

Sławomir ZATOR, Mirosław LASARPOLITECHNIKA OPOLSKA, INSTYTUT ELEKTROWNI I SYSTEMÓW POMIAROWYCH,
ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole**Rekonstrukcja termogramów wysokiej rozdzielczości na podstawie standardowych obrazów termowizyjnych****Dr hab. inż. Sławomir ZATOR**

Profesor na Wydziale Inżynierii Produkcji i Logistyki Politechniki Opolskiej. Autor i współautor ponad 170 publikacji, w tym 2 monografii i 2 książek. Członek Komisji Metrologii i Komisji Elektroniki Oddziału PAN w Katowicach. Jego działalność naukowa obejmuje miernictwo przemysłowe, w tym pomiary przepływów cieczy z wykorzystaniem anemometrii laserowej oraz diagnostykę instalacji i konstrukcji przemysłowych pod kątem ich deformacji z wykorzystaniem hybrydowych technik pomiarowych.

e-mail: s.zator@po.opole.pl

**Mgr inż. Mirosław LASAR**

Absolwent kierunku Informatyka o specjalności Komputerowe Wspomaganie Projektowania. Obecnie doktorant II roku Automatyki i Robotyki na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej. Od roku 2009 blisko współpracuje z Instytutem Elektrowni i Systemów Pomiarowych uczestnicząc w pracach naukowo-badawczych.

e-mail: m.lasar@doktorant.po.opole.pl

**Streszczenie**

W artykule przedstawiono metodę uzyskania termogramów o wysokiej rozdzielczości wykorzystującą sekwencję termogramów przesuniętych podpikselowo. W artykule została opisana metodologia uzyskiwania termogramów. Opisana została użyta aparatura oraz zbudowane stanowisko do uzyskiwania termogramów. Zaprezentowane zostały wyniki jakie uzyskano przy użyciu zastosowanej metody.

Słowa kluczowe: termografia, rozdzielczość, nadrozdzielczość, zniekształcenia.

Reconstruction of high-resolution thermal images on the basis of standard thermal images**Abstract**

This paper presents a method for obtaining high-resolution thermal images based on thermal images of low resolution. A series of low-resolution images was made using the shifted pixels method. In the paper there are described the most common methods for reconstructing high resolution images from low-resolution images. They use transformations in the frequency domain which combine the discrete Fourier transform coefficients of low-resolution images with the continuous Fourier transform of an unknown high-resolution image. There is described and implemented the reconstruction method that uses transformations in space - iterative back-projection. There was constructed a stand for obtaining thermograms. It contains a thermal imaging camera VarioCAM Head placed on precision guiding devices (rotation stage and linear stage). The real-time controller - cRIO 9022 with software written in LabVIEW 2009 is used for control of turntable motors and a linear displacement system. There are given the results obtained with use of the presented method.

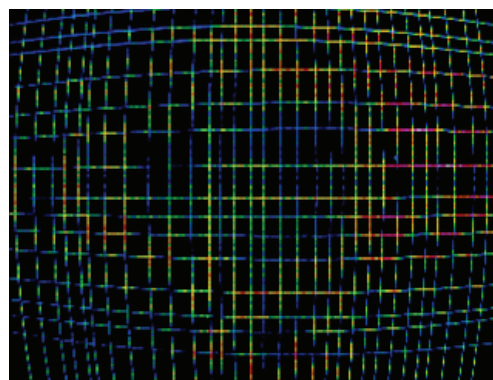
Keywords: thermographs, super-resolution, correction, distortion.

1. Wstęp

W przeciągu ostatnich lat można zaobserwować coraz większe zainteresowanie problemem uzyskiwania obrazów o dużej (High Resolution - HR) rozdzielczości na podstawie obrazów o mniejszej rozdzielczości (Low Resolution - LR). Uzyskiwanie nadrozdzielczości ma aspekty technologiczne i finansowe. Szczegółne znaczenie uzyskiwania obrazów HR występuje w termowizji, której postęp technologiczny w dziedzinie uzyskiwania matrycy FPA osiągnął już swoje możliwości. Obecnie na rynku dostępne są kamery termowizyjne osiągające maksymalną rozdzielczość do 1 MPix. Jedną z firm oferuje kamerę o matrycy 1,3 MPix. Tak wysoką rozdzielczość otrzymano dzięki matrycy kamery zainstalowanej na mikropozycjonerze. Dzięki mikropzesunięciom matrycy o rozdzielczości 320 × 240 pikseli.

Wykorzystując metody generujące obrazy HR należy wstępnie poddać obrazy LR korekcie. Wszystkie obiektywy wprowadzają zniekształcenia geometryczne w postaci dystorsji radialnej -

większej lub mniejszej. Zniekształcenia te są szczególnie widoczne na obiektywie szerokokątnym. Można je te zaobserwować na obiektywie standardowym. Objawiają się one poprzez zniekształcenia obrazu, widoczne zwłaszcza na najbardziej oddalonych od osi optycznych punktach (rys.1). Do korekty obrazów wykorzystano metodę wielomianową, a wyniki działania przedstawiono m.in. w pracy [1].



Rys. 1. Przykładowe zniekształcenia obiektywu szerokokątnego rozdzielczości termogramu 320x240 pikseli

Fig. 1. Wide-angle lens distortion of thermogram 320x240 pixel resolution

2. Rekonstrukcja termogramów HR

Występuje kilka metod otrzymania obrazów HR. Najbardziej popularne metody wykorzystują przekształcenia w dziedzinie częstotliwości. Metody te korzystają z następujących przekształceń [2]:

- przesunięcie transformaty Fouriera,
- aliasingu, czyli relacja pomiędzy dyskretną a ciągłą transformatą Fouriera,
- ograniczenia pasmowego oryginalnego obrazu.

Korzystając z powyższych przekształceń jest możliwe sformułowanie równań, które łączą ze sobą współczynniki dyskretny transformaty Fouriera obrazów o niskiej rozdzielczości z ciągłą transformatą Fouriera nieznanego obrazu wysokiej rozdzielczości, co można zapisać wektorowo przy użyciu równania (1),

$$Y = \Phi X \quad (1)$$

gdzie: Y - wektor kolumnowy dyskretny transformaty Fouriera, X - próbki ciągłej transformaty Fouriera, Φ - relacja pomiędzy zbiorem obrazów LR a obrazów HR.

Rekonstrukcja obrazu HR wymaga określenia macierzy Φ i rozwiązania zadania (1). Jedną z metod rozwiązania jest użycie rekursywnej metody najmniejszych kwadratów [3].

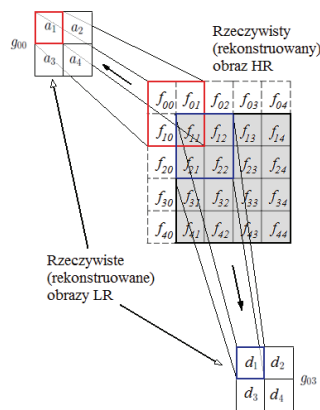
W drugiej grupie metod rekonstrukcji obrazów dużej rozdzielczości wykorzystuje przekształcenia w przestrzeni. Jedną z metod jest iteracyjne wsteczne rzutowanie [4]. Ideę metody zaprezentowano na rys. 2. Metoda wymaga opisanie matematycznego modelu przekształcania obrazu HR (w przetworniku FPA) oznaczonego funkcją $f(x,y)$ i określonej w dziedzinie $S = \{(x,y) \in \mathbf{R}^2, 0 \leq x \leq K\Delta x, 0 \leq y \leq L\Delta y\}$ w obraz LR oznaczony funkcją $g(m,n)$ w dziedzinie $S = \{(m,n) \in M \times N, 1 \leq m \leq M, 1 \leq n \leq N\}$. Ogólnie dysponując i obrazami LR tworzy się układ $i \times M \times N$ równań (2).

$$g_k(m,n) = \sigma_k(h(f(x,y)) + \eta_k(x,y)) \quad (2)$$

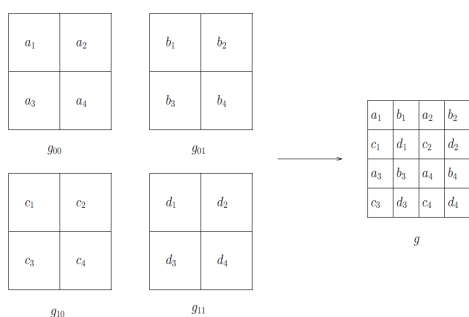
Występuje w nim operator rozmycia h (blurring) oraz nieliniowa funkcja σ_k , która reprezentuje procesy kwantowania i decymacji obrazu w piksel oraz uwzględnia przesunięcie kolejnych obrazów. Podczas procesu akwizycji obrazów występują naturalne szумы i zakłócenia reprezentowane przez funkcję $\eta(x,y)$. Sposób realizacji rozmycia, jako konsekwencja próbkowania, jest źródłem dodatkowych informacji do rekonstrukcji obrazu HR.

Liczba możliwych do utworzenia równań, będących wynikiem realizacji przekształcenia (2) przez przetwornik kolejnych obrazów równomiernie przesuniętych w kierunkach osi X i Y jest mniejsza od liczby występujących zmiennych. Brakujące dane przedstawiono na rys. 2 jako wartości $f_{0,i}$ oraz $f_{i,0}$. Rozwiązywanie takiego układu równań odbywa się metodą iteracyjną przez wyznaczenie minimum funkcji przedstawionej równaniem (3), w którym g_k to oryginalne obrazy uzyskane z kamery, natomiast $g_k^{(n)}$ to kolejne realizacje symulacji działania przetwornika obrazu na kolejnych iteracjach odtwarzanego obrazu HR.

$$e^n = \sqrt{\sum_k \sum_{(m,n)} (g_k(m,n) - g_k^{(n)}(m,n))^2} \quad (3)$$



Rys. 2. Przekształcenia obrazu rzeczywistego (oraz rekonstruowanego HR w kolejnych iteracjach) w obrazy LR
 Fig. 2. Transformations of real and reconstructed HR images to LR images



Rys. 3. Tworzenie macierzy obserwacyjnej HR
 Fig. 3. Construction of the observed high-resolution image

Brakujące dane uzupełniają się różnymi metodami [5]. Zakłada się, że poza analizowanym obszarem funkcja f jest okresowa, symetryczna lub zerowa. Tworzenie macierzy obserwacyjnej obrazu HR z sekwencji LR przedstawiono na rys. 3.

Aby uzyskać obraz lepszy od macierzy obserwacyjnej g należy uwzględnić działanie uśredniające w każdym pikselu, które dla przetworników w macierzy FPA można opisać równaniem (4).

$$g(m,n) = \frac{1}{\Delta x \Delta y} \int_{x-\Delta x}^x \int_{y-\Delta y}^y f(x,y) dx dy + \eta(m,n) \quad (4)$$

Przetwornik A/C macierzy FPA kamery termowizyjnej odpowiada przetwornikowi 14 bitowemu, stąd w równaniu (4) nie zamodelowano kwantowania, ponieważ rozdzielczość kamery (0,08 K) jest wielokrotnie mniejsza od najmniejszej możliwej do uzyskania niepewności pomiaru temperatury (2 K).

Zakładając funkcję h realizowaną przez przetwornik, sprawdza się jakość rekonstrukcji porównując oryginalny obraz wysokiej rozdzielczości z obrazem zrekonstruowanym, przy użyciu wskaźnika błędu PSNR oceniającego efektywność rekonstrukcji obrazu. Stosowane metody są złożone obliczeniowo, a czasy potrzebne do uzyskania zadowalającego efektu są stosunkowo długie [5].

Proponuje się pewną modyfikację, w którym brakujące dane, w postaci $K+L+1$ równań, uzupełniane są w oparciu o znany a priori fragment termogramu, co można uzyskać przez umieszczenie w scenie obiektu o znanej temperaturze, geometrii oraz orientacji względem kamery.

Ze względów obliczeniowych najkorzystniej byłoby dysponować informacją o temperaturze na krawędziach termogramu. W analizowanej metodzie (z równomiernie przesuniętymi obrazami o $1/J$ piksela) niezbędna jest również informacja o kątach przesunięć kamery pomiędzy kolejnymi obrazami. Chcąc uzyskać prostą postać równań opisujących przekształcenie obrazu LR w HR korzystne jest, aby przesunięcie kątowe kolejnych obrazów wynosiło $1/N$ szerokości kątowej piksela obrazu. Takie założenie pozwala na rozwiązanie lokalnie układu równań rozpoczynając od miejsca, w którym temperatury są znane a priori. Dla macierzy 320×240 pikseli należy określić temperaturę dla 561 co stanowi 0,73% powierzchni obrazu. Przy wykonywaniu sekwencji 4 termogramów przesuniętych o $1/2$ piksela obrazu, w kierunku obu osi X i Y , można utworzyć dla każdego sąsiadujących ze sobą 9 pikseli rekonstruowanego obrazu układ 4 równań, w którym dane o przynajmniej 5 z nich muszą być znane. Dla przykładu pokazanego na rys. 2, jeśli znane będą wartości f_{0i} oraz f_{i0} , to wówczas zakładając działanie przetwornika opisanie równaniem (4) można dla fragmentu obrazu o przekątnej $f_{00}-f_{22}$ zapisać układ równań, z którego można bezpośrednio wyznaczyć poszukiwane wartości.

$$\begin{aligned} f_{11} &= 4a_1 - f_{00} + f_{01} + f_{10} \\ f_{12} &= 4b_1 - f_{01} + f_{02} + f_{11} \\ f_{21} &= 4c_1 - f_{10} + f_{20} + f_{11} \\ f_{22} &= 4d_1 - f_{11} + f_{12} + f_{21} \end{aligned} \quad (5)$$

Postępując analogicznie, kontynuując obliczenia dla kolejnych kolumn i wierszy wyznaczyć można wszystkie brakujące wartości rekonstruowanej macierzy f . Nakład obliczeniowy wymaga wykonania $J^2 \times M \times N$ działań opisanych jednym z równań (5). Jeśli przyjmie się zerowe wartości f_{0i} oraz f_{i0} to rozwiązanie należy uzyskać metodą iteracyjną.

3. Aparatura i aplikacja systemu pomiarowego

Aparatura pomiarowa składała się z kamery termowizyjnej VarioCAM Head o rozdzielczości macierzy 320×240 pikseli charakteryzującej się czułością 0,08 K. Niepewność pomiarów wynosi 2 K przy zakresie pomiaru od -40°C do 120°C . Kamera może pracować w temperaturze otoczenia od -15°C do 50°C i wyposażona jest w trzy obiektywy:

- standardowy (ogniskowa $f=25$ mm, kąt widzenia $32^\circ \times 25^\circ$),

- szerokokątny (ogniskowa $f=12,5$ mm, kąt widzenia $64^\circ \times 50^\circ$),
- teleobiektyw (ogniskowa $f=100$ mm, kąt widzenia $8^\circ \times 6^\circ$).

Sterowniki silników krokowych P70530 oraz moduły NI9512 pozwalają na uzyskanie rozdzielczości 51200 kroków na obrót silnika o kroku $1,8^\circ$. Kamera została ona zainstalowana na obrotnicach sterowanych silnikami krokowymi firmy Thorlabs.

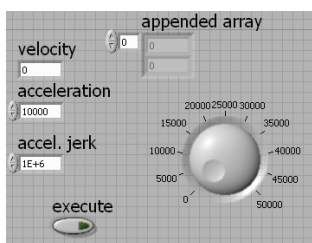
Dzięki tak precyzyjnym urządzeniom możliwe było obracanie kamery z rozdzielczością 0,35 sekundy kątowej, przy rozdzielczość kątowej pojedynczego piksela kamery wynoszącej 6 minut kątowych. Kolejnym precyzyjnym urządzeniem wykorzystywanym w projekcie była platforma przesuwna NRT100 o długości 100mm i rozdzielczości 2 μm . Platforma umożliwiła przesunięcie ogniskowej obiektywu kamery do osi obrotu obrotnicy. Na rys. 4 przedstawiono zdjęcie obrotnicy NR360S umieszczonej na platformie przesuwnej NRT100. Połączenie dwóch obrotnic pozwala na obracanie kamerą w dwóch osiach.



Rys. 4. Obrotnica NR360S na platformie przesuwnej NRT100 firmy Thorlabs
Fig. 4. Rotation stage NR360S on linear stage NRT100 - Thorlabs Company

Do sterowania silnikami obrotnic oraz układu przesuwu liniowego wykorzystano system czasu rzeczywistego cRIO 9022 z oprogramowaniem napisanym w środowisku LabVIEW 2009.

Na rysunku 5 przedstawiono fragment aplikacji, która przedstawia panel sterowania jedną z osi silnika krokowego, w którym ustalana jest wielkość pojedynczego kroku.



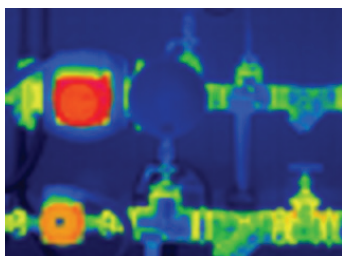
Rys. 5. Okno dialogowe sterowania pracą silnika krokowego
Fig. 5. Dialog box for stepper motor control

Obliczenia numeryczne rekonstrukcji obrazu, podobnie jak sterowanie silnikami, zrealizowano w środowisku LabVIEW.

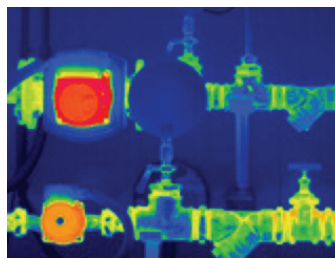
4. Wyniki badań

Na rys. 6a przedstawiono jeden z 4 termogramów niskiej rozdzielczości wykonany kamerą termowizyjną z obiektywem $32^\circ \times 25^\circ$. Na rys. 6b przedstawiono wynik rekonstrukcji obrazu HR, natomiast rys. 6c przedstawia termogram HR uzyskany ze złożenia 4 termogramów wykonanych kamerą z obiektywem $8^\circ \times 6^\circ$ metodą opisaną w pracy [1].

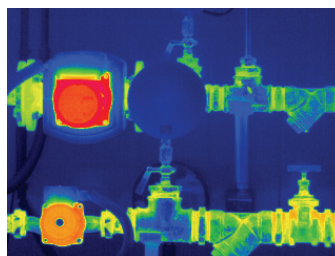
a)



b)



c)



Rys. 6. Uzyskane wyniki a) jeden z 4 termogramów LR b) odtworzony termogram HR c) oryginalny termogram HR

Fig. 6. The results obtained a) one of 4 thermograms LR b) reconstructed thermogram HR c) original thermogram HR

W proponowanej metodzie wskazane jest korzystanie z termogramów uśrednionych dla każdej z pozycji skanera, tak aby przynajmniej niepewności typu A pomiaru temperatury zminimalizować.

5. Wnioski

Zaproponowana metoda rekonstrukcji obrazów wysokiej rozdzielczości z obrazów o niskiej rozdzielczości wymaga stosowania precyzyjnej obrotnicy, tak aby uzyskać sekwencje J^2 obrazów równomiernie przesuniętych w osiach X i Y o znany kąt odpowiadający $1/J$ piksela obrazu w każdym z kierunków. System jest dedykowany dla przetworników FPA kamer termowizyjnych, w których można wstawić w badaną scenę obiekt o znanej temperaturze, geometrii i położeniu względem kamery. Uzyskane termogramy nie mają tak dobrej rozdzielczości jak przy wykorzystaniu obrotnicy i teleobiektywu, lecz są one wyraźnie lepsze od termogramu o podstawowej rozdzielczości kamery.



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Stypendia doktoranckie - inwestycja w kadre naukowe województwa opolskiego współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.

6. Literatura

- [1] Zator S., Lasar M.: Uzyskiwanie termogramów wysokiej rozdzielczości, PAK 2011 nr 12, s. 1480-1482.
- [2] Park S.C., Park M.K., Kang M.G.: Super-Resolution Image Reconstruction, IDE Signal Processing Magazine, vol.20, 2003, s. 21-36.
- [3] Bose N.K., Kim H.C., Velenzuela H.M.: Recursive implementation of total least squares algorithm for image reconstruction from noisy, undersampled multiframes, IEEE Conference Acoustic, Speech and Signal Processing, Mineapolis 1993.
- [4] Irani M., Peleg S.: Improving Resolution by Image Registration, Graphical Models and Image Processin, Vol. 53, 1991, s. 231-239.
- [5] Chan R.H., Chan T.F., Shen L., Shen Z.: Wavelet algorithms for high-resolution image reconstruction, J. Sci. Comp. Vol 24, No 4, pp. 1408-1432.