

Andrzej WRÓBEL, Alina WRÓBEL, Dawid KADŁUBOWSKI

AGH AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, WYDZIAŁ GEODEZJI GÓRNICZEJ I INŻYNIERII ŚRODOWISKA,
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Dystorsja obiektywów kamer termograficznych**Dr inż. Andrzej WRÓBEL**

Absolwent Wydziału Geodezji Górniczej Akademii Górniczo-Hutniczej (1977). Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskał w 1987 roku. Adiunkt w Katedrze Geoinformacji Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska. Główne zainteresowania zawodowe: fotogrametria zwłaszcza zastosowania fotogrametrii w inwentaryzacji zabytków, geodezja, teledetekcja, termografia. W swoim dorobku naukowym posiada ponad 40 publikacji. Hobby: fotografia.



e-mail: awrobel@agh.edu.pl

Dr hab. inż. Alina WRÓBEL

Absolwentka Wydziału Geodezji Górniczej Akademii Górniczo-Hutniczej (1979). Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskała w 1988, a doktora habilitowanego w 2011 roku. Adiunkt w Katedrze Geodezji Inżynierskiej i Budownictwa. Zainteresowania naukowe to: termografia, geodezja inżynierska, teledetekcja, budownictwo. W swoim dorobku naukowym posiada ponad 60 publikacji. Wiele z nich dotyczy zastosowania termografii w budownictwie. Hobby: ogrodnictwo.



e-mail: alibel@agh.edu.pl

Mgr inż. Dawid KADŁUBOWSKI

Absolwent Technikum Budowlanego w Pile (2003) Absolwent Wydziału Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie (2011) specjalność Geoinformatyka, Fotogrametria i Teledetekcja. W czasie studiów pracował w przedsiębiorstwach geodezyjno-kartograficznych m.in. w OPGK w Krakowie. Rysownik i modelarz modeli redukcyjnych. Obecnie zajmuje się malowaniem artystycznym na szkle. Miłośnik koszykówki.



e-mail: dawidpila@autograf.pl

Streszczenie

Przeprowadzono badania dystorsji dwóch obiektywów kamery termowizyjnej FLIR ThermoCAM S65 o ogniskowej 18mm i 36 mm. Kalibrację wykonano programem do kalibracji aparatów fotograficznych PI-Calib. Pole testowe przygotowane przez producenta programu zaadaptowano do rejestracji termograficznej. Dystorsja obiektywu 36 mm jest bardzo mała (max 5 pikseli), natomiast dystorsja obiektywu 18 mm w narożnikach termogramu dochodzi do 35 pikseli. Obraz zmontowany z termogramów nieskorygowanych ze względu na dystorsję może posiadać bardzo duże błędy.

Słowa kluczowe: dystorsja, termogram, kamera termograficzna.

Lens distortion in thermography**Abstract**

The authors conducted a study on lens distortion of the FLIR ThermoCAM S65 thermographic camera. Two lenses were examined: with focal length equal to 36 mm and 18 mm. Calibration was carried out using professional PI-Calib software that uses an unbalanced distortion model described with formula (1). A special test field was prepared (Fig. 1) and its thermal image was captured outside under a cloudless sky (Fig. 2). Additionally, the thermograms were projectively transformed using all points of the test field. The resulting distribution of deviations of the test field points represents balanced distortion. The 36 mm lens has very small distortion – up to 5 mm near the corners of a thermogram. The distribution of deviations after projective transformation (Fig. 6) confirms the small distortion. The distortion can be often neglected, as can be seen in the picture composed of images that did not have distortion corrected (Fig. 9). The 18 mm lens has large distortion – up to 35 pixels in the corners (Fig. 3). The distribution of deviations after projective transformation is presented in Fig. 5. Composing images with uncorrected distortion leads to large geometric errors in the resulting image (Fig. 10a). After correcting the distortion with PI-Calib software (Fig. 8), images can be composed and the resulting image has no geometric errors (Fig. 10b).

Keywords: distortion, thermogram, thermographic camera.

1. Wprowadzenie

Tworzenie obrazu metodą fotograficzną opisuje teoria rzutu środkowego zwana również perspektywą. Zasada powstawania

obrazu we współczesnych kamerach termograficznych to również rzut środkowy. W rzeczywistości żaden obraz utworzony przez aparat fotograficzny lub przez kamerę termograficzną nie jest idealnym rzutem środkowym. Elementem kamery odpowiedzialnym za prawidłową realizację rzutu środkowego jest obiektyw kamery. W zależności od jego jakości na obrazie występują różne błędy. Z punktu widzenia geometrii obrazu najistotniejszym błędem jest dystorsja. Powstaje ona, gdy promienie wchodzące do obiektywu wychodzą z niego pod nieco innym kątem. Wielkość dystorsji zależy od jakości obiektywu, jego konstrukcji i ogniskowej. Szczególnie dużą dystorsją charakteryzują się obiektywy szerokokątne.

Opisując dystorsję mówi się o dystorsji radialnej (składowa dystorsji wzdłuż kierunku promienia) i tangencjalnej (składowa dystorsji prostopadła do kierunku promienia). Nie ma jednego uniwersalnego modelu opisującego zależność pomiędzy promieniem a błędem spowodowanym dystorsją. Zwykle do opisu tej zależności stosuje się równania wielomianowe. Do najczęściej wykorzystywanych należą model Browna (Gaussa), model USGS (United States Geological Survey) i model ISPRS (Międzynarodowego Towarzystwa Fotogrametrii i Teledetekcji) [1, 2]. Model Browna opisuje dystorsję radialną za pomocą następującej funkcji

$$dr = K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7 + \dots, \quad (1)$$

gdzie: dr – przesunięcie radialne spowodowane dystorsją, r – promień radialny.

Model USGS jest to tzw. model zbalansowanej dystorsji

$$dr = A_0 r + A_1 r^3 + A_2 r^5 + A_3 r^7 + \dots. \quad (2)$$

Zbalansowanie dystorsji polega na tym, że przyjmuje się pewną wartość promienia r_0 , dla którego wartość dystorsji wynosi zero. Dla promienia mniejszego niż r_0 dystorsja ma znak przeciwny niż dla promienia większego niż r_0 . Wartość r_0 dobiera się tak, aby minimalna i maksymalna wartość dystorsji były mniej więcej równe.

Model ISPRS jest również modelem dystorsji zbalansowanej i opisywany jest równaniem

$$dr = a_1 r(r^2 - r_0^2) + a_2 r(r^4 - r_0^4) + a_3 r(r^6 - r_0^6) + \dots. \quad (3)$$

Przejęcie z modelu dystorsji niezbalansowanej do modelu dystorsji zbalansowanej wymaga zmiany wartości stałej kamery, ale ma to znaczenie jedynie w opracowaniach fotogrametrycznych.

Problem dystorsji obiektywów kamer termograficznych jest rzadko poruszany w literaturze [3, 4, 5, 6]. W praktycznych opracowaniach termograficznych często wykorzystuje się termogramy z widocznym wpływem dystorsji. Może to być istotne w przypadku montowania kilku termogramów w jeden wspólny obraz. Widoczne zniekształcenie obrazu spowodowane dystorsją uniemożliwi

liwiają niejednokrotnie prawidłowy montaż. Nieuwzględnienie wpływu dystorsji, jeżeli jest ona duża, może prowadzić do znacznych błędów również wtedy, gdy na termogramach dokonuje się pomiaru powierzchni.

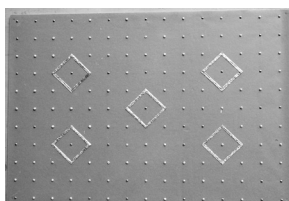
W przeprowadzonych badaniach przeanalizowano wielkość dystorsji dla dwóch obiektywów kamery ThermoCAM S65 firmy Flir. Były to obiektywy o ogniskowej 36 mm i 18 mm.

2. Wyznaczenie dystorsji obiektywów kamery termograficznej ThermoCAM S65

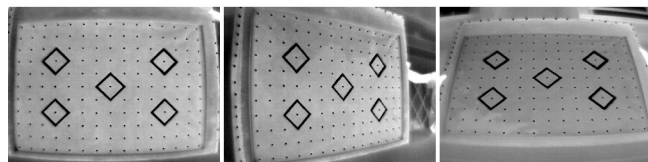
Do wyznaczenia dystorsji obiektywów kamery termograficznej wykorzystano stosowany w fotogrametrii proces kalibracji geometrycznej aparatów fotograficznych. Kalibracja aparatu fotograficznego polega na wyznaczeniu elementów orientacji wewnętrznej kamery oraz parametrów funkcji opisującej dystorsję. Elementy orientacji wewnętrznej kamery to stała kamery (odległość obrazowa) c_k oraz położenie punktu głównego zdjęcia (punkt przecięcia zdjęcia prostą prostopadłą do niego przechodzącą przez środek rzutów) [7]. Do kalibracji najczęściej wykorzystuje się różne przestrzenne lub płaskie pola testowe. Jeżeli pole testowe jest płaskie to w celu wyznaczenia elementów orientacji wewnętrznej należy wykonać kilka zdjęć tego pola z różnych kierunków. Do wyznaczenia parametrów dystorsji potrzebne jest frontálne zdjęcie płaskiego pola. Warunkiem koniecznym jest to, aby obraz pola testowego wypełniał całe lub prawie całe zdjęcie.

Do kalibracji geometrycznej kamery termograficznej zastosowano profesjonalny program PI-Calib firmy TOPCON [8]. Jest to program do kalibracji aparatów fotograficznych i kamer fotogrametrycznych. Płaskie pole testowe dostarczane jest przez firmę TOPCON w postaci pliku CAD, a użytkownik drukuje je na specjalnej folii kreślarskiej. Ponieważ w czasie kalibracji tym programem wyznaczane są jednocześnie elementy orientacji wewnętrznej kamery i parametry dystorsji, pole to fotografuje się z pięciu różnych kierunków, jednego na wprost i z czterech stron bocznych.

Dla kalibracji kamery termograficznej przygotowano specjalną wersję tego pola (rys. 1). Drukowane czarne kółka zastąpiono pinezkami tapicerskimi i kulkami ze zgniecionej folii aluminiowej. Pięć rombów otaczających niektóre punkty pola testowego pokryto paskami pogniecionej folii aluminiowej [9].



Rys. 1. Fotografia pola testowego do kalibracji kamery termograficznej
Fig. 1. Photography of the test field used to calibrate the thermographic camera



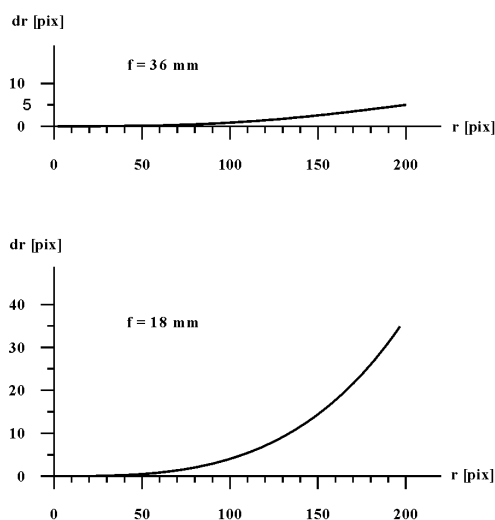
Rys. 2. Wybrane termogramy pola testowego wykonane obiektywem 18 mm
Fig. 2. Selected thermograms of the test field, captured using 18 mm lens

Test rejestrowano kamerą termograficzną na zewnątrz budynku uzyskując pozorne zróżnicowanie temperatury poprzez odbicie w folii aluminiowej i główkach pinezek zimnego promieniowania rozpozodzonego nieba. Na rysunku 2 przedstawiono trzy przykładowe termogramy wykonane obiektywem o ogniskowej 18 mm.

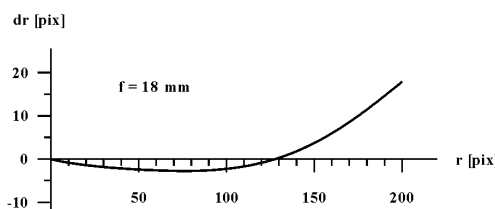
Program PI-Calib wykonuje automatyczny pomiar współrzędnych punktów testu na zdjęciach a ponieważ rozdzielczość termo-

gramów jest o wiele niższa niż zdjęć fotograficznych obawiano się problemów z pomiarem. Udało się go wykonać ręcznie poprawiając błędy. Program wylicza równocześnie elementy orientacji wewnętrznej kamery oraz parametry dystorsji. W związku z wyznaczeniem przez program wartości odległości obrazowej (stałej kamery) musi ona być taka sama dla wszystkich zdjęć, czyli w czasie rejestracji nie można zmieniać ostrości obrazu.

PI-Calib wyznacza dystorsję wg modelu Browna, czyli jest to dystorsja niezbalansowana. Blisko krawędzi termogramów dystorsja osiąga duże wartości. Obiektyw 36 mm ma stosunkowo niską dystorsję radialną gdyż nawet niezbalansowana dystorsja w narożniku termogramu osiąga wartość niecałe 5 pikseli, natomiast dystorsja radialna obiektywu 18 mm w narożniku termogramu osiąga wartość około 35 pikseli (rys. 3).



Rys. 3. Dystorsja niezbalansowana wyznaczona w programie PI-Calib
Fig. 3. Unbalanced distortion calculated using PI-Calib software

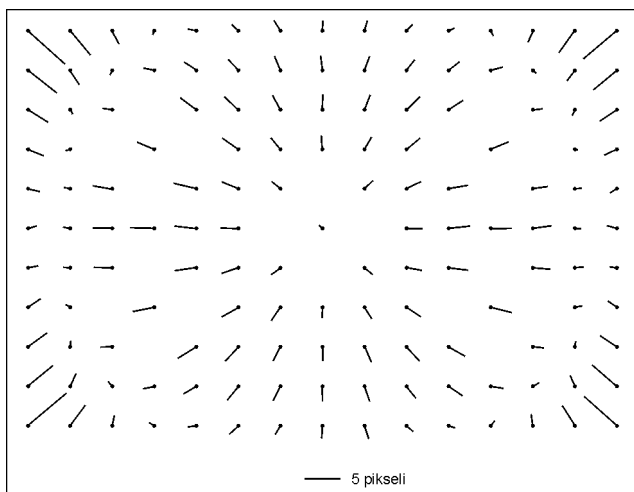


Rys. 4. Dystorsja zbalansowana wyznaczona przez przekształcenie rzutowe
Fig. 4. Balanced distortion calculated using projective transformation

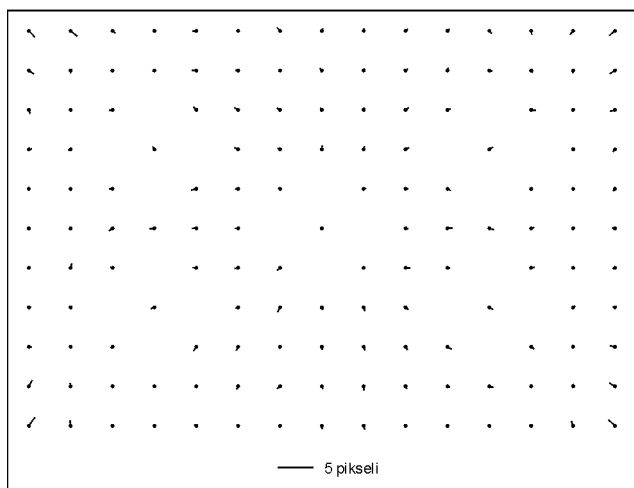
Wyznaczono również dystorsję zbalansowaną. Wykonano to przez wpasowanie termogramu w obraz planszy testowej z wykorzystaniem przekształcenia rzutowego. Przy transformacji rzutowej, jako punkty dostosowania wykorzystano wszystkie 145 punktów testu, co pozwoliło na zbalansowanie dystorsji przynajmniej obszarze objętym punktami testu. Na rysunku 4 przedstawiono wykres funkcji wielomianowej aproksymującej dystorsję dla obiektywu 18 mm. W samym narożniku termogramu wartość dystorsji osiąga około 17 pikseli, czyli jest wyraźnie mniejsza niż maksymalna wartość dystorsji niezbalansowanej, która wynosiła w narożniku 35 pikseli (rys. 3). Średni błąd określenia wielkości dystorsji przedstawionej na rysunkach 3 i 4 można oszacować na około 0,3 pikseli przy czym wynika on częściowo z dokładności pomiaru na termogramie, a częściowo z tego, że dystorsja obu obiektywów nie jest idealnie symetryczna.

Na podstawie otrzymanych w przekształceniu rzutowym odchylek wpasowania punktów testu w ich obraz na termogramie sporządzono wykresy wartości dystorsji na poszczególnych punktach pola testowego. Ponieważ przy kalibracji obiektywu o ogniskowej 18 mm obraz pola testowego na zdjęciu frontálním (rys. 2) nie zajmował idealnie całej powierzchni termogramu, wartość dystorsji na skrajnych punktach jest mniejsza niż maksymalna wartość

na wykresie funkcji wielomianowej (rys. 4) i dla narożnikowych punktów wynosi maksimum 7,5 piksela (rys. 5). W przypadku obiektywu o ogniskowej 36 mm obraz pola testowego również nie wypełniał całego termogramu. Maksymalna wartość dystorsji zbalansowanej na obrazie narożnikowych punktów pola testowego wynosi 1,3 piksela (rys. 6), a maksymalna wartość wyznaczona z aproksymującej dystorsję funkcji wielomianowej w samym narożniku termogramu wynosi 2,8 piksela.



Rys. 5. Rozkład odchylek po transformacji rzutowej, obiektyw 18 mm
Fig. 5. Distribution of deviations after projective transformation, 18 mm lens



Rys. 6. Rozkład odchylek po transformacji rzutowej, obiektyw 36 mm
Fig. 6. Distribution of deviations after projective transformation, 36 mm lens

Zarówna analiza wielkości dystorsji zbalansowanej jak i niezbalansowanej prowadzi do wniosku, że obiektyw o ogniskowej 36 mm ma na tyle niską dystorsję beczkową, iż praktycznie nie ma potrzeby korygowania obrazu termogramów. Przeciwnie jest w przypadku obiektywu o ogniskowej 18 mm. Obiektyw ten ma dużą dystorsję beczkową i w sytuacji, w której geometria obrazu ma znaczenie obraz termogramu powinien być korygowany.

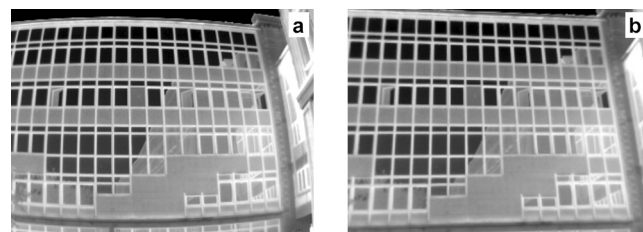
3. Wpływ dystorsji obiektywu kamery termograficznej

Dla pokazania skutków nieuwzględniania wpływu dystorsji wykonano termograficzne zobrazowanie elewacji budynku kamerą ThernaCAM S65 z dwoma obiektywami o ogniskowych 18 mm i 36 mm. Elewacja ta ma bardzo dużo okien tworzących regularną siatkę prostokątów (rys. 7). Uzyskane termogramy przetworzono usuwając wpływ dystorsji. Możliwość taką daje jedna z funkcji programu PI-Calib. Na rysunku 8 przedstawiono

termogram wykonany obiektywem o ogniskowej 18 mm nieskorygowany i skorygowany. Widać jak duże zniekształcenie obrazu powodowała dystorsja tego obiektywu.



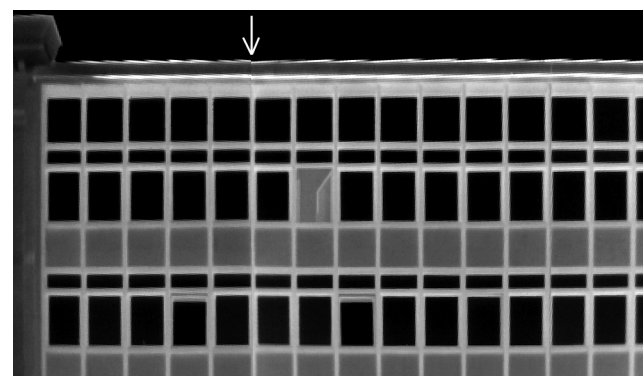
Rys. 7. Fotoplan elewacji
Fig. 7. Photoplan of building elevation



Rys. 8. Termogram fragmentu elewacji wykonany obiektywem o ogniskowej 18 mm; a - oryginalny, b - po usunięciu wpływu dystorsji
Fig. 8. Thermogram of building elevation captured using 18 mm lens; a - original image, b - image with corrected distortion

Termogramy wykonywano z powierzchni terenu, w związku z czym posiadały zniekształcenie perspektywiczne. By można było zmontować termograficzny obraz całej elewacji należało to zniekształcenie usunąć, zwłaszcza że ze względu na przeszkody terenowe termogramy wykonane były pod różnymi kątami w stosunku do elewacji i w związku z tym posiadały różne zniekształcenie perspektywiczne.

Do skorygowania zniekształcenia perspektywicznego wykorzystano profesjonalny program Image Analyst firmy Intergraph. Na podstawie pomiaru wybranych narożników okien sporządzono ich rysunek w rzucie na płaszczyznę elewacji. Wykonano zdjęcia fotograficzne elewacji a następnie w programie Image Analyst wpasowano te zdjęcia w przygotowany rysunek. W ten sposób powstał fotoplan elewacji przedstawiony na rysunku 7. Następnie poszczególne termogramy wpasowywano w ten fotoplan wykorzystując jako punkty dostosowania zarejestrowane na termogramach różne szczegóły elewacji.



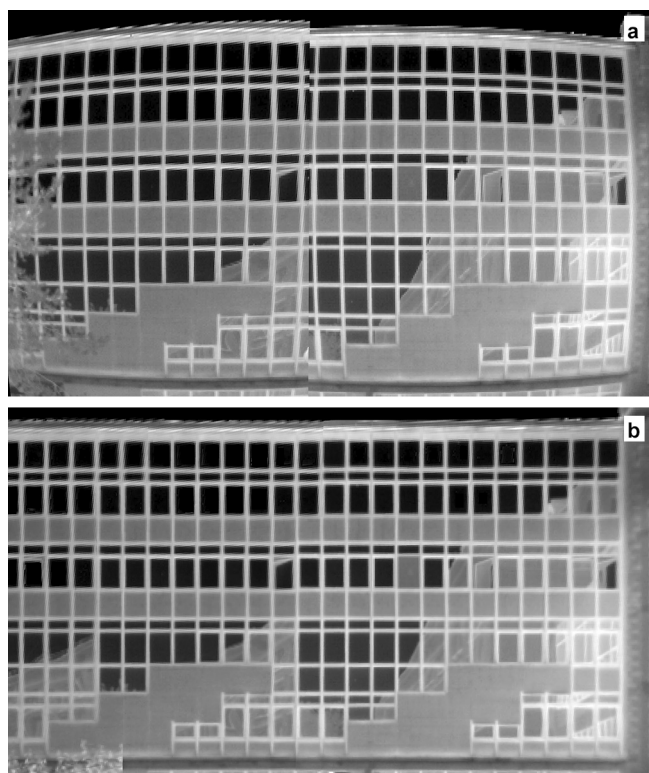
Rys. 9. Obraz zmontowany z dwóch termogramów wykonanych obiektywem 36 mm nieskorygowanych ze względu na wpływ dystorsji (biała strzałka pokazuje pionową linię łączenia)
Fig. 9. Image composed of two thermograms captured using 36 mm lens that did not have distortion corrected (white arrow shows vertical boundary between two images)

Dla zaprezentowania jak duże błędy spowoduje nieuwzględnienie dystorsji wpasowanie przeprowadzono zarówno dla termo-

gramów skorygowanych ze względu na wpływ dystorsji jak i nieskorygowanych.

W przypadku termogramów wykonanych obiektywem o ogniskowej 36 mm stwierdzono, że praktycznie nie ma znaczenia czy do opracowania wykorzysta się termogramy skorygowane czy nieskorygowane ze względu na wpływ dystorsji. Na rysunku 9 przedstawiano zmontowane dwa termogramy o nieskorygowanej dystorsji. Strzałką zaznaczono pionową linię łączenia obydwu obrazów. Linia ta jest prawie niezauważalna i dopiero przy dokładnej analizie można zauważyć niewielkie niezgodności.

Termogramy wykonane szerokokątnym obiektywem o ogniskowej 18 mm, nieskorygowane ze względu na wpływ dystorsji, praktycznie nie dały się dobrze zmontować (rys. 10a). Na linii łączenia obu termogramów szerokość okna wynosiła mniej niż połowę jego rzeczywistej szerokości. Analiza błędów wpasowania termogramu z nieusuniętą dystorsją w fotoplan elewacji wskazuje, że średni błąd na poszczególnych szczegółach wynosił około 4 piksele natomiast błędy maksymalne dochodziły do prawie 8 pikseli. Montaż termogramów ze skorygowaną dystorsją dał bardzo dobry efekt. Linia łączenia jest praktycznie niezauważalna i nie widać żadnych deformacji elementów elewacji (rys. 10b). Błąd średni wpasowania termogramów ze skorygowaną dystorsją w fotoplan elewacji wynosił około 0,4-0,5 piksela, a błędy maksymalne nie przekraczały 0,9 piksela.



Rys. 10. Obraz zmontowany z dwóch termogramów wykonanych szerokokątnym obiektywem 18 mm; a – termogramy bez korekcji wpływu dystorsji, b – termogramy z korekcją wpływu dystorsji

Fig. 10. Image composed of two thermograms captured using 18 mm lens; a – thermograms without distortion corrected; b – thermograms with distortion corrected

4. Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonej fotogrametrycznej kalibracji geometrycznej kamery termograficznej ThermoCAM S65 wyznaczono parametry funkcji wielomianowej opisującej dystorsję. Stwierdzono, że program PI-Calib, mimo pewnych problemów z automatycznym pomiarem, umożliwia taką kalibrację. Aby automatyczny pomiar był możliwy punkty pola testowego muszą mocno kontrastować z tłem. Warunkiem uzyskania prawidłowych wyników jest to by na frontalnym termogramie testu jego obraz wypeł-

nił prawie całe pole widzenia. Niedopuszczalne jest, aby obraz pola testowego zajmował mniej niż około 80% powierzchni termogramu. Ze względu na nieliniowość funkcji opisujących dystorsję ekstrapolacja poza obszar testu obciążona jest ryzykiem bardzo dużych błędów, co zresztą można wywnioskować z wykresu dystorsji radialnej obiektywu 18 mm (rys. 3).

Obiektyw o ogniskowej 36 mm ma bardzo niewielką dystorsję. Dystorsja niezbalansowana w narożnikach termogramu wynosiła maksymalnie 5 pikseli, a zbalansowana maksymalnie niecałe 3 piksele. Jeżeli nie wykorzystuje się samego skraju termogramu to wpływ dystorsji jest jeszcze mniejszy. Dla znakomitej większości opracowań termograficznych takie zniekształcenie nie ma praktycznego znaczenia. Pokazuje to przykład montażu termogramów elewacji o dużej liczbie okien (rys. 9). Na linii łączenia obu obrazów trudno jest zauważyć większe niezgodności.

Obiektyw szerokokątny o ogniskowej 18 mm ma bardzo dużą dystorsję. W modelu dystorsji niezbalansowanej w narożnikach termogramu zniekształcenia obrazu osiągają 35 pikseli, natomiast po zastosowaniu modelu dystorsji zbalansowanej zniekształcenia w narożnikach wynoszą do 17 pikseli. Tak duże wartości dystorsji powodują, że montaż kilku termogramów w jeden obraz nie przynosi dobrych efektów (rys. 10a).

Rozwój technik cyfrowych spowodował, że coraz częściej kilka termogramów łączy się ze sobą, wpasowuje się termogramy w obraz fotograficzny i na termogramach wykonuje się pomiary geometryczne. Nieuwzględnienie wpływu dystorsji obiektywów szerokokątnych może spowodować znaczne błędy w wynikach tych operacji.

Ponieważ dystorsja obiektywu w dużej mierze zależy od jego konstrukcji wnioski z badań można rozszerzyć na inne egzemplarze obiektywów o takiej samej ogniskowej. Dystorsja obiektywów szerokokątnych (krótkoogniskowych) z reguły jest dużo większa niż obiektywów normalno i wąskokątnych. Można się, więc spodziewać, że dystorsja obiektywów o jeszcze węższym niż przebadany obiektyw 36 mm kącie widzenia będzie również nieznaczną.

Praca niniejsza została wykonana w ramach badań statutowych nr AGH 11.11.150.949; 11.11.150.005.

5. Literatura

- [1] Kurczyński Z.: Lotnicze i satelitarne obrazowanie Ziemi – część 1, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2006.
- [2] Wojdon A.: Korekcja dystorsji ze zdjęć poprzez ich powtórne próbkowanie z wykorzystaniem języka Matlab. Praca dyplomowa. AGH Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Kraków 2010.
- [3] Wróbel A.: Badanie dokładności geometrycznej obrazów termograficznych. IV Konferencja Krajowa - Termografia i Termometria w podczerwieni, Łódź 2000.
- [4] Moderhak M.: Poprawa kontrastu termicznego na potrzeby kalibracji kamer dla termicznej stereowizji. PAK vol. 55, nr 11/2009.
- [5] St-Laurent L., Prévost D., Maldague X.: Fast and accurate calibration-based thermal/colour sensors registration. Quantitative Infrared Thermography QIRT 2010, Québec 2010.
- [6] Luhmann T., Ohm J., Piechel J., Roelfs T.: Geometric calibration of thermographic cameras. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII, Part 5, Newcastle 2010.
- [7] Kurczyński Z., Preuss R.: Podstawy fotogrametrii. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003.
- [8] PI-Calib Operation Manual. TOPCON
- [9] Kadłubowski D.: Problem dystorsji kamer termograficznych. Praca dyplomowa. AGH Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Kraków 2011.