacji miedzianej o innym współczynniku emisyjności niż podłoże (laminat FR3). Na rysunku 2 i 3 przedstawiono fotografie wzorców oraz ich termogramy. Poza szachownicą używane są również płytki z naklejonymi znacznikami [4] lub płytki z otworami [9]. Głównym problemem przy kalibracji kamer jest dobór takich materiałów, które nie będą odbijały promieniowania. Zakłóca to detekcję punktów charakterystycznych. Poniżej przedstawiono wyniki kalibracji układu dwóch kamer ThermaCam A320G przy pomocy opisywanych wzorców (z metodą zwiększania kontrastu termicznego), które są porównane z kalibracją zwykłych kamer internetowych Logitech QuickCam 9000 w świetle widzialnym.



Rys. 2. Fotografia wzorców kalibracyjnych (wzorec I) oraz (wzorec II)  
 Fig. 2. Photos of calibration samples I and II



Rys. 3. Termogramy wzorców kalibracyjnych  
 Fig. 3. Thermograms of calibration samples I and II

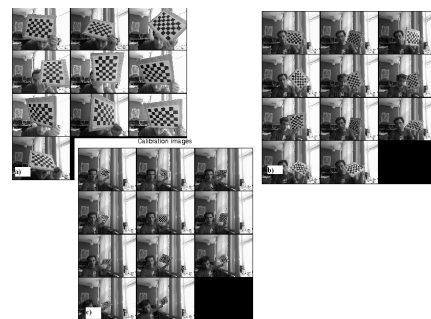
### 4. Kalibracja kamer wizyjnych

W każdym przypadku do obliczeń parametrów układu kamer użyto *Calibration Toolkit for Matlab*. Program dostępny jest za darmo, pozwala na dokładną analizę statystyczną wyników oraz jest przystosowany do kalibracji kamer przy pomocy szachownicy [10]. W przypadku kamer internetowych jako wzorec wykorzystano szachownicę wydrukowaną na arkuszu papieru A4, składającą się z 6x8 pól o rozmiarze 30mm x 30mm. Rejestracji obrazów dokonano dla trzech różnych odległości wzorca od obiektywu kamery (rys. 4a, b, c). W pierwszym przypadku (rys. 4a) wzorec zajmuje około 20%, w drugim (rys. 4b) 10%, natomiast w trzecim przypadku ok. 2% całego kadru. Pozwoliło to dodatkowo zbadać wpływ wypełnienia kadru przez wzorec na wartości parametrów oraz błędy ich estymacji. W każdym przypadku pobrano sekwencję czternastu obrazów, z których wyeliminowano te wnoszące duży błąd do kalibracji (sygnalizowany przez *Calibration Toolbox*). W tabeli 1 przedstawione są wyniki obliczeń ogniskowej dla przypadków a, b, c. Do oceny dokładności wykorzystano ogniskową kamery, gdyż program podawał dokładność estymacji tego parametru. Jak można było się spodziewać błąd ogniskowej rośnie wraz z oddaleniem planszy od obiektywu kamery. Spowodowane jest to faktem, iż im mniejszy jest obraz wzorca z tym mniejszą dokładnością określane są współrzędne jego punktów charakterystycznych, na podstawie których obliczane są macierze kamery oraz układu kamer. Niepewności uzyskane w trakcie kalibracji kamer wizyjnych są uważane za wzorcowe, gdyż fotografie wyróżniają się dobrym kontrastem oraz ostrością pól czarnobiałych.

Tab. 1. Obliczona długość ogniskowej kamery oraz jej błąd względny dla przypadków a, b, c

Tab. 1. Estimated focal length and corresponding error for cases a, b, c

przypadek	ogniskowa [piksele]	błąd względny [%]
a)	802	0,62
b)	796	0,84
c)	762	9,65



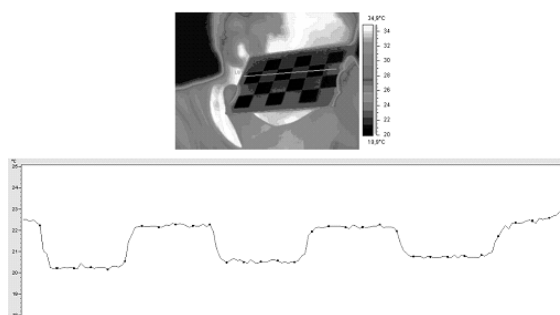
Rys. 4. Sekwencje obrazów kalibracyjnych o rosnącym oddaleniu od obiektywu kamery

Fig. 4. Sequences of calibration images of increasing distance between checkerboard and camera lens

### 5. Kalibracja kamer termicznych i wzmocnienie kontrastu

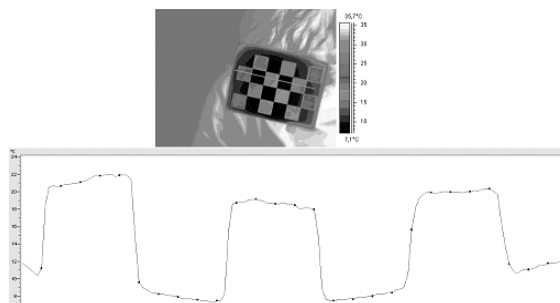
W przypadku kalibracji kamer termicznych jakość obrazu wzorca jest bardzo ważna. Aby uzyskać termogramy dobrej jakości należy więcej uwagi poświęcić warunkom w jakich są wykonywane. Algorytm wykrywający rogi szachownicy pracuje lepiej, kiedy granice pomiędzy laminatem a metalizacją są ostre i kontrastowe. Promieniowanie termiczne odbijające się w niekontrolowany sposób od miedzianych pól szachownicy utrudnia detekcję rogów szachownicy i obniża kontrast termiczny obrazu. Dodatkowo układ optyczny termografu charakteryzuje się bardzo płytką głębią ostrości w porównaniu z optyką kamer wizyjnych, dlatego bardzo ważne jest poprawne ustawienie ostrości obrazu płytki kalibracyjnej.

Opisywana metoda polega na takim ochłodzeniu lub ogrzaniu wzorca kalibracyjnego, aby uzyskać duży kontrast termiczny w stosunku do temperatury otoczenia, w którym wykonywana jest kalibracja. Podniesienie lub obniżenie temperatury powoduje, że kontury pól szachownicy stają się wyraźniejsze. W przypadku ochłodzenia płytki jest to wynikiem odbicia promieniowania dużo cieplejszego otoczenia od metalizacji płytki, a w przypadku ocieplania płytki - przewagą promieniowania własnego nad odbitym. Rysunek 5 przedstawia termogramy płytki przed obniżeniem jej temperatury przy pomocy ciekłego dwutlenku węgla oraz przekrój temperatury przez pola szachownicy. Ta sama płytka po zwiększeniu kontrastu termicznego pokazana jest na rysunku 6. Sekwencje obrazów kalibracyjnych pobrano w taki sam sposób jak dla obrazów z kamery internetowej. Ze względu na fakt iż dla kamer RGB błąd estymacji parametrów wzrastał kiedy stopień wypełnienia kadru wzorcem malał zarejestrowano sekwencje obrazów tylko dla jednej odległości wzorca od termografu (rys. 7). Wartości ogniskowych i błędy dla wzorca I przedstawiono w tabeli 2, a dla wzorca II w tabeli 3.



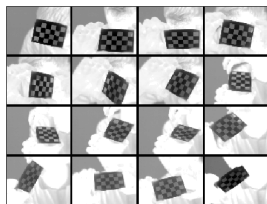
Rys. 5. Termogram i kontrast termiczny wzdłuż linii, przed wzmocnieniem kontrastu; różnica temperatury pomiędzy polami szachownicy 2,5K

Fig. 5. Thermal contrast along the line before contrast enhancement; temperature difference between hot and cold squares 2,5K



Rys. 6. Termogram i kontrast termiczny wzdłuż linii po wzmocnieniu kontrastu; różnica temperatury pomiędzy polami szachownicy uległa zwiększeniu do 14K

Fig. 6. Thermal contrast after enhancement; temperature difference increased to 14K



Rys. 7. Jedna z sekwencji obrazów kalibracyjnych kamer termograficznych

Fig. 7. One of the calibration sequences for thermal camera calibration

Tab. 2. Obliczona długość ogniskowej kamery oraz jej błąd względny dla wzorca I bez i ze wzmocnieniem kontrastu termicznego

Tab. 2. Estimated focal length and its corresponding error without and with enhanced contrast (calibration sample I)

przypadek	ogniskowa [piksele]	błąd względny [%]
normalny kontrast	795	4
wzmocniony kontrast	769	2,3

Tab. 3. Obliczona długość ogniskowej kamery oraz jej błąd względny dla wzorca II bez i ze wzmocnieniem kontrastu termicznego

Tab. 3. Estimated focal length and its corresponding error without and with enhanced contrast (calibration sample II)

przypadek	ogniskowa [piksele]	błąd względny [%]
normalny kontrast	770	5
wzmocniony kontrast	753	3,8

Wyniki obliczeń pokazują, że wzmocnienie kontrastu termicznego płytki kalibracyjnej pozwala na dokładniejszą estymację parametrów kamery. W przypadku wzorca I po jego ochłodzeniu błąd zmniejszył się prawie dwukrotnie. W drugim przypadku (wzorzec II) poprawa była mniejsza. Spowodowane to jest małym rozmiarem pól szachownicy w obrazie termograficznym. Jak pokazały eksperymenty przeprowadzone dla kamer internetowych błąd jest również zależny od stopnia wypełnienia kadru przez wzorzec. Wpływa to na dokładność określenia współrzędnych obrazowych rogów szachownicy przez algorytm detekcji. Pomimo zachowania tej samej odległości wzorca od kamery termograficznej rozmiar pól szachownicy jest mniejszy, co pogarsza dokładność określenia ich współrzędnych obrazowych.

## 6. Wnioski

Mimo poprawy dokładność kalibracji kamer termicznych jest nadal o rząd wielkości gorsza niż kamer rejestrujących promieniowanie widzialne. Określenie wartości macierzy opisujących układ obrazowania stereo jest bardzo ważne dla późniejszego procesu syntezy obrazu 3D. Niedokładność kalibracji kamer powoduje szereg błędów mających wpływ na cały proces syntezy obrazu stereoskopowego: zaczynając od błędnej rektyfikacji par obrazów stereoskopowych, utrudniającej proces dopasowywania stereo oraz estymacji współrzędnych przestrzennych punktów w procesie rzutowania wstecznego. Opisywana metoda ułatwia kalibrację układu obrazowania składającego się z dwóch kamer termograficznych i w ten sposób przyczynia się do poprawy jakości syntezy obrazu trójwymiarowego.

Praca została wykonana w ramach projektu rozwojowego R1302701.

## 7. Literatura

- [1] L. Iocchi, K. Konolige. A multiresolution Stereo Vision System for Mobile Robots. AIIA Workshop 1998.
- [2] Y. Hashimoto, Y. Matsuki, T. Nakanishi, K. Umeda, K. Suzuki, K. Takashio. Detection of Pedestrians Using Subtraction Stereo. International Symposium on Applications and the Internet 2008.
- [3] H. Ukida, S. Takamatsu. 3D Shape Measurements Using Stereo Image Scanner with Three Color Light Sources. IMTC 2004.
- [4] P. Aksenov, I. Clark, D. Grant, A. Inman, L. Vartikovskii and J.-C. Nebel. 3D Thermography for the quantification of heat generation resulting from inflammation. Proc. 8th 3D Modelling symposium, Paris, France, 2003.
- [5] S. Parkash, P. Y. Lee, A. Robles-Kelly. Stereo techniques for 3D mapping of object surface temperature. QIRT Journal volume 4 1/2007.
- [6] D. Rzeszutowski, B. Więcek. Calibration for 3D Reconstruction of Thermal Images. 9th International Conference on Quantitative Infra-Red Thermography, 2008 Kraków, Poland.
- [7] Z. Zhang. A Flexible New Technique for Camera Calibration. Microsoft Technical Report MSR TR 98 71. 2002.
- [8] R. Hartley, A. Zisserman. Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press. 2006.
- [9] G. Cardone, S. Discetti. Reconstruction of 3D Surface Temperature from IR Images. 9th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, 2008 Kraków, Poland.
- [10] J. Bouguet. Camera Calibration Toolkit. [http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/). 2008.