

Marek PISZCZEK, Marcin KOWALSKI, Radosław RYNIEC

WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA, INSTYTUT OPTOELEKTRONIKI,
ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

Stanowisko do modelowania hybrydowego**Dr inż. Marek PISZCZEK**

Jest absolwentem Wojskowej Akademii Technicznej (w 1995 r. ukończył studia na Wydziale Elektroniki). Od 2003 r. jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym Instytutu Optoelektroniki WAT. Jego zainteresowania naukowe obejmują między innymi problemy z zakresu inżynierii informacji obrazowej. Do ważniejszych zagadnień, którymi się zajmuje należą opracowania dotyczące adaptacji techniki obrazowej do celów informacyjno-pomiarowych.



e-mail: mpiszczek@wat.edu.pl

Mgr inż. Radosław RYNIEC

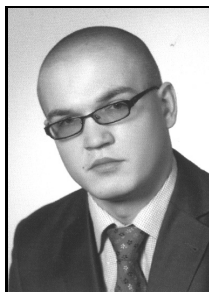
Jest absolwentem Wojskowej Akademii Technicznej (w 1999 r. ukończył studia na Wydziale Elektroniki). Od 2005 r. jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym Instytutu Optoelektroniki WAT. Jego zainteresowania naukowe obejmują między innymi problemy z zakresu metod automatycznego rozpoznawania wzorców. Do ważniejszych zagadnień, którymi się zajmuje należą opracowania dotyczące klasyfikacji sygnałów spektralnych w systemach zdalnej detekcji.



e-mail: rryniec@wat.edu.pl

Mgr inż. Marcin KOWALSKI

Marcin Kowalski - Jest absolwentem Wojskowej Akademii Technicznej (w 2010 r. ukończył studia na Wydziale Elektroniki, specjalność Optoelektronika). Od 2011 r. jest pracownikiem Instytutu Optoelektroniki WAT. Jego zainteresowania naukowe obejmują między innymi problemy z zakresu przetwarzania obrazów oraz zobrazowania.



e-mail: mkowalski@wat.edu.pl

Streszczenie

Znajomość parametrów energetycznych sceny pomiarowej stanowi bardzo często kluczowy element w pomiarach. Stanowisko hybrydowe, dzięki wykorzystaniu kamer wizyjnych oraz podczerwieni, jest w stanie wyznaczyć trójwymiarowy termalny model obiektów sceny pomiarowej. Dane te można wykorzystywać do modelowania rozkładu energetycznego obiektów.

Słowa kluczowe: przetwarzanie obrazu, modelowanie hybrydowe, fantom termalny.

Hybrid modelling measurement stand**Abstract**

Knowledge of measurement scene energetic parameters is very often a key element during measurements. Hybrid modelling stand which uses vision and thermal cameras is capable to visualize a 3D thermal model of the measurement scene. This data are envisioned to be used in object energetic modelling. Connection of images acquired using different acquisition methods can deliver information invisible for traditional imaging technique. Visible and thermal images connected in one image give information about shapes and temperature map of objects seen by cameras. If we connect a stereoscopic visible image and thermal image we will have a three-dimensional object model covered with the temperature map. Dividing the three dimensional object into elementary surfaces we can model this object energetically. Energetic modelling of the measurement scene allows verifying the measurement data. This method requires many measurement scene parameters to be registered.

Keywords: image processing, hybrid modelling, thermal phantom.

1. Wstęp

Projektanci współczesnych systemów bezpieczeństwa publicznego poszukują coraz bardziej skutecznych rozwiązań technicznych w zakresie ochrony osób i mienia. Zanim jednak nowe technologie przyjmą formę konkretnych rozwiązań aplikacyjnych czeka je długi proces badań i testów. Umiejętność modelowania zjawisk fizycznych związanych z procesem pomiarowym może się okazać jednym z kluczowych elementów poprawnego testowania zarówno poszczególnych komponentów urządzeń jak również kompletnych systemów informacyjno-pomiarowych.

Jednym z narzędzi badawczych wykorzystujących technikę obrazową jest modelowanie hybrydowe. Rozwiązanie to dzięki integracji danych obrazowych z różnych zakresów spektralnych umożliwia m.in. trójwymiarowe multispektralne modelowanie sceny pomiarowej. Pozyskane w ten sposób dane mogą zostać wykorzystane do modelowania zjawisk energetycznych które z kolei stanowią mogą punkt wyjścia do innych bardziej zaawansowanych analiz. Opracowana metodyka pomiarowa wykorzystująca modelowanie hybrydowe i energetyczne została wykonana na potrzeby badań urządzenia TeraEye pracującego w paśmie THz.

2. Modelowanie hybrydowe

Założeniem realizowanego projektu terahercowego (w zakresie badań urządzenia TeraEye) było opracowanie stanowiska na bazie klasycznych komponentów wizyjnych, które mogły by być wykorzystane zarówno w procesie pomiarowym jak i mogły by stanowić integralne elementy terahercowego systemu informacyjnego. Kluczowymi elementami systemu informacyjnego oraz stanowiska pomiarowego jest możliwość pozyskiwania danych wizyjnych i termalnych.

Biorąc za podstawę powyższe wymagania do realizacji modelowania hybrydowego zrezygnowano z możliwości użycia bardzo precyzyjnych zaawansowanych technicznie skanerów 3D. Zamiast tego zastosowano standardowe kamery pomiarowe pracujące w zakresie VIS i IR. Opracowane stanowisko fotogrametryczne do akwizycji i modelowania parametrów przestrzeni pomiarowej (rys. 1) składa się z dwóch kamer IQinVision IQeve 755 pracujących w zakresie widzialnym, pomiarowej kamery termowizyjnej FLIR A320 oraz projektora BENQ W6744 jako oświetlacza strukturalnego. Kamery VIS wyposażone zostały w obiektyw Computar MEGAPIXEL o ogniskowej regulowanej w zakresie $f = 4.5 - 13.2$ mm.

Podczas opracowania stanowiska pomiarowego zwrócono szczególną uwagę na automatyzację pomiarów. Sterowanie kamerami odbywało się poprzez interfejs Ethernetowy z wykorzystaniem opracowanego przez autorów artykułu oprogramowania. Program sterujący kamerami wykonany został w obiektowym języku programowania korzystając ze środowiska Microsoft Visual Studio 2008. Oprogramowanie pozwala na zmianę parametrów pracy (dobór odpowiedniego oświetlenia strukturalnego), akwizycję i automatyczne zapisywanie danych obrazowych pobieranych z kamer

Użyte do budowy stanowiska komponenty spełniały wymagania zarówno systemu informacyjnego jak i stanowiska pomiarowego w zakresie oczekiwanej rozdzielczości przestrzennej i temperaturowej [1].

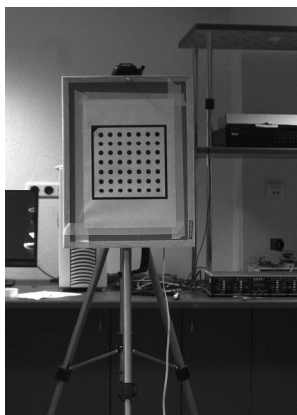


Rys. 1. Stanowisko do pomiarów fotogrametrycznych
Fig. 1. Photogrammetric measurement stand

Każda sesja modelowania hybrydowego składa się z dwóch etapów kalibracji i właściwej procedury pomiarowej.

Kalibracja

W trakcie procedury kalibracyjnej punktom obrazowym przypisywane są współrzędne przestrzenne. Jest to niezbędne ze względu na konieczność indywidualnego określenia obszaru pomiarowego dla każdej z serii pomiarowych. Do kalibracji wykorzystywany jest obiekt testowy (rys. 2) składający się z 49 znaczników pomiarowych (w układzie 7x7) wykorzystywanych do kalibracji kamer VIS oraz 4 znaczników (elementy narożne) wykorzystywanych do kalibracji kamer IR. Zastosowanie zaproponowanego obiektu testowego umożliwiło opracowanie procedury kalibracyjnej polegającej na rejestracji stereopar (przez kamery VIS) oraz odpowiadających im obrazów IR dla różnych położań przestrzennych obiektu testowego.

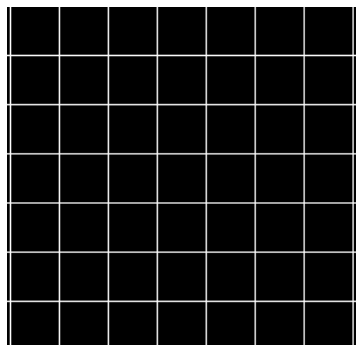


Rys. 2. Kalibracyjny obiekt testowy
Fig. 2. Calibration test object

Automatyzację procesu kalibracyjnego uzyskano dzięki komputerowemu sterowaniu położenia platformy z obiektem testowym oraz algorytmom weryfikującym poprawność (tripletu – VIS1, VIS2, IR). Na podstawie zweryfikowanych danych wyznaczone są niezbędne parametry (elementy orientacji wewnętrznej i zewnętrznej) kamer VIS i IR.

Modelowanie

Uzyskane w powyższy sposób współczynniki kalibracyjne umożliwiają analizę danych pozyskanych podczas właściwego procesu pomiarowego. Akwizycja obrazów w każdej sesji pomiarowej (podobnie jak przy kalibracji) wiąże się z pozyskaniem tripletu obrazów (VIS1, VIS2, IR), jednak w tym przypadku rejestrowane są obrazy fantomu termalnego a dokładniej obrazy wzorca projektowanego z oświetlacza strukturalnego (rys. 3).



Rys. 3. Wzorec oświetlenia strukturalnego
Fig. 3. Structural lighting pattern

Jako wzorec strukturalny użyto pojedynczej siatki z charakterystycznym znacznikiem odniesienia. Zastosowanie odpowiednich algorytmów analizy obrazów zautomatyzowało procedurę detekcji punktów homologicznych dla obrazów VIS1 (obraz lewy) i VIS2 (obraz prawy). Wyznaczone w procedurze triangulacyjnej współrzędne przestrzenne dla odpowiednich punktów homologicznych umożliwiają uzyskanie trójwymiarowego modelu obiektu (fantomu). Fuzja danych przestrzennych z danymi z kamery IR pozwala zrealizować modelowanie hybrydowe [2], którego efektem jest termalny model 3D fantomu. Tak uzyskane wyniki z modelowania łącznie z parametrami klimatycznymi dla analizowanej przestrzeni pomiarowej stanowią dane wejściowe dla modelowania energetycznego w paśmie THz.

3. Testowanie stanowiska do modelowania hybrydowego

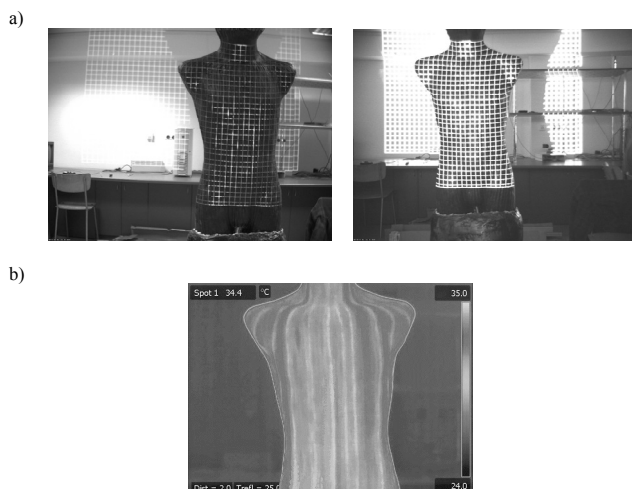
Weryfikację poprawności działania stanowiska do modelowania hybrydowego przeprowadzono z wykorzystaniem fantomu termalnego.

Na potrzeby testowania urządzenia TeraEye opracowano specjalny fantom termalny geometrycznie i termicznie odpowiadającego sylwetce dorosłego człowieka rys. 4.



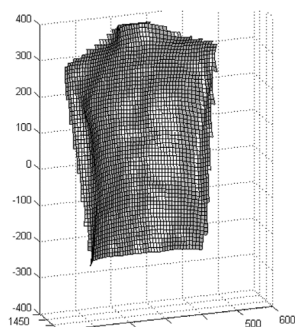
Rys. 4. Fantom termalny, a) wymiarowanie, b) fantom umieszczony na platformie jezdnej
Fig. 4. Thermal phantom, a) dimensions, b) phantom on a mobile platform

Przykład pozyskanego tripletu obrazów przedstawiono na rysunku 5.



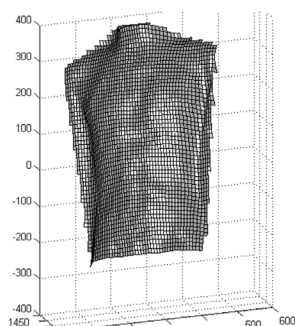
Rys. 5. Zestaw zdjęć pomiarowych, a) zdjęcia wizyjne, b) termogram
Fig. 5. Measurement photos, a) vision photos, b) thermal photo

Dzięki algorytmom przetwarzania danych VIS uzyskano model 3D (rys. 6).



Rys. 6. Fragment fantomu 3D
Fig. 6. 3D thermal phantom

Z modelu 3D oraz danych pozyskanych kamerą termowizyjną zsyntezowano hybrydowy model fantomu termalnego. Wyniki fuzji obrazu termowizyjnego oraz danych z obrazów VIS przedstawiono na rys. 7.

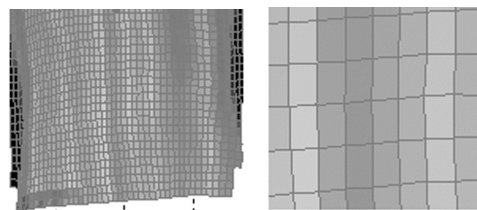


Rys. 7. Model hybrydowy fantomu termalnego
Fig. 7. Hybrid model of thermal phantom

4. Modelowanie energetyczne

Realizacja pomiarów za pomocą skalibrowanego stanowiska fotogrametrycznego umożliwia przejście do etapu modelowania warunków pomiarowych na stanowisku do badań urządzenia TeraEye (modelowanie energetyczne), co stanowi jedno z kluczowych zagadnień umożliwiających ocenę parametrów badanego urządzenia [3]. Modelowanie energetyczne w paśmie THz wymaga znajomości parametrów elementarnych powierzchni promieniujących tzw. fasetek. W przypadku obiektu testowego jest to

geometria i orientacja w przestrzeni elementarnej powierzchni fantomu (zgodnie z przyjętym rastrem) wraz z informacją o jej temperaturze rys. 8.



Rys. 8. Powierzchnia elementarna
Fig. 8. Elementary surface

Z pomiarowego punktu widzenia nie jest wymagany kompletny model 3D [4] a jedynie ta część powierzchni obiektu/sceny która jest w polu widzenia detektora THz rys. 7. Procedura modelowania energetycznego wiąże się z oszacowaniem mocy, jaka docierać będzie do detektora THz w paśmie jego czułości. Podczas obliczeń uwzględnia się:

a) moc emitowaną przez jednostkową powierzchnię ciała doskonale czarnego do półsfery, którą możemy wyznaczyć z prawa Plancka:

$$P_b = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\pi h c^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda k T}} - 1 \right)} d\lambda \quad (1)$$

b) emisyjność ϵ obiektu promieniującego, ponieważ obiekt emitujący nie jest ciałem doskonale czarnym, więc moc emitowaną z elementarnej powierzchni (fasetki o powierzchni A) można wyznaczyć z poniższej zależności:

$$P_i = P_b \cdot A \cdot \epsilon \quad (2)$$

c) parametry geometryczne toru pomiarowego takie jak powierzchnia S obiektu i jego odległość od obiektu R umożliwiają wyznaczenie kąta bryłowego Ω , pod jakim widziana jest elementarna fasetka przez układ detekcyjny a więc uzyskujemy informację jaka część promieniowania emitowanego dociera do obiektu:

$$\Omega = \frac{S}{R^2} \quad (3)$$

a dodatkowo znając kąt α między normalną do powierzchni emitującej a kierunkiem promieniowania możemy uwzględnić cosinusowy rozkład tego promieniowania:

$$P = P_x \cdot \cos \alpha \quad (4)$$

d) własności transmisyjne powietrza T (w danej temperaturze, wilgotności, dla znanej odległości i dla danej długości fali) oraz tłumienność optyki D , pozwalają oszacować całkowitą moc padającą na detektor

$$P = P_i \cdot T \cdot D \cdot \frac{\Omega}{2\pi} \cdot \cos \alpha \quad (5)$$

Z powyższego opisu widać jak istotną rolę odgrywa modelowanie hybrydowe umożliwiające wyznaczenie mocy emitowanej z fasetek znajdujące się w polu widzenia układu detekcyjnego.

5. Modelowanie hybrydowe w badaniach THz

Celem krajowej części projektu terahercowego jest testowanie prototypu urządzenia *TeraEye* w warunkach zbliżonych do rzeczywistych a także poszukiwanie rozwiązań zwiększających możliwości interpretacyjne powstającego urządzenia pomiarowe-

go. Zespół IOE-WAT zaproponował rozwiązanie, które może zostać wykorzystane zarówno do testowania urządzenia TeraEye jak i stanowić integralną część THz systemu pomiarowego. W trybie testowania urządzenia realizacja zadania wymaga odpowiedniego przygotowania stanowiska testowego i organizacji procesu pomiarowego. Ponieważ pomiary realizowane będą w warunkach zbliżonych do rzeczywistych, oprócz akwizycji bezpośrednich danych z *TeraEye* wymagana jest rejestracja parametrów opisujących warunki pomiarowe (klimatyczne, geometria sceny pomiarowej, itd.) każdej z sesji pomiarowych (rozumianych jako sparametryzowany pomiar z użyciem próbki badanego materiału) celem weryfikacji poprawności uzyskiwanych danych oraz możliwości korekcji uzyskiwanych wyników pod kątem wymagań bazy danych pomiarowych.

Proces pomiarowy urządzenia TeraEye w warunkach zbliżonych do rzeczywistych wymaga zaproponowania metody pozwalającej na weryfikację uzyskiwanych danych. Jako, że są to prace pionierskie w zakresie pasywnej THz detekcji brak obecnie możliwości walidacji danych pomiarowych przy użyciu innego urządzenia bądź metody pomiarowej. Proponowane rozwiązanie bazuje na modelowaniu parametrów energetycznych w paśmie THz. Takie podejście wiąże się z koniecznością rejestracji szeregu parametrów sceny pomiarowej, które następnie mogą być wykorzystane w procesie modelowania. Oprócz akwizycji lokalnych parametrów klimatycznych (temperatura, ciśnienie, wilgotność), kluczową kwestią staje się rejestracja danych charakteryzujących główny obiekt pomiarowy. W ramach testowania urządzenia TeraEye przewiduje się zastosowanie materiałów niebezpiecznych (m.in. materiałów wybuchowych). W związku z tym (dla bezpieczeństwa) zaproponowano użycie specjalnego fantomu termalnego (nie zawierającego elementów metalowych – mogących zafałszować wyniki pomiarów). Dodatkowo celem minimalizacji wpływu promieniowania sceny zaproponowano również wykonywanie badań w zamkniętej przestrzeni ekranowanej elektromagnetycznie (rys. 9).



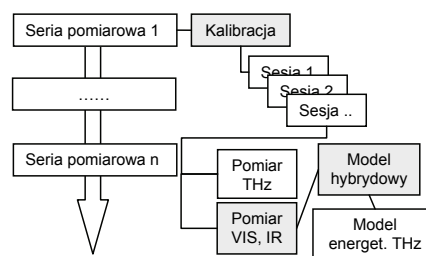
Rys. 9. Namiot elektromagnetyczny
Fig. 9. Electromagnetic tent

W ramach badań przewiduje się wykorzystywanie różnych „okryć wierzchnich” maskujących promieniowanie umieszczonego na fantomie materiału wybuchowego.

W związku z powyższym procedura pomiarowa urządzenia THz zakłada:

- kalibrację stanowiska (VIS i IR) przed właściwym procesem pomiarowym (serią pomiarową),
- akwizycji obrazów VIS i IR na stanowisku z użyciem oświetlacza strukturalnego,
- syntezę modelu przestrzennego,
- syntezę modelu hybrydowego.
- modelowanie energetyczne
- weryfikację danych pomiarowych z modelem energetycznym.

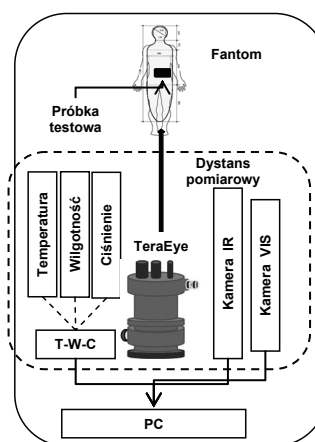
Organizację procesu pomiarowego urządzenia THz przedstawiono na rys. 10.



Rys. 10. Organizacja procesu pomiarowo analitycznego dla urządzenia TeraEye
Fig. 10. TeraEye analyse – measurement process organisation

6. Podsumowanie

Zaproponowane stanowisko fotogrametryczne może znaleźć zastosowanie w różnych aplikacjach, gdyż zarówno konfiguracja sprzętowa jak i przedstawiona metoda są uniwersalne. Jeden z możliwych sposobów jego użycia związany z badaniami THz został zaprezentowany w niniejszym artykule. Opracowana metoda fuzji stereoskopowego obrazu VIS oraz termogramu pozwala na przedstawienie mapy temperatur na powierzchni trójwymiarowego obiektu. Dane te, w kolejnych etapach procedury badań urządzenia THz, wykorzystywane do modelowania energetycznego aby w końcowym efekcie umożliwić weryfikację otrzymanych wyników (rys. 11).



Rys. 11. Stanowisko do badań TeraEye
Fig. 11. TeraEye measurement stand

Autorzy opracowania mają nadzieję, że prowadzone prace przyczynią się do opracowania w pełni funkcjonalnego prototypu pasywnego terahercowego systemu informacyjnego.

7. Literatura

- [1] Walkenstein J. A., Pardo W. B., Robertson H. S., Monti M.: An inexpensive hybrid video imaging system, pp. 5385 – 5386, Review of Scientific Instruments 11(12), 1995.
- [2] Su-xia X., Pei-yuan G., Tian-hua C.: Study on Optimal Wavelet Decomposition Level in Infrared and visual Light Image Fusion, 2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation.
- [3] Wang Q., Shen Y.: The Effects of Fusion Structures on Image Fusion Performances, IMTC 2004 - Instrumentation and Measurement Technology Conference Como, Italy, 18-20 May 2004.
- [4] Quast H., Löffler T.: 3D-Terahertz-Tomography for Material Inspection and Security, SynView GmbH, Glashuetten, Germany.