

**REKONSTRUKCJA SCEN TERMALNYCH
W AUTORSKIM PROGRAMIE VISION PLUS 3D***

**RECONSTRUCTION OF THERMAL SCENES IN THE AUTHORS'
SOFTWARE, VISION PLUS 3D**

Piotr Sawicki¹, Sławomir Zwolenik², Sebastian Grabowski²

¹Katedra Fotogrametrii i Teledetekcji, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie
²neoVision, Łódź

SŁOWA KLUCZOWE: obraz wizyjny, obraz termalny, scena 3D, metoda DLT, rekonstrukcja 3D, emisyjność kierunkowa

STRESZCZENIE: Praca przedstawia algorytm rekonstrukcji 3D scen termalnych w celu korekcji emisyjności kierunkowej, który został zaimplementowany w autorskim programie „Vision Plus 3D”. Wyznaczenie orientacji cyfrowych obrazów wizyjnych i termalnych oraz położenia rejestrowanego obiektu w przestrzeni 3D realizuje zastosowana w programie metoda bezpośredniej transformacji liniowej DLT (*Direct Linear Transformation*). Opracowany program „Vision Plus 3D” obsługuje różne formaty rastrowe. Zapis i import danych pomiarowych oraz narzędzi jest wykonywany w plikach w formacie XML. Interaktywny, równoczesny pomiar na obrazach cyfrowych punktów i zdefiniowanych obiektów geometrycznych wspomagany jest dodatkowymi funkcjami obsługi oraz algorytmami automatyzującymi pomiar. Aplikacja jest funkcjonalnie powiązana z platformą bazowego cyfrowego systemu wideo-termalnego „Vision Plus”, zewnętrzną biblioteką „Vision” oraz dodatkowym modulem „Vision Plus Thermal Analyst”. „Vision Plus 3D” jest obiektem, 32-bitową aplikacją Windows, oprogramowaną w języku Object Pascal przy wykorzystaniu pakietu Borland Developer Studio. Opracowany program tworzy nowe możliwości analizy, pomiaru oraz zaawansowanego przetwarzania cyfrowych obrazów wizyjnych i termalnych. W pracy przedstawiono eksperyment rekonstrukcji 3D sceny termalnej dla powierzchni nachylonej za pomocą programu „Vision Plus 3D”. Na podstawie otrzymanych danych obliczony został kąt między wektorem normalnym do zdefiniowanej płaszczyzny obiektu oraz osią optyczną kamery termalnej. Wyznaczenie średniej temperatury radiacyjnej oraz korekcję temperatury metodą korekcji emisyjności kierunkowej w zdefiniowanym obszarze termogramu przeprowadzono w aplikacji „Vision Plus Thermal Analyst”.

1. WPROWADZENIE

Metoda korekcji emisyjności kierunkowej (Sawicki *et al.*, 1998; Sawicki *et al.*, 1999; Więcek *et al.*, 1998) bazuje na analitycznej rekonstrukcji 3D sceny termalnej i korekcji temperatury na cyfrowych termogramach ze względu na nachylenie płaszczyzny obiektu w stosunku do płaszczyzny sensora termalnego. Metoda ta została opracowana w 1998 r. przez zespół w składzie P. Sawicki, R. Stein, S. Zwolenik, B. Więcek w ramach projektu badawczego KBN 9T12E01808 i następnie testowana w projekcie KBN 4T12E003 26.

Moduł rekonstrukcji 3D sceny termalnej do korekcji emisyjności kierunkowej zaimplementowany w dotychczasowej wersji cyfrowego multisensoralnego systemu wideo-termalnego „Vision Plus” (Sawicki, 1999; Sawicki, 2000; Sawicki, Więcek, 1998) okazał się w praktyce niedostatecznie funkcjonalny, ze względu na potrzeby współczesnego użytkownika. Z tego powodu opracowano zupełnie nowy, niezależny program o nazwie „Vision Plus 3D”, który funkcjonalnie powiązany został ze środowiskiem bazowego pakietu „Vision Plus”. W trakcie opracowania nowego programu autorzy uwzględnili dotychczasowe doświadczenia wynikające z użytkowania jego pierwszej wersji oraz współczesną wiedzę z zakresu programowania obiektowego.

2. ALGORYTM POMIARÓW I REKONSTRUKCJI 3D SCENY TERMALNYCH DO KOREKCJI EMISYJNOŚCI KIERUNKOWEJ

Rekonstrukcja trójwymiarowa sceny termalnej polega na wyznaczeniu parametrów orientacji sensora termalnego oraz współrzędnych przestrzennych X, Y, Z punktów rejestrowanego obiektu w przyjętym układzie współrzędnych. Rozwiązanie analityczne wykonywane jest na podstawie pomiaru co najmniej dwóch obrazów wizyjnych (rejestracja w zakresie widzialnym aparatem lub kamerą cyfrową) i jednego obrazu termalnego (rejestracja w zakresie podczerwieni termalnej kamerą termowizyjną) oraz określonego minimum informacji trójwymiarowych o obiekcie.

Wyznaczenie orientacji zdjęć wizyjnych i termalnych oraz pozycjonowanie 3D punktów obiektu realizowane jest metodą przekształcenia rzutowego, tzw. metodą bezpośredniej transformacji liniowej DLT (*Direct Linear Transformation*) (Luhmann, 2003). Dla każdego zdjęcia pomiarowego wyznaczane zostają współczynniki $L_1 \div L_{11}$ transformaty DLT i na ich podstawie elementy orientacji wewnętrznej (c_{Kx} , c_{Ky} , x'_0 , y'_0 – wyrażone w pikselach) oraz zewnętrznej (ω_i , ϕ_i , κ_i , X_{0i} , Y_{0i} , Z_{0i}). W drugim etapie rozwiązania metodą DLT, na podstawie obliczonych parametrów transformacji, następuje przez przekształcenie odwrotne estymacja współrzędnych X, Y, Z punktów obiektu. Znajomość położenia punktów w przestrzeni sceny 3D pozwala na wyznaczenie kąta nachylenia rejestrowanej płaszczyzny obiektu względem płaszczyzny detektora termalnego.

Opracowany algorytm rekonstrukcji 3D sceny termalnej (Rys. 1), który stanowi sekwencję pomiarów i obliczeń fotogrametrycznych, został zaimplementowany w programie „Vision Plus 3D”.

2.1. Korekcja emisyjności kierunkowej

W przypadku korekcji emisyjności kierunkowej (1) (Sawicki *et al.*, 1998; Sawicki *et al.*, 1999; Więcek *et al.*, 1998), na podstawie pomiarów i danych otrzymanych w aplikacji „Vision Plus 3D”, obliczony zostaje w programie „Vision Plus Thermal Analyst” kąt φ między wektorem normalnym do zdefiniowanej płaszczyzny obiektu oraz wektorem normalnym do płaszczyzny sensora termalnego (oś optyczna kamery termalnej).

$$\Phi_0 = \frac{\Phi_\alpha}{\cos\varphi} \quad (1)$$

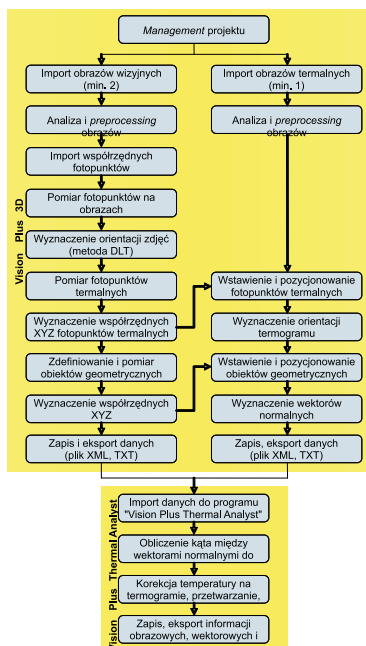
Następnie wyznaczana jest średnia temperatura radiacyjna oraz korekcja wartości temperatury (2) na obszarach termogramu, które są zdefiniowane obiektami geometrycznymi.

$$T = \sqrt[4]{\frac{T_0^4 - T_a^4}{\cos\varphi} + T_a^4} \quad (2)$$

gdzie:

T_0, T_a oznaczają odpowiednio temperaturę mierzoną przez kamerę termalną i temperaturę otoczenia.

Algorytm etapu opracowania termowizyjnego w programie „Vision Plus Thermal Analyst” przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Algorytm rekonstrukcji 3D sceny termalnej oraz korekcji emisyjności kierunkowej.

3. CHARAKTERYSTYKA I FUNKCJONALNOŚĆ PROGRAMU VISION PLUS 3D

Opracowany algorytm analitycznego wyznaczenia parametrów orientacji zdjęć wizyjnych i termalnych oraz określenia położenia rejestrowanych obiektów w przestrzeni 3D (Rys. 1), w celu dalszej korekcji termogramów ze względu na emisyjność kierunkową, realizuje program „Vision Plus 3D”. Aplikacja posiada następujące cechy użytkowe:

- import i obsługa różnych formatów rastrowych,
- łączny pomiar cyfrowych obrazów wizyjnych i termalnych,
- implementacja metody DLT (*Direct Linear Transformation*),
- analityczna rekonstrukcja 3D sceny termalnej w celu korekcji emisyjności kierunkowej,
- funkcjonalne powiązanie ze środowiskiem bazowego systemu „Vision Plus”,
- powiązanie z zewnętrzną biblioteką „Vision” (Sawicki, Zwolenik, 2007),
- powiązanie z dodatkowym modułem „Vision Plus Thermal Analyst” (Sawicki, Zwolenik, 2007),
- funkcjonalny i przyjazny interfejs użytkownika.

Opracowana aplikacja „Vision Plus 3D” umożliwia import oraz obsługę formatów rastrowych: BMP, TIFF (mono 8 i 16 bit, kolor), JPEG (łącznie z dodatkowymi informacjami typu EXIF, zapisywanymi w pliku przez sensory optyczno-elektroniczne), PNG (mono 8 i 16 bit, kolor) z kompresją bezstratną, DCR (Kodak), TVV i SIS (system „Vision Plus”). Dla większości tych formatów zaimplementowano dodatkowo procedury pozwalające na zapis obrazu w danym formacie. W praktyce, ten zestaw plików pozwala na obsługę obrazów w skali szarości i kanałach R, G, B o głębi bitowej większej niż 8 bit/piksel. Strukturę dostępnego oprogramowania zmodyfikowano tak, że w przypadku zgodności typu piksela możliwy jest bezpośredni zapis informacji obrazowej między różnymi formatami.

Rozszerzoną funkcjonalność programu „Vision Plus 3D” charakteryzują następujące podstawowe cechy:

- funkcja *Zoom* dla obrazów wizyjnych i termalnych,
- interpolacje cyfrowe,
- funkcja *Properties*,
- algorytmy automatyzujące tryb pomiaru,
- import i eksport danych w plikach TXT oraz XML,
- skróty klawiszowe i aktywny przycisk myszy.

Obsługę obrazów cyfrowych wspomagają dodatkowe funkcje, m.in.: *Zoom* (stopniowa i ciągła zmiana powiększenia obrazu), interpolacje cyfrowe (najbliższego sąsiada, biliniowa, bikubiczna) oraz *Properties* (informacje o obrazach cyfrowych oraz obiektach geometrycznych).

Program „Vision Plus 3D” umożliwia na wizyjnych oraz termalnych obrazach cyfrowych interaktywny, manualny pomiar punktów i obiektów geometrycznych typu: odcinki, linie łamane, wieloboki. Przenoszenie i nakładanie obiektów geometrycznych dostosowano pod względem grafiki oraz funkcjonalności do techniki wektorowych pomiarów fotogrametrycznych.

W programie „Vision Plus 3D” zastosowano algorytmy automatyzujące pomiar obiektów geometrycznych na obrazach cyfrowych, m.in. przez:

- wyznaczanie przybliżonego położenia punktów pomiarowych na kolejnych niezorientowanych obrazach,
- przenoszenie obiektów geometrycznych między obrazami,
- automatyczne wstawianie obiektów geometrycznych do pozostałych zorientowanych obrazów,
- pomiar oraz eksport danych pikselowych za pomocą zestawu narzędzi wektorowych,
- grupowanie danych definiujących całą scenę pomiarową w ramach pełnych projektów.

W aplikacji „Vision Plus 3D” dane pomiarowe i narzędzia można zapisywać oraz importować w plikach w formacie XML. Zastosowanie formatu XML zapewniło właściwe relacje pomiędzy danymi, przenoszenie narzędzi i danych pomiędzy współpracującymi programami oraz umożliwiło podgląd danych w przeglądarkach internetowych i edycję parametrów przy pomocy właściwego edytora. Dzięki temu rozwiązaniu istotnie zwiększono uniwersalność oraz kompatybilność programów pakietu „Vision Plus”.

Program „Vision Plus 3D” posiada przejrzysty interfejs graficzny użytkownika, którego optymalizacja pozwoliła na zmniejszenie pracochłonności edycji pomiarów i projektów. Program jest funkcjonalny i przyjazny dla użytkownika dzięki, m.in. zastosowaniu skrótów klawiszowych i aktywnego prawego przycisku myszy, które znacznie przyspieszają pomiar oraz dostęp do większości funkcji i poleceń.

Opracowany program jest w pełni obiektową, 32-bitową aplikacją Windows. Poszczególne elementy oprogramowania wykonano głównie w języku Object Pascal, przy wykorzystaniu pakietu Borland Developer Studio.

4. OPRACOWANIE TESTOWE

Testowanie programu „Vision Plus 3D” do trójwymiarowej rekonstrukcji sceny termalnej oraz określenie, na podstawie uzyskanych danych, wpływu korekcji emisyjności kierunkowej przeprowadzono na podstawie wizyjnych zdjęć cyfrowych i termalnych przestrzennego pola testowego. Pole testowe tworzyły równomiernie rozmieszczone sygnalizowane punkty, w tym fotopunkty i fotopunkty termalne (termalne punkty dostosowania) oraz obiekt testowy mierzony kamerą termowizyjną.

Wyznaczenie położenia obiektu i sygnalizowanych fotopunktów termalnych do rekonstrukcji 3D sceny termalnej przeprowadzono na podstawie trzech obrazów cyfrowych, które wykonano aparatem typu *compact* Kodak DC 4800 (3.1 MP).

Rejestrację termowizyjną obiektu testowego (arkusz blachy z powłoką mineralną, o powierzchni ca 0.25 m²), nachylonego pod kątem $\omega = 6.5^\circ$ (płaszczyzna referencyjna, w przybliżeniu równoległa do płaszczyzny detektora termalnego) oraz w kolejnej fazie pomiarów, nachylonego pod kątem $\omega = 60^\circ$, wykonano kamerą termalną AGEMA 880, która była połączona interfejsem PCMCIA z cyfrowym systemem video-termalnym „Vision Plus”.

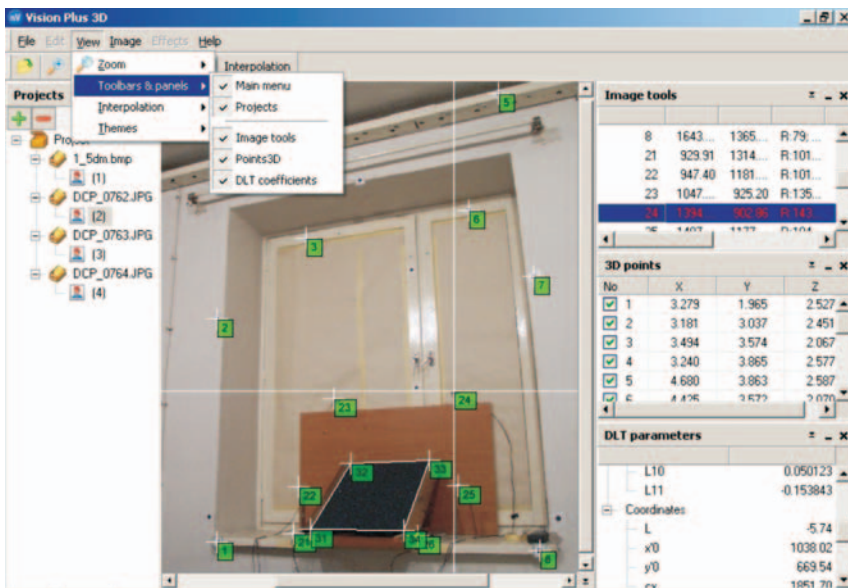
Parametry rejestracji termowizyjnej wynosiły odpowiednio: zakres spektralny rejestracji 8÷12 μm , zakres mierzonej temperatury (*Range 2*) $\Delta T = 20.98 \div 23.45^\circ\text{C}$, śred-

nia temperatura otoczenia $T_{0\text{sr}} = 21.0^{\circ}\text{C}$ (pomiar termometrem elektronicznym). Obiekt testowy zarejestrowano w każdym położeniu w sekwencji *Real Time*, składającej się z 16. obrazów, które zapisano w formacie TVV. Ze względu na możliwe szумы kamery termowizyjnej obrazy termalne do wyznaczenia emisyjności kątowej należy rejestrować w serii min. 4 kolejnych obrazów.

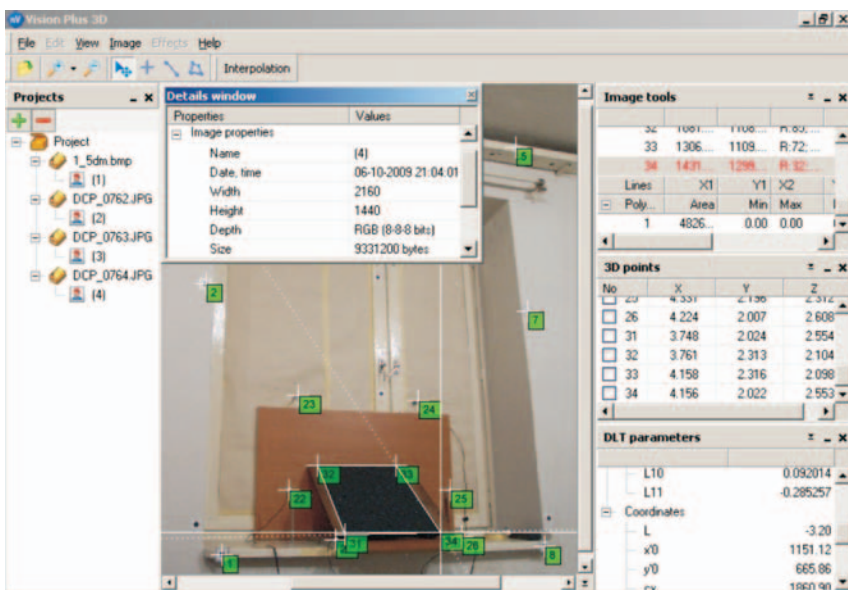
Badania testowe wykonano zgodnie z opracowanym algorytmem rekonstrukcji scen 3D do korekcji emisyjności kierunkowej (Rys. 1), realizując w programie „Vision Plus 3D” pomiar cyfrowych obrazów wizyjnych (Rys. 2, 3) i termalnego (Rys. 4) oraz w programie „Vision Plus Thermal Analyst” (Rys. 5) pomiar i przetwarzanie cyfrowego termogramu.

Korekcję temperatury radiacyjnej (Lillesand *et al.*, 2008) w zdefiniowanym obszarze, ze względu na kąt φ między wektorem normalnym do płaszczyzny obiektu oraz wektorem normalnym do płaszczyzny sensora termalnego, przeprowadzono w programie „Vision Plus Thermal Analyst”. Korekcja temperatury na powierzchni badanego materiału wzniosła ca $\Delta T_{\text{sr}} = +0.2^{\circ}\text{C}$. Zdolność interpretacyjna termogramów w postaci wielotonalnej czarno-białej, wizualizowanych i mierzonych w programie „Vision Plus Thermal Analyst”, została zwiększona przez zastosowanie odpowiednio dobranej palety barw.

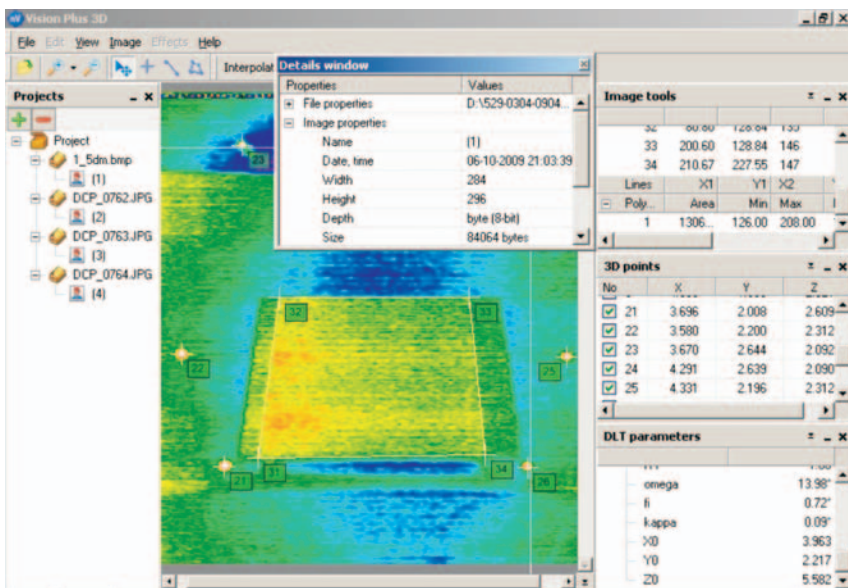
Porównanie średniej temperatury T_{sr} pomierzonej na termogramie po korekcji (płaszczyzna nachylona, kąt $\omega = 60^{\circ}$) z temperaturą na termogramie referencyjnym (płaszczyzna nachylona, kąt $\omega = 6.5^{\circ}$) wykazało skuteczność zastosowanej metody. Średnie temperatury w obszarze wieloboku różniły się w nieistotny sposób. Wizualna ocena



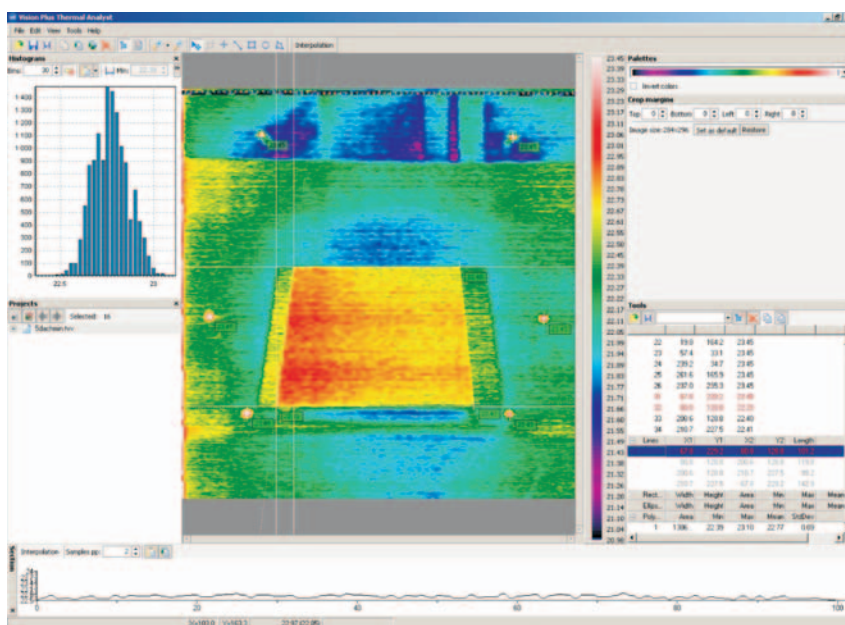
Rys. 2. Okno programu „Vision Plus 3D” z obrazem wizyjnym podczas pomiaru fotopunktów, fotopunktów termalnych i zdefiniowanego obiektu.



Rys. 3. Okno programu „Vision Plus 3D” z obrazem wizyjnym podczas pomiaru zdefiniowanego obiektu (wielobok po jego automatycznym wstawieniu).



Rys. 4. Okno programu „Vision Plus 3D” z obrazem termalnym podczas pomiaru obiektu (po jego automatycznym wstawieniu).



Rys. 5. Okno programu „Vision Plus Thermal Analyst” z termogramem po korekcji temperatury w zdefiniowanym obszarze obiektu.

rozkładu i wartości temperatur potwierdziła ten wniosek. Zmiana rozkładu i położenia pikseli o temperaturze ca $T = 23^{\circ}\text{C}$ (wizualizowane w kolorze czerwonym) na termogramie po korekcji w stosunku do termogramu referencyjnego wynika ze zniekształcenia perspektywicznego obrazu termowizyjnego.

Weryfikację poprawności korekcji emisyjności kierunkowej przeprowadzono w programie „Vision Plus Thermal Analyst” na podstawie bezpośrednich pomiarów na pierwotnych (nieprzetworzonych) termogramach. Pomierzone średnie temperatury radiacyjne wynosiły odpowiednio $T_{\text{sr}} = 22.80^{\circ}\text{C}$ (płaszczyzna prawie pionowa, $\omega = 6.5^{\circ}$) oraz $T_{\text{sr}} = 22.64^{\circ}\text{C}$ (płaszczyzna nachylona, $\omega = 60.0^{\circ}$).

5. WNIOSKI

Rekonstrukcja trójwymiarowa scen termalnych ma na celu wyznaczenie parametrów orientacji sensora termalnego oraz współrzędnych przestrzennych X, Y, Z punktów rejestrowanego obiektu w przyjętym układzie współrzędnych. W następnym etapie możliwa jest korekcia emisyjności kierunkowej ze względu na nachylenie płaszczyzny obiektu w stosunku do płaszczyzny sensora termalnego.

Algorytm rekonstrukcji 3D scen termalnych w celu korekcji emisyjności kierunkowej zastosowano w autorskiej aplikacji „Vision Plus 3D”. Rozwiązanie analityczne opar-

to na zaimplementowanej metodzie bezpośredniej transformacji liniowej DLT (*Direct Linear Transformation*). Program jest funkcjonalnie powiązany i kompatybilny z platformą bazowego cyfrowego systemu wideo-termalnego „Vision Plus”, zewnętrzną biblioteką „Vision” oraz dodatkowym modułem „Vision Plus Thermal Analyst”. Charakteryzuje się uniwersalnością, funkcjonalnością i przyjaznym dla użytkownika interfejsem graficznym. Jest obiektową, 32-bitową aplikacją Windows, oprogramowaną w języku Object Pascal przy wykorzystaniu pakietu Borland Developer Studio. Program „Vision Plus 3D” tworzy nowe możliwości analizy, pomiaru oraz zaawansowanego przetwarzania cyfrowych obrazów wizyjnych i termalnych.

Wykonana rekonstrukcja 3D sceny termalnej badanego obiektu testowego (arkusz blachy z powłoką mineralną) potwierdziła funkcjonalność programu „Vision Plus 3D” oraz skuteczność korekcji temperatury radiacyjnej dla płaszczyzn nachylonych w stosunku do płaszczyzny sensora termalnego.

Metoda korekcji emisyjności kątowej może być zawodna, szczególnie w odniesieniu do materiałów i powierzchni chropowatych o dużej emisyjności, ponieważ w takim przypadku emisyjność zależy w niewielkim stopniu od kąta.

6. LITERATURA

Lillesand T.M., Kiefer R.W., Chipman J.W., 2008. *Remote Sensing and Image Interpretation*. 6th Edition. John Wiley & Sons, New York, s. 354-363.

Luhmann T., 2003. *Nahbereichsphotogrammetrie - Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. Wichman Verlag, Heidelberg.

Sawicki P., 1999. Opracowanie obrazów cyfrowych w systemie video-termalnym Vision Plus. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 9, s. 155-165.

Sawicki P., 2000. Digital multisensoral video-thermal system for close range metrology applications. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIII Part B5/2, Com. V, s. 691-698.

Sawicki P., Stein R., Więcek B., 1998. Rekonstrukcja sceny trójwymiarowej do korekcji emisyjności kierunkowej. *Elektronika - Prace Naukowe Politechniki Łódzka*, Zeszyt 3, s.131-146.

Sawicki P., Stein R., Więcek B., 1999. Directional emissivity correction by photogrammetric 3D object reconstruction. [w:] Balageas D., Busse G., Carlomango C.M. (red.), *Quantitative InfraRed Thermography 4, Eurotherm Seminar 60, QIRT'98*, Łódź, Poland, s. 327-332.

Sawicki P., Więcek B., 1998. Cyfrowy system video termalny dla aplikacji w bliskim zasięgu. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 8, s.13/1-13/8.

Sawicki P., Zwolenik S., 2007. Przetwarzanie cyfrowych obrazów wizyjnych i termalnych w autorskim programie Vision Plus v. 2006. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 17b, s. 739-748.

Więcek B., Sawicki P., Stein R., 1998. Directional Emissivity Correction in Thermal and Visual Systems. *The American Society for Nondestructive Testing, Inc. Columbus Ohio*, (red.) Xavier P.V. Maldague, s. 351-356.

RECONSTRUCTION OF THERMAL SCENES IN THE AUTHORS' SOFTWARE, VISION PLUS 3D

KEY WORDS: video image, thermal image, scene 3D, DLT method, 3D reconstruction, directional emissivity

SUMMARY: The paper presents an algorithm for 3D reconstruction of thermal scenes for the purposes of directional emissivity correction, which was implemented in the authors' software „Vision Plus 3D”. Determination of the orientation of images (visual and thermal) and the position of a recorded object in 3D space is enabled by the Direct Linear Transformation method used in the application. „Vision Plus 3D” software works with various raster formats. Saving and importing of measurement data as well as of tools is executed using XML format files. Interactive, simultaneous measurement of points and defined geometrical objects from digital images is supported by additional functions and algorithms, which automate the measurement. The application is functionally related to the „Vision Plus” digital video-thermal basic system platform, the „Vision” external library and the „Vision Plus Thermal Analyst” additional module. „Vision Plus 3D” is a 32-bit Windows object application, programmed in Object Pascal language using the Borland Developer Studio package. This software opens new possibilities for analysis, measurement and advanced processing of visual and thermal digital images. The paper presents experimental reconstruction of the 3D thermal scene of a sloping surface using the „Vision Plus 3D” application. The angle between a normal vector of a defined plane and the optical axis of the thermal camera is calculated based on the data received. The calculation of average radiant temperature as well as a temperature correction in the defined area of the thermal image using the directional emissivity correction method were both carried out in „Vision Plus Thermal Analyst” module.

dr inż. Piotr Sawicki
piotr.sawicki@geodezja.pl
telefon: +48 89 5233282
fax: +89 5233210

mgr inż. Sławomir Zwolenik
zwolenik@neovision.pl
telefon: +48 42 6573033

mgr inż. Sebastian Grabowski
sebastiang@neovision.pl
telefon: +48 42 6573033

* wersja kolorowa artykułu jest dostępna na stronie <http://www.sgp.geodezja.org.pl/ptfit>