

Barbara PUTZ<sup>1</sup>, Anna TIMOFIEJCZUK<sup>2</sup>, Michał BARTYŚ<sup>1</sup>, Jacek GWARDECKI<sup>3</sup>

<sup>1</sup> INSTYTUT AUTOMATYKI I ROBOTYKI POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ, ul. św. Andrzeja Boboli 8, 02-525 Warszawa

<sup>2</sup> KATEDRA PODSTAW KONSTRUKCJI MASZYN, POLITECHNIKA ŚLĄSKA, ul. Konarskiego 18a, 44-100 Gliwice

<sup>3</sup> CENTRUM NAUKOWO-PRODUKCYJNE ELEKTRONIKI PROFESJONALNEJ RADWAR SA, ul. Poligonowa 30, 04-051 Warszawa

## System fuzji obrazów wizyjnych i termowizyjnych dla potrzeb monitorowania otoczenia w czasie rzeczywistym

Prof. nzw. dr hab. inż. Barbara PUTZ

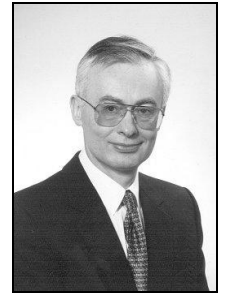
Absolwentka Wydziału Mechatroniki (d. Mechaniki Precyzyjnej) Politechniki Warszawskiej. Zajmuje się systemami wizyjnymi w robotyce, algorytmami syntezy i analizy obrazów oraz zagadnieniami zaawansowanego modelowania geometrycznego. Współautorka pierwszego w języku polskim podręcznika z dziedziny modelowania geometrycznego oraz kilku wydań multimedialnych podręczników do nauczania na odległość z dziedziny programowania, algorytmów i struktur danych oraz techniki obrazowej.



e-mail: b.putz@mchtr.pw.edu.pl

Dr inż. Michał BARTYŚ

Absolwent Wydziału Mechatroniki (d. Mechaniki Precyzyjnej) Politechniki Warszawskiej. Zajmuje się zagadnieniami związanymi z automatyzacją procesów, diagnostyką, systemami sieciowymi automatyki, inteligentnymi urządzeniami pomiarowymi i wykonawczymi oraz zastosowaniami logiki rozmytej. Współautor 3 książek i 3 podręczników, autor 101 publikacji, autor i współautor 4 patentów. Konstruktor 61 unikalnych konstrukcji urządzeń mechatronicznych. Autor licznych wdrożeń przemysłowych.



e-mail: bartys@mchtr.pw.edu.pl

Dr inż. Anna TIMOFIEJCZUK

Absolwentka Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej. Od 1999 roku zatrudniona na stanowisku adiunkta w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn. Podstawowe zainteresowania i kierunki badań dotyczą metod diagnostyki technicznej, analizy sygnałów niestacjonarnych, wnioskowania diagnostycznego oraz metod przetwarzania i analizy obrazów i termogramów.



e-mail: anna.timofiejczuk@polsl.pl

Mgr inż. Jacek GWARDECKI

Absolwent Wydziału Elektroniki Politechniki Warszawskiej. Od 1976 roku zatrudniony w WZR RAWAR przekształconych w CNPEP RADWAR SA. Zajmował się projektowaniem systemów cyfrowych dla potrzeb radiolokacji, systemów optoelektronicznego śledzenia obiektów oraz systemów obrony przeciwlotniczej. Aktualnie jest zastępcą dyrektora Zakładu Badawczo-Rozwojowego.



e-mail: jacek.gwardecki@radwar.com.pl

### Streszczenie

Artykuł prezentuje stan prac nad systemem fuzji obrazów z kamer IR i TV realizowanym w ramach projektu rozwojowego. Omówiona została koncepcja systemu, metodyka badań laboratoryjnych, wybór algorytmów oraz ich implementacja sprzętowa działająca w czasie rzeczywistym. System zrealizowany w pojedynczym układzie FPGA wyróżnia się wysoką elastycznością i bardzo oszczędnym wykorzystaniem układów mnożących i logicznych. Przedstawione rozwiązania mają charakter ogólny i mogą mieć zastosowanie w różnorodnych systemach nadzoru i diagnostyki.

**Słowa kluczowe:** głowica optoelektroniczna, kamera termowizyjna, dopasowanie obrazów, korelacja fazowa, układy FPGA.

### System of TV and thermal image fusion for real-time application monitoring

#### Abstract

The paper presents the state of research dealing with TV and thermal image fusion (Fig. 3) performed within the framework of national research and development project. There are presented main results of the project. Solutions found are evaluated as general and therefore, the spectrum of possible implementations of the system pass over primary assumptions. Typical application areas of the image fusion system concern supervisory and diagnostics systems. The idea of the system, the methodology of laboratory research with the use of prototype platform, designed for testing algorithms realized as C plugins (Fig. 1), and laboratory optoelectronic head (Fig. 2) are presented. The paper presents as well the investigations of algorithms promising real-time implementation. Finally, the phase correlation algorithm for image registration [8] as well as Laplacian pyramid algorithm for image fusion ([9], Fig. 4, 5) have been chosen for system of TV and thermal image fusion. System has been realized on a chip making use from single FPGA (Fig. 6). Presented system stands out from similar solutions [2-4] with high flexibility, facility of quick reconfiguration and very good economical factors.

**Keywords:** optoelectronic head, thermal camera, image registration, image alignment, phase correlation, Laplacian pyramid, FPGA circuits.

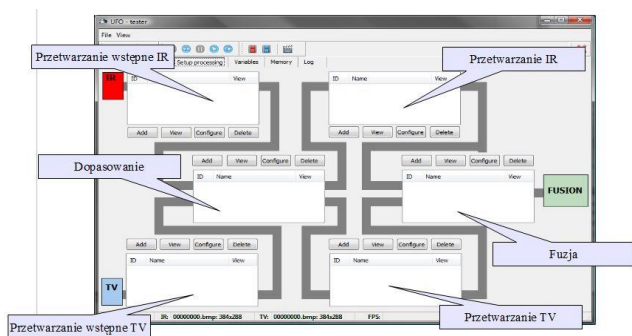
### 1. Wprowadzenie

Współczesne zintegrowane i zaawansowane technologicznie głowice optoelektroniczne stosowane do śledzenia obiektów wyposażone są z reguły w co najmniej dwie kamery: kamerę operującą w zakresie pasma widzialnego (TV) oraz obserwacyjną kamerę termowizyjną operującą w zakresie bliskiej podczerwni (IR). Wadą kamery TV jest brak możliwości wygenerowania zobrazowania w warunkach pełnej ciemności. Z kolei sygnał wizyjny kamery IR zanika w warunkach wystąpienia silnych opadów atmosferycznych. Zadaniem operatora systemu śledzenia optoelektronicznego jest więc dokonywanie wyboru zobrazowania z jednej z dwóch kamer, optymalnego w danych warunkach. Taka sytuacja zmusza operatora do ciągłego monitorowania aktualnych warunków pogodowych i w zależności od sytuacji do odpowiedniego przełączenia sygnału z kamer. Rozwiązaniem tego problemu jest system, który w czasie rzeczywistym realizował będzie fuzję obrazów z obu kamer i generował jedno zintegrowane zobrazowanie [1 - 4]. System taki jest planowanym efektem końcowym realizacji projektu rozwojowego<sup>1)</sup>. W celu budowy systemu utworzono konsorcjum, w skład którego wchodzi zespół badawczy Politechniki Warszawskiej, Politechniki Śląskiej oraz Centrum Naukowo-Produkcyjnego Elektroniki Profesjonalnej RADWAR SA. Zakłada się, że opracowany system zostanie wdrożony do produkcji w CNPEP RADWAR SA i będzie stanowił integralną część systemów optoelektronicznego śledzenia obiektów przeznaczonego do zastosowań zarówno cywilnych jak i wojskowych. System, roboczo określany jako UFO (Układ Fuzji Obrazów), jest realizowany w taki sposób, aby możliwy był jego przyszły rozwój. W artykule przedstawiona została pierwsza, testowa wersja systemu zrealizowanego w wersji sprzętowej i działającego w czasie rzeczywistym.

<sup>1)</sup> System fuzji obrazów wizyjnych i termowizyjnych dla potrzeb monitorowania otoczenia w czasie rzeczywistym. Projekt rozwojowy MNiSW nr O R00 0019 07

## 2. Projekt układu przetwarzania

W pierwszym etapie prac opracowano założenia i wymagania do części programowej systemu przetwarzania obrazów, wraz z ogólnym schematem układu przetwarzania i charakterystyką poszczególnych jego modułów. Schemat układu przetwarzania powstał na podstawie opracowanych przez CNPEP RADWAR SA wymagań funkcjonalnych i założeń dotyczących budowy systemu i był kilkakrotnie modyfikowany, zanim uzyskano wersję końcową. Celem nadrzędnym było opracowanie możliwie prostej i przejrzystej struktury systemu. W efekcie powstał projekt układu, który składa się z modułów: akwizycji obrazów, wstępnego ich przetwarzania, dopasowania, analizy i fuzji. Struktura układu została przedstawiona na rys. 1. Rysunek ten w istocie przedstawia wygląd okna prototypowej platformy testowej, której struktura odzwierciedla strukturę zaprojektowanego układu przetwarzania.



Rys. 1. Okno prototypowej platformy testowej systemu fuzji obrazów  
Fig. 1. The window of the prototype of test platform of image fusion system

Prototypowa platforma testowa została opracowana i wykonana specjalnie dla potrzeb projektu. Jest ona rozbudowanym środowiskiem służącym do programowania, testowania i porównywania algorytmów dopasowania i fuzji obrazów. Algorytmy te są implementowane w postaci prototypowych bloków przetwarzania obrazów z wykorzystaniem techniki wtyczek realizowanych w języku C. Platforma testowa jest uniwersalnym narzędziem, które z założenia jest stosowane przez zespoły badawcze Politechniki Warszawskiej i Politechniki Śląskiej na etapie bezpośrednio poprzedzającym implementację sprzętową algorytmów. Na wstępnym etapie badań algorytmy są implementowane – zależnie od upodobań autorów – w środowisku Matlab i/lub C++. Część z nich jest niejednokrotnie już na tym etapie odrzucana.

Przyjazny dla użytkownika interfejs programu głównego platformy umożliwia szybkie i proste zestawienie testowanych torów przetwarzania sygnałów wizyjnych, uruchomienie procesu przetwarzania obrazów oraz podgląd i ocenę uzyskanych wyników.

Oprogramowanie platformy zostało zrealizowane w wersji wielowątkowej: wątek odświeżania ekranu realizowany jest z częstotliwością 25 ramek na sekundę. W pozostałych czterech wątkach realizowane są algorytmy przetwarzania danych i obrazów. W celu realizacji przetwarzania obrazów w czasie rzeczywistym została opracowana specjalna wtyczka strumieniowego odczytu danych obrazowych. Wtyczka umożliwia wprowadzanie obrazów testowych z różnych źródeł. Mogą one pochodzić z plików zapisanych na dysku (po ich uprzednim przygotowaniu) lub być pobierane bezpośrednio z dwóch kamer w sposób synchroniczny. Dla celów synchronizacji danych obrazowych została wykonana odrębna wtyczka. Dzięki takiemu rozwiązaniu możliwa była symulacja planowanego układu fuzji w stopniu zbliżonym do rozwiązania docelowego.

Opracowana na Politechnice Warszawskiej prototypowa platforma testowa pozwoliła na przeprowadzenie szeregu badań i testów, których wyniki posłużyły do sprecyzowania i określenia ostatecznych wytycznych do budowy części sprzętowej i programowej docelowego systemu fuzji obrazów.

## 3. Akwizycja i wstępne przetwarzanie obrazów

W projektowanym układzie fuzji obrazów zastosowano kamery TV i IR z wyjściowym analogowym sygnałem wizyjnym. Sygnał wizyjny generowany przez kamery jest zgodny ze standardem CCIR AL B/G (625 linii). Docelowe kamery TV i IR o rozdzielczościach wynoszących odpowiednio: 756x581 i 384x256 pikseli są umieszczone w specjalnej optoelektronicznej głowicy obserwacyjnej. Ze względu na koszt, masę i gabaryty takiej głowicy, do celów badawczych projektu zaprojektowano i zbudowano jej laboratoryjny model funkcjonalny (rys. 2).



Rys. 2. Zdjęcie laboratoryjnego modelu funkcjonalnego obserwacyjnej głowicy optoelektronicznej

Fig. 2. Snap shot of laboratory test bed (optoelectronic head)

Pierwszym etapem przetwarzania obrazów w systemie UFO jest akwizycja obrazów, realizowana z zastosowaniem elektronicznych układów przechwytywania ramek video. Do wejść tych układów dołączone są wizyjne sygnały analogowe z kamer TV i IR. Na wyjściach układów przechwytywania generowane są 8-bitowe monochromatyczne obrazy cyfrowe reprezentowane w postaci strumienia/wektora wartości odcieni szarości kolejnych pikseli obrazu. Układy przechwytywania zapewniają również synchroniczną rejestrację obrazów oraz ich transmisję i zapis do odpowiednich buforów pamięci.

Na etapie opracowywania struktury systemu założono, że procedury wchodzące w skład bloku przetwarzania obrazów powinny cechować się możliwie krótkim czasem przetwarzania. Większość procedur przetwarzania obrazów bazuje na prostych operacjach macierzowych, które mogą być zoptymalizowane pod względem czasu przetwarzania w końcowej wersji systemu. W trakcie badań dokonywano oceny poszczególnych procedur pod kątem czasu ich realizacji i uzyskiwanej jakości obrazów. W wyniku przeprowadzonej oceny, realizowanej w środowisku Matlab, odrzucono część procedur nie rokujących sukcesu implementacyjnego w końcowej wersji systemu. Do procedur, które były testowane przy pomocy platformy prototypowej i zostały ostatecznie zakwalifikowane do implementacji w końcowej wersji systemu należą:

- procedury wyboru regionu zainteresowania (ROI), polegające na usunięciu z obrazu nieistotnych fragmentów lub artefaktów, np. syntetycznego dodatkowego obramowania obrazu rejestrowanego z niektórych kamer
- procedury pozwalające na zwiększenie jakości obrazu; do grupy tych procedur należą algorytmy: normalizacji, wyznaczenia, a następnie wyrównywania histogramu i algorytmy filtracji. Dwa pierwsze algorytmy umożliwiają rozjaśnienie i wyostrenie obrazu, dzięki czemu lepiej widoczne i rozróżnialne są szczegóły obrazu. Dotyczy to zwłaszcza obrazów z kamer IR, w przypadku, gdy temperatury elementów obserwowanego otoczenia różnią się nieznacznie temperaturą.

W ramach procedur przetwarzania wstępnego opracowano także algorytmy służące ocenie obrazów IR i TV przed i po przetworzeniu. Do oceny jakości obrazów zastosowano jakościowe miary percepcyjne i strukturalne. Celem zastosowania tych miar był dobór takich algorytmów przetwarzania obrazów, które umożliwiają uwypuklenie obiektów zwłaszcza o małych rozmiarach

i małym kontraście. Wyniki wstępnej oceny obrazów zostały wykorzystane do optymalizacji parametrów procedur przetwarzania obrazów. Ze względu na ograniczenia w długości czasu realizacji poszczególnych procedur, operacje te były zastosowane jedynie na platformie testowej.

#### 4. Badania i wybór algorytmu dopasowania obrazów

Operacja dopasowania obrazów należy do podstawowych w każdym systemie fuzji. Od poprawności tej operacji zależy jakość operacji fuzji i jakość obrazów syntetycznych będących jej efektem. Dopasowanie obrazów jest konieczne, gdyż osie optyczne obu kamer są względem siebie przesunięte (rys. 2), co skutkuje błędem paralaksy w postaci przesunięcia obrazów. Pomiędzy pobranymi obrazami występują dodatkowo różnice wynikające z różnych parametrów kamer (w tym rozdzielczości), zniekształceń optycznych, czy obróconych wzajemnie osi optycznych sensorów wizyjnych.

Ponadto głowica obserwacyjna znajduje się w ruchu i stąd mogą występować zmiany tych parametrów w czasie. Dopasowanie powinno też pozwolić na kompensację efektu chwilowego braku synchronizacji obrazów. Pożądane jest więc, aby dynamiczna scena, a co za tym idzie zmiana położenia śledzonego obiektu względem kamer, wymuszała wyznaczanie w czasie rzeczywistym parametrów dopasowania, najlepiej dla każdej pary synchronicznie zarejestrowanych obrazów. Wynikiem dopasowania muszą być dwa obrazy o takiej samej rozdzielczości i zgodności co do rozmieszczenia obiektów na obrazach.

Możliwe są różne sposoby dopasowywania obrazów [5]. Pełne uwzględnienie omówionych różnic wymaga opisanie dystorsji przekształceniami rzutowymi. Konieczność zastosowania uproszczeń ze względu na docelową implementację sprzętową spowodowała, że zdecydowano się na zastosowanie algorytmów pozwalających na wyznaczenie globalnych wartości parametrów dopasowania obrazów oraz na uwzględnienie jedynie przekształceń afinicznych wymagających wyznaczenia skali, rotacji i przesunięć wzajemnych obrazów w dwu osiach. Testy przeprowadzone na obrazach pochodzących z kamer docelowych potwierdziły poprawność takiego podejścia.

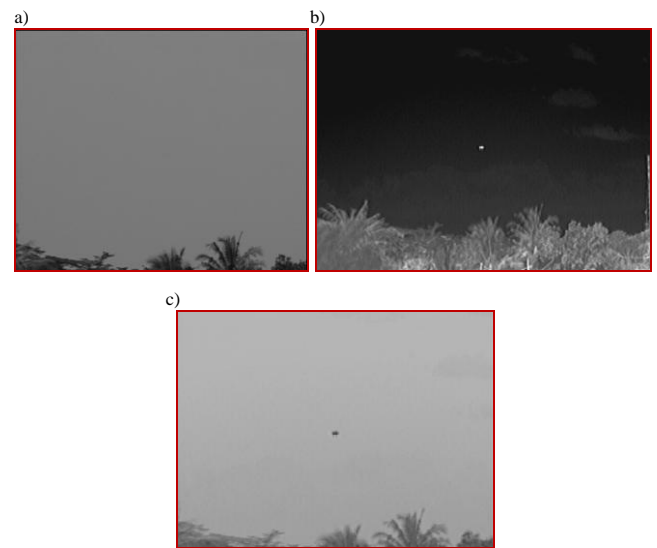
Po przeprowadzeniu analizy literaturowej, spośród wielu dostępnych algorytmów zdecydowano się na przetestowanie najbardziej obiecujących, zarówno pod względem możliwości do uzyskania dokładności dopasowania, jak również przewidywanej szybkości działania. Analizowane były metody wykorzystujące kryterium maksymalizacji informacji wzajemnej (entropii), algorytm falkowy na bazie transformaty à trous, algorytm wykorzystujący strategię bayesowską do prognozowania i wyznaczania probabilistycznej reprezentacji treści obrazu oraz algorytm centroidowy. W ramach poszukiwania szybszego algorytmu dopasowania opracowano nowy, prosty algorytm krawędziowy [6], który po dokonaniu filtracji krawędziowej wyznacza translacje wynikowe metodą iteracyjną, poprzez wyznaczenie ich ze zbiorów przesunięć wzajemnych kolumn i wierszy, z wykorzystaniem wybranego parametru statystycznego (średnia, mediana, dominanta zbioru).

Jednakże w efekcie przeprowadzonych badań jako podstawową i najszybszą metodę dopasowania obrazów wybrano metodę bazującą na uogólnionym algorytmie korelacji fazowej, powiązany z transformacją FFT i przekształceniem log-polar [7]. Algorytm ten został zaimplementowany w języku C i przetestowany na prototypowej platformie bazowej. Pozwala on na dopasowanie pobieranych obrazów poprzez wyznaczenie współczynników: skali, rotacji i translacji.

W pierwszym etapie implementacji przyjęto dla uproszczenia, że zmiany skali i kąta rotacji można uznać za niezmiennie, w związku z tym można je wyznaczyć jednorazowo. Do wyznaczania na bieżąco współczynników translacji wystarcza więc zastosowanie klasycznego algorytmu dopasowania obrazów metodą korelacji fazowej, w oparciu o twierdzenie Fouriera o przesunięciu. Algorytm korelacji fazowej zaimplementowany został

najpierw w środowisku C++, a następnie w języku C na platformie testowej. W wyniku badań i testów przeprowadzonych na wielu zestawach par obrazów zdecydowano o realizacji sprzętowej tego właśnie algorytmu [8].

Przykład dopasowania obrazów zrealizowanego po wyborze regionu zainteresowania metodą korelacji fazowej przedstawiony został na rys. 3. Przykład ten ilustruje nietrawne zadanie dopasowania obrazów zawierających różne obiekty. Na obrazie z kamery termowizyjnej widoczne są gorące silniki samolotu, natomiast na obrazie TV samolot ten jest całkowicie niewidoczny.



Rys. 3. Obraz a) z kamery TV, b) z kamery termowizyjnej oraz c) wynik przetwarzania wstępnego, dopasowania i fuzji  
Fig. 3. Image from a) camera TV, b) thermal camera and c) result of image pre-processing, alignment and fusion

#### 5. Badanie i wybór algorytmu fuzji

Celem fuzji obrazów [1] jest wygenerowanie obrazu syntetycznego na podstawie dwóch monochromatycznych obrazów wejściowych po uprzednim ich dopasowaniu. W ramach przeprowadzonych badań testowano następujące grupy metod:

- wykorzystujące nieliniowe operatory minimum i maksimum,
- wykorzystujące analizę składowych głównych (PCA),
- oparte na przekształceniach hierarchicznych, bazujących na:
  - ✓ piramidzie Laplace'a,
  - ✓ piramidzie FSD (Filter-Subtract-Decimate),
  - ✓ piramidzie gradientów,
  - ✓ piramidzie kontrastu,
  - ✓ piramidzie współczynników dolnoprzepustowych,
  - ✓ piramidzie różnic morfologicznych,
- wykorzystujące transformatę falkową,
- wykorzystujące transformatę falkową niezmienną względem przesunięcia.

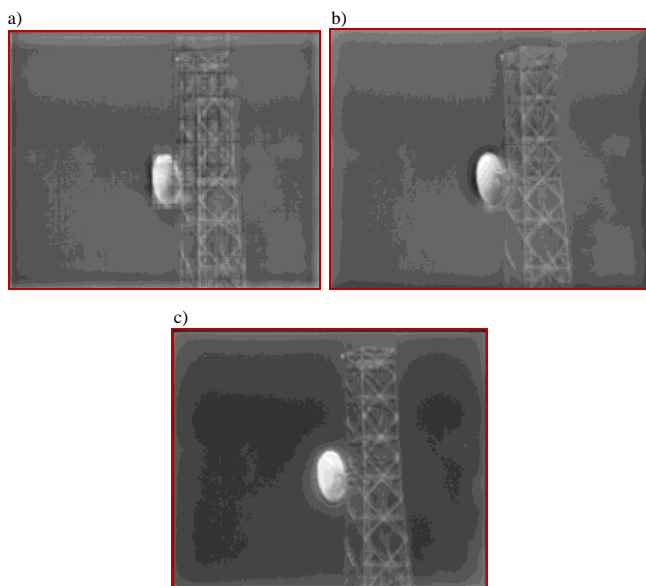
Wymienione metody pozwalają na wygenerowanie obrazów o różnych własnościach. Wpłynęło to korzystnie na wyłonienie grupy metod zastosowanych ostatecznie w końcowej wersji systemu. Podczas wyboru tych metod kierowano się wskazaniem, aby fuzja obrazów była inwariantna względem warunków zewnętrznych wpływających na obrazy wejściowe.

Na etapie badawczym zostały opracowane i zastosowane procedury oceny obrazów po operacji fuzji. Procedury te pozwoliły na zobiektywizowanie decyzji o wyborze tych metod fuzji, które są ukierunkowane na generowanie obrazów niosących maksimum informacji z punktu widzenia przyjętych kryteriów. Kryteria te uwzględniają fakt, że obraz po fuzji może być przeznaczony zarówno dla operatora systemu optoelektronicznego, jak i dla układów realizujących funkcje automatycznego śledzenia wskazanego obiektu. Zatem przy doborze procedury oceny obrazów po



fuzji uwzględniane były m.in. zdolności metody do identyfikacji ruchomych obiektów słabo widocznych, obiektów nieruchomych, zakłóceń wynikających z warunków atmosferycznych, nagłych zmian oświetlenia sceny, własności układu śledzenia celu itp. Ze względu na specyfikę obrazów pochodzących z głowicy obserwacyjnej, odpowiednia ocena obrazów po fuzji wymagała przeprowadzenia badań polegających na przeglądzie i selekcji metod rokujących odpowiednią przydatność. W tym przypadku badano zarówno algorytmy polegające na ocenie obrazu w oparciu o obraz referencyjny, jak również algorytmy, które nie wymagają obrazu referencyjnego.

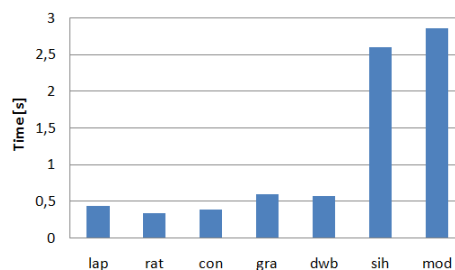
W trakcie badań, za najbardziej obiecującą została uznana wieloskalowa metoda fuzji obrazów oparta na piramidzie Laplace'a (rys. 4c) [9]. Metoda oparta na przekształceniu falkowym pozwala na uzyskanie obrazu syntetycznego o wyższej jakości, z punktu widzenia subiektywnej oceny obserwatora (rys. 4b), co jest opisywane w różnych publikacjach [10]. Realizacja projektu UFO była jednak związana z uwzględnieniem szeregu założeń dotyczących przede wszystkim czasu realizacji poszczególnych algorytmów. Spośród metod wykorzystujących zarówno przekształcenia piramidowe, jak i falkowe, metoda bazująca na piramidzie Laplace'a charakteryzowała się relatywnie krótkim czasem obliczeń, połączonym z zadowalającą jakością obrazów wynikowych. Metoda ta pozwala na dokonywanie operacji nie tyle na samych pikselach i ich poziomach szarości, co w większej mierze na obiektach typu krawędzie. Własność ta zapobiega występowaniu jasnych poświat wokół obiektów, które są widoczne w przypadku stosowania np. piramidy kontrastu.



Rys. 4. Przykładowe wyniki fuzji obrazów bazujące na: a) dyskretnym przekształceniu falkowym, b) dyskretnym przekształceniu falkowym niezmiennym wobec przesunięcia, c) piramidzie Laplace'a

Fig. 4. Exemplary results of image fusion based on a) discrete wavelet transform, b) shift-invariant wavelet transform, c) Laplacian pyramid

Ponadto należy podkreślić jako dodatkową zaletę, że algorytm bazujący na piramidzie Laplace'a jest niewrażliwy na niewielkie różnice w jakości dopasowania. Różnice takie, w przypadku zastosowania transformaty falkowej prowadzą do efektów objawiających się zniekształceniami obrazu wynikowego ([1], rys. 4a) i charakterystycznym migotaniem obrazu. Problem ten jest niwelowany poprzez zastosowanie transformacji falkowej niezmiennego wobec przesunięcia ([10], rys. 4b). W tym przypadku jednak znacznie wzrasta czas realizacji fuzji obrazów, co ilustruje rys. 5 (podane czasy realizacji odnoszą się do środowiska Matlab, ale relacje czasów działania wybranych algorytmów po ich implementacji na platformie testowej nie różnią się znacząco). Tym niemniej algorytm z zastosowaniem tego typu przekształcenia nie został definitywnie odrzucony, rozpoczęte zostały badania nad możliwością jego przyspieszenia i implementacji w systemie.



Rys. 5. Czasy realizacji w środowisku Matlab różnych algorytmów fuzji obrazów opartych na piramidach: Laplace'a (lap), składowych dolnoprzepustowych (rat), kontrastu (con), gradientu (gra) i różnic morfologicznych (mod) oraz na dyskretnym przekształceniu falkowym (dwb) i transformacji falkowej niezmiennego wobec przesunięcia (sih)

Fig. 5. Ranking of execution times of different image registering in Matlab environment based on pyramids of: Laplace (lap), low pass components (rat), contrast (con), gradient (gra), morphological differences (mod) as well as on discrete wavelet transform (dwb) and shift-invariant wavelet transform (sih)

## 6. Wybór architektury sprzętowej systemu

Zadanie wyboru architektury sprzętowej systemu rozpoczęto od opracowania szczegółowej, wielowariantowej koncepcji budowy pramodelu i koncepcji budowy platformy sprzętowej do prac rozwojowych.

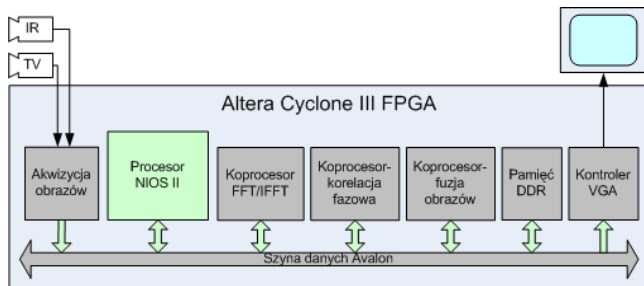
Wykorzystując zestawy rozwojowe bazujące na układach FPGA (Altera Stratix II oraz Cyclone III) oraz DSP (DaVinci TMDSEVM6446-OE i DaVinci TMDXEVM365) zrealizowano i wykonano badania ośmiu wariantów pramodelu systemu, w tym również wariantów hybrydowych (FPGA-DSP). W pierwszej fazie badań opracowano specjalne testy wydajnościowe pozwalające na ocenę i porównanie różnych platform sprzętowych do implementacji procedur przetwarzania obrazów w czasie rzeczywistym. Wykonane zostały badania czasów realizacji zarówno elementarnych operacji arytmetycznych, jak również złożonych operacji na obrazach. W wyniku oceny wyników tych badań dokonano wyboru docelowej platformy sprzętowej systemu fuzji bazującej na układach FPGA.

## 7. Implementacja systemu fuzji w układzie FPGA

W wyniku analizy wyników badań uzyskanych zarówno na etapie testowania algorytmów, jak i realizacji pramodelu podjęto decyzję o realizacji systemu testowego z zastosowaniem dopasowania obrazów metodą korelacji fazowej i fuzji bazującej na trójstopniowej piramidzie Laplace'a [8, 9]. W tym celu wykorzystano zestaw ewaluacyjny z pojedynczym układem FPGA ALTERA Cyclone III, pamięcią DDR2 128MB i środowiskiem NIOS II IDE. Układ FPGA taktowany jest sygnałem zegarowym o maksymalnej częstotliwości równej 150 MHz. Ideowy schemat blokowy układu dopasowania i fuzji obrazów zrealizowany z wykorzystaniem zestawu ewaluacyjnego przedstawia rys. 6. Struktura schematu przetwarzania informacji przyjęta w projekcie UFO odzwierciedla typowy dla układów FPGA równoległy i potokowy wysokowydajny sposób przetwarzania danych.

Operacje najbardziej złożone obliczeniowo wykonywane są przez trzy koprocесory zrealizowane w języku VHDL, w tym:

- dwa koprocесory służące do realizacji algorytmu dopasowania metodą korelacji fazowej:
  - ✓ koprocесor wyznaczający dwuwymiarowe transformaty FFT/IFFT z jądrem 8-punktowym, wykorzystujący lokalne buforowanie danych w pamięci podręcznej koprocесora
  - ✓ koprocесor obliczający korelację fazową,
- koprocесor realizujący trójstopniową fuzję obrazów metodą piramidy Laplace'a.



Rys. 6. Blokowy schemat ideowy budowy układu dopasowania i fuzji obrazów  
Fig. 6. Block schematics of the image alignment and fusion system

Wbudowany w FPGA procesor NIOS II odgrywa rolę układu nadzorującego pozostałe moduły systemu fuzji obrazów dołączone do wewnętrznej szyny Avalon oraz wykonuje operacje niekrytyczne czasowo. Procesor NIOS II jest programowany w języku C. Do lokalnego przechowywania obrazów wejściowych i wyjściowych służy pamięć DDR2. Tak zrealizowany układ może być łatwo rekonfigurowany i rozbudowany.

Na obecnym poziomie rozwoju oprogramowania algorytm dopasowania obrazów (obliczanie współczynników translacji) realizowany jest z częstotliwością 15 Hz. Natomiast algorytm fuzji wykonywany jest w czasie poniżej 10 ms. Dopasowanie obrazów odbywa się więc w tle procesu fuzji i jest uaktualniane co kilka ramek obrazu. Należy zaznaczyć, że mimo to podczas testów nie zauważono utraty płynności wyjściowego obrazu wizyjnego. Dzięki temu zrealizowano pierwszą testową wersję systemu, w którym fuzja jest realizowana jest w czasie rzeczywistym z częstotliwością 25 Hz, a więc współbieżnie z częstotliwością obrazową wejściowych sygnałów wizyjnych.

Na podkreślenie zasługuje fakt, że tor przetwarzania obrazów zrealizowano przy użyciu zaledwie jednego układu FPGA, co korzystnie wyróżnia to rozwiązanie spośród innych bardziej złożonych konstrukcji układów fuzji.

Zaprojektowany i zrealizowany system dopasowania i fuzji obrazów w obecnej konfiguracji angażuje ponadto relatywnie niewielkie zasoby pamięci i bardzo oszczędnie korzysta z zasobów FPGA w postaci bloków mnożących i układów logicznych. Cechy te istotnie wyróżniają UFO wśród innych rozwiązań podobnego typu [3].

## 8. Prace nad modelem elektronicznym

Po uzyskaniu pozytywnej oceny wyników implementacji systemu dopasowania i fuzji obrazów uzyskanych w zestawie ewaluacyjnym, przystąpiono do budowy modelu systemu UFO. Na Politechnice Warszawskiej opracowano wielowariantową koncepcję budowy modelu w warstwie sprzętowej i przyjęto ewolucyjny sposób dojścia do rozwiązania końcowego polegający na podziale zadania budowy modelu na dwa zasadnicze etapy: budowy interfejsu wizyjnego i budowy płyty bazowej. Przyjęcie takiej koncepcji pozwoliło na minimalizację ryzyka osiągnięcia celu. Dzięki posiadaniu wyposażeniu laboratoryjnemu w Politechnice Warszawskiej możliwe jest bowiem niezależne testowanie zarówno interfejsu wizyjnego, jak i płyty bazowej oraz przyjęcie rozwiązań umożliwiających sukcesywną weryfikację eksperymentalną kolejnych jej etapów. Opracowano dwa szczegółowe warianty schematów elektronicznych interfejsu wizyjnego modelu systemu w środowisku PADS LS Suite i podjęto decyzję o realizacji interfejsu z kodekami o rozdzielczości 8-bitowej.

W efekcie przyjętego wariantu postępowania, w CNPEP RADWAR SA, na podstawie schematu elektronicznego przygotowanego przez Politechnikę Warszawską, opracowano projekt i dokumentację technologiczną oraz wykonano pakiet interfejsu wizyjnego. Po jego uruchomieniu i przetestowaniu na Politechnice Warszawskiej rozpoczęto prace nad opracowaniem schematu elektronicznego płyty bazowej stanowiącej jądro platformy sprzętowej układu fuzji obrazów.

## 9. Kierunki dalszych prac

W najbliższej przyszłości planowana jest implementacja uogólnionego algorytmu korelacji fazowej, pozwalającego na wyznaczenie współczynników translacji, rotacji i skalowania obrazów. Przewiduje się, że pozwoli to na zwiększenie jakości obrazu uzyskanego w wyniku fuzji dzięki lepszemu dopasowaniu obrazów wejściowych. W tym przypadku należy się jednak liczyć z niewielkim wydłużeniem czasu obliczeń. Ostatnie badania i wyniki wykazały również celowość zastosowania blokowej wersji algorytmu korelacji fazowej, poprzez jego realizację w odniesieniu do bloków wydzielonych z obrazów. Pozwala to na uzyskanie lepszego dopasowania obrazów, zwłaszcza wówczas, gdy obraz posiada wyraźny plan. Prowadzone są też badania nad doбором filtrów o korzystniejszych charakterystykach częstotliwościowych.

Dodatkowo planowana jest możliwość implementacji alternatywnego algorytmu fuzji. Badaniom i ewentualnej poprawie będą podlegały parametry analizy falkowej oraz możliwość optymalizacji tych algorytmów pod kątem przyspieszenia wykonywanych działań matematycznych. Pożądane byłoby bowiem, aby docelowe rozwiązanie systemu UFO mogło uwzględniać co najmniej dwie metody fuzji i umożliwiać operatorowi wybór jednej z nich dla osiągnięcia maksymalnej skuteczności w rozpoznawaniu i śledzeniu celów z zastosowaniem głowicy obserwacyjnej.

Niezależnie od przewidywanych prac metodycznych i programowych będą kontynuowane prace nad rozwojem sprzętu. W szczególności planowane jest dokończenie prac nad modelem, poddanie go ocenie funkcjonalnej oraz testom odporności na wpływy środowiska i zaburzenia elektromagnetyczne. W efekcie tych prac zostanie zbudowany prototyp systemu, który będzie zainstalowany w bloku komputera centralnego systemu optoelektronicznego śledzenia. Jego przydatność i cechy użytkowe zostaną sprawdzone w warunkach rzeczywistych w czasie badań i testów poligonowych.

## 10. Literatura

- [1] Mitchell H.B.: Image Fusion. Theories, Techniques and Applications. Springer 2010.
- [2] Dwyer D., Hickman D., L., Riley T., Heather J., P., Smith M., I.: Real time implementation of image alignment and fusion on a police helicopter. Proc. SPIE, Vol. 6226, 2006, 11 pp.
- [3] Sims O., Irvine J.: An FPGA implementation of pattern-selective pyramidal image fusion. IEEE Proceedings of Field-Programmable Logic and Applications, FPL'2006, 1-4.
- [4] Waters T., Swan L., Rickman R.: Real-time Image Registration and Fusion in an FPGA Architecture (Ad-FIRE). Proc. SPIE 8042, April 2011, 6 pp.
- [5] Zitová B., Flusser J., Šroubek F.: Image Registration: A Survey and Recent Advances. ICIP 2005 Tutorial, 1-55.
- [6] Kondej M., Putz B., Bartyś M.: Szybki algorytm dopasowania obrazów dla potrzeb fuzji w czasie rzeczywistym. Pomiary Automatyka Robotyka, nr 11, 2010, 134-138.
- [7] Reddy B.S., Chatterji B.N.: An FFT-based technique for translation, rotation and scale-invariant image registration. IEEE Transactions on Image Processing, vol. 5, 1996, 1266-1271.
- [8] Antoniewicz A., Kondej M., Putz B.: Implementacja algorytmu dopasowania obrazów IR i TV w układzie FPGA. Rozdz. 27 w: Projektowanie, analiza i implementacja systemów czasu rzeczywistego, pod red. L. Trybusa i S. Samoleja, WKiŁ 2011, 329-340 (w druku).
- [9] Antoniewicz A., Jamrozik W., Kondej M., Putz B.: Sprzętowa realizacja fuzji obrazów metodą piramidy Laplace'a w systemach nadzoru i diagnostyki. Pomiary Automatyka Kontrola, vol. 57, nr 7/2011, str. 789-793.
- [10] Tao L., Ngo H., Zhang M., Livingston A., Asari V.: A Multi-sensor Image Fusion and Enhancement System for Assisting Drivers in Poor Lighting Conditions. Proceedings of the 34th Applied Imagery and Pattern Recognition Workshop, 2005, 1-6.