

Adrian ANTONIEWICZ¹, Wojciech JAMROZIK², Marcin KONDEJ³, Barbara PUTZ³¹WB ELECTRONICS S.A., ul. Poznańska 129/133, 05-850 Ożarów Mazowiecki²KATEDRA PODSTAW KONSTRUKCJI MASZYN, POLITECHNIKA ŚLĄSKA, ul. Konarskiego 18a, 44-100 Gliwice³INSTYTUT AUTOMATYKI I ROBOTYKI POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ, ul. św. Andrzeja Boboli 8, 02-525 Warszawa**Sprzętowa realizacja fuzji obrazów metodą piramidy Laplace'a w systemach nadzoru i diagnostyki****Mgr inż. Adrian ANTONIEWICZ**

Absolwent Wydziału Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej (2008) na specjalności Elektronika i Inżynieria Komputerowa. Obecnie pracownik firmy zajmującej się cyfrowymi systemami łączności. Jego zainteresowania obejmują problematykę związaną z projektowaniem systemów cyfrowych opartych na układach programowalnych, systemami łączności oraz przetwarzaniem obrazów w czasie rzeczywistym.



e-mail: aantoniew@gmail.com

Mgr inż. Wojciech JAMROZIK

Absolwent Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej. Od 2007 uczestnik studiów doktoranckich w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn. Podstawowe kierunki prac badawczych obejmują metody diagnostyki technicznej i termowizji, przetwarzania, analizy i rozpoznawania obrazów oraz fuzji informacji niepewnej w diagnostyce maszyn i procesów.



e-mail: wojciech.jamrozik@polsl.pl

Inż. Marcin KONDEJ

Absolwent studiów inżynierskich Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej (2010) na specjalności Robotyka. Jego zainteresowania obejmują problematykę systemów wizyjnych, algorytmów przetwarzania obrazów oraz ich implementacji w układach sprzętowych.



e-mail: marcin@kondej.eu

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

Streszczenie

Wiele współczesnych systemów nadzoru, monitorowania otoczenia czy diagnostyki procesów przemysłowych korzysta z optycznej kontroli powiązanej z akwizycją obrazów pochodzących z różnych źródeł. W artykule przedstawiono sposób implementacji w układzie FPGA przykładowego systemu diagnostycznego opartego na algorytmie fuzji obrazów metodą piramidy Laplace'a. System korzysta z dwóch kamer obserwujących ten sam obiekt (kamery termowizyjnej i kamery światła widzialnego) i działa w czasie rzeczywistym.

Słowa kluczowe: system monitorowania, kamera termowizyjna, sekwencje wideo, układy FPGA, fuzja w czasie rzeczywistym.

Hardware realization of the image fusion by Laplacian pyramid method in supervisory and diagnostic systems**Abstract**

Many supervisory, monitoring and diagnostics systems need to acquire and analyze multisensor visual information, for example two video sequences from TV and thermal (IR) camera. Thus, an image fusion algorithm [1-6] is necessary if we want to have one common image containing details of both input images. The paper presents a hardware implementation of the Laplacian pyramid algorithm ([1, 7], Fig. 1-3) for image fusion. Prior image registration is necessary, which is presented by the authors in other paper [8]. The Laplacian pyramid algorithm generates stable video sequences, without flickering or glow, and enables real-time implementation, necessary for supervisory and similar systems. Some results of testing of the algorithm are presented (Fig. 4, 5). The system has been realized on a chip making use of a single Altera Cyclone III FPGA (Fig. 6), with a 3-levels Laplacian pyramid module (Fig. 7, 8). The image fusion process execution time is below 10 ms, with a clock speed of 150 MHz. The presented system allows for quick reconfiguration and stands out from similar solutions [6, 11] with very good economical factors (Tab. 1). This enables realization of additional algorithms simply by adjoining new components to the Avalon bus.

Keywords: monitoring system, thermal camera, video sequences, FPGA circuits, real-time fusion.

1. Wprowadzenie

Zadaniem fuzji obrazów jest integracja obrazów prezentujących tą samą scenę lub jej fragment w celu wygenerowania syntetycznego obrazu, który będzie zawierał pożądane cechy wszystkich obrazów składowych. W optycznych systemach nadzoru i diagnostyki realizacja fuzji jest szczególnie pożądana ze względu na znaczne zredukowane analizowanego strumienia danych do pojedynczej sekwencji wideo posiadającej najważniejsze informacje ze wszystkich źródeł danych. Obrazy wejściowe w procesie fuzji mogą pochodzić z wielomodalnych sensorów, dokonujących akwizycji w różnym paśmie promieniowania (np. promieniowanie widzialne, podczerwień, promieniowanie X), mogą być rejestrowane tym samym urządzeniem w różnych chwilach czasu lub z różnych punktów obserwacyjnych, tak by na obrazach znajdowały się wspólne fragmenty sceny [1].

W celu przeprowadzenia procesu fuzji każdy z obrazów wejściowych należy poddać procesowi wstępnego przetwarzania oraz wyznaczania współczynników istotności danej informacji. Na przestrzeni lat nastąpił znaczny postęp nad badaniami algorytmów wyznaczających współczynniki fuzji [2-6]. Najczęściej stosowane metody fuzji można podzielić na:

- proste algorytmy fuzji
- algorytmy fuzji oparte na dekompozycji piramidalnej obrazów
- algorytmy fuzji oparte na analizie falkowej.

Proste algorytmy fuzji opierają się na podstawowych operacjach, takich jak wyznaczanie średniej ważonej oraz wybór maksimum lub minimum poszczególnych pikseli. Ważną ich zaletą jest mała złożoność obliczeniowa, co pozwala na realizację fuzji w czasie rzeczywistym. Metody te niestety często znacznie redukują ogólny kontrast obrazu, dlatego też nadają się do systemów, gdzie zapewniony jest odpowiedni kontrast i jasność obrazów, zatem w mniejszym stopniu nadają się do typowego systemu diagnostycznego.

Ważną grupę stanowią algorytmy oparte na dekompozycji piramidalnej. Opierają się one na podziale obrazu na podobrazy, które następnie poddawane są analizie, z której wyznaczane są współczynniki fuzji. Synteza wykonywana na tej podstawie po-

zwala na uwytatnienie poszczególnych informacji zawartych w wejściowych obrazach. W tej grupie metod można między innymi wyróżnić metody wykorzystujące piramidę Laplace'a, piramidę gradientów, piramidę kontrastów czy piramidę morfologiczną. Algorytmy te cechują się dobrymi wynikami fuzji. Posiadają jednak zwiększone wymagania obliczeniowe spowodowane licznymi filtracjami obrazów wejściowych.

Ostatnia, najnowsza grupa algorytmów oparta jest na analizie falkowej obrazów. Algorytmy te pozwalają uzyskać dobre wyniki, często uważane za subiektywnie najlepsze [4, 6], jednakże wiąże się to z dużymi wymaganiami obliczeniowymi, gdyż należy zapewnić stabilność wyjściowego sygnału wideo i brak migotania [5].

Spśród wielu algorytmów fuzji obrazów wykorzystujących przekształcenia wieloskalowe, grupa wykorzystująca piramidę Laplace'a znalazła szczególnie szerokie zastosowanie z dwóch powodów. Algorytm dekompozycji obrazów w piramidę i późniejsza synteza obrazu wyjściowego jest relatywnie niewymagający obliczeniowo. Dodatkowo algorytm ten zastosowany w procesie fuzji pozwala na działanie nie tyle na samych pikselach i wartościach ich jasności, a bardziej na cechach obrazów, takich jak krawędzie. Własność ta zapobiega występowaniu jasnych poświat wokół obiektów charakterystycznych dla niektórych algorytmów wykorzystujących inny rodzaj piramid, np. piramidę kontrastu [3].

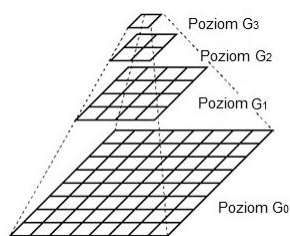
Ostatecznie więc algorytm korzystający z piramidy Laplace'a [7], oferujący dobry stosunek jakości fuzji do wymagań obliczeniowych, został wybrany do testowania w systemie diagnostycznym złożonym z kamer IR i TV, a następnie poddany implementacji sprzętowej.

W artykule przedstawiono podstawy teoretyczne algorytmu (rozdział 2), omówiono wyniki jego testowania na poziomie języków wyższego rzędu (rozdział 3) i opisano zasady implementacji sprzętowej, która umożliwiła działanie algorytmu w czasie rzeczywistym (rozdziały 4 i 5).

Jako podstawowe założenie przyjęto, że oba obrazy poddawane fuzji są do siebie dokładnie dopasowane co do wielkości i położenia na wspólnej płaszczyźnie. Dopasowanie obrazów, jako niezwykle istotny etap procesu przetwarzania obrazów kończącego się fuzją, i zasady implementacji algorytmów dopasowania w układzie FPGA są przedmiotem osobnych publikacji autorów [8].

2. Fuzja bazująca na piramidzie Laplace'a

Piramidy obrazów składają się z kopii obrazu oryginalnego poddanego pewnym operacjom przetwarzania (w tym decymacji pomniejszającej obraz). Ideowy schemat przedstawiający obrazy znajdujące się na poszczególnych stopniach piramidy został przedstawiony na rys. 1.



Rys. 1. Ideowy schemat piramidy obrazów
Fig. 1. The idea diagram of image pyramid

Na samym dole piramidy znajduje się oryginalny obraz G_0 . Na drugim stopniu piramidy znajduje się obraz G_1 , który powstał w wyniku filtracji dolnoprzepustowej i próbkowania obrazu G_0 . Kolejne obrazy piramidy powstają w wyniku filtracji i decymacji obrazu znajdującego się na poprzednim stopniu. Jeśli G_0 ma rozmiar $(2^N \times 2^N)$, możliwych jest do otrzymania $N+1$ poziomów piramidy G_0, \dots, G_N .

Formalnie kolejne obrazy generowane są w sposób iteracyjny, a obraz na poziomie $p \in (0, N)$ piramidy może zostać obliczony z zależności [7]:

$$G_p(i, j) = \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 w(m, n) G_{p-1}(2i+m, 2j+n) \quad (1)$$

gdzie: i, j – pozycja danego piksela obrazu, w – maska (jądro) filtra, m, n – indeksy współczynników filtra w masce. Powyższą operację można zapisać używając operatora redukcji *REDUCE*:

$$G_p = \text{REDUCE} [G_{p-1}]. \quad (2)$$

Jeśli w jest jądrem Gaussa postaci

$$w = \frac{1}{256} \begin{bmatrix} 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 6 & 24 & 36 & 24 & 6 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

to piramidę powstałą w wyniku zastosowania operatora *REDUCE* nazywamy piramidą Gaussa.

Operacją przeciwną jest podwojenie rozmiaru obrazu wejściowego w obu kierunkach podczas każdej iteracji, zapisywane za pomocą operatora rozszerzania *EXPAND*, który uzupełnia brakujące piksele poprzez interpolację z wykorzystaniem maski w filtra. Wyraża się to zależnością:

$$G_{p,k}(i, j) = 4 \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 w(m, n) G_{p,k-1} \left(\frac{i-m}{2}, \frac{j-n}{2} \right) \quad (4)$$

zapisywaną w postaci:

$$G_{p,k} = \text{EXPAND} [G_{p,k-1}] \quad (5)$$

gdzie $G_{p,k}$ oznacza obraz na poziomie $p=1, \dots, N$ piramidy poddany operacji rozszerzania k razy. To oznacza, że $G_{p,1}$ jest takiej samej wielkości jak G_{p-1} , a $G_{p,p}$ takiej samej wielkości, jak obraz pierwotny.

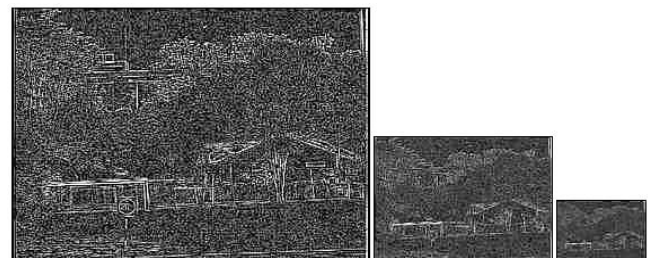
Mając daną piramidę Gaussa, można wyznaczyć piramidę Laplace'a, w której obrazy na kolejnych poziomach L_0, \dots, L_N są obrazami różnicowymi otrzymywanymi zgodnie z zależnością:

$$L_p = G_p - \text{EXPAND} [G_{p+1}] = G_p - G_{p+1}, \quad (6)$$

gdzie $p = 0, \dots, N-1$.

Ostatni obraz piramidy Laplace'a (L_N) nie może być wyznaczony jako obraz różnicowy, przyjmuje się więc na przykład, że jest przeskalowanym obrazem z niższego poziomu.

Przykładowe obrazy tworzące piramidę Laplace'a (bez obrazu ostatniego) pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Przykładowe obrazy tworzące piramidę Laplace'a
Fig. 2. Exemplary images constituting the Laplacian pyramid

Obrazy tego typu są z definicji bardzo ciemne, gdyż zawierają jedynie różnice pomiędzy obrazami z kolejnych poziomów piramidy Gaussa. Obraz na poziomie L_0 dokładnie uwydatnia cienie, drobne krawędzie, na wyższych poziomach piramidy obrazy uwydatniają bardziej zgrubne cechy, w postaci coraz szerszych krawędzi i pasów.

Piramida Laplace'a może być traktowana jako zbiór decymowanych obrazów, będących wynikami filtracji pasmowo przepustowej i próbkowania obrazów na każdym z poziomów. Pozwala ona odtworzyć obraz oryginalny, o wyższej rozdzielczości, ponieważ przechowuje informacje utracone podczas kolejnych etapów próbkowania tworzącego piramidę Gaussa.

Procedurę (6) zastosowaną dla uzyskania piramidy Laplace'a można więc odwrócić i w ten sposób zrekonstruować obraz pierwotny G_0 . Najpierw rozszerza się $G_N = L_N$, a potem dodaje do L_{N-1} , aby wygenerować G_{N-1} . Następnie G_{N-1} jest rozszerzane i dodawane do L_{N-2} , aby wygenerować G_{N-2} . Kontynuując tę operację można wygenerować obraz G_0 . Powyższą procedurę można zapisać w następujący sposób:

$$G_p = L_p + EXPAND [G_{p+1}] \quad (7)$$

gdzie $p=N-1, \dots, 0$ oraz $G_N = L_N$.

Procedura ta jest bardziej wydajna od równoważnej jej operacji odpowiedniego rozszerzenia wszystkich poziomów piramidy Laplace'a i ich zsumowania:

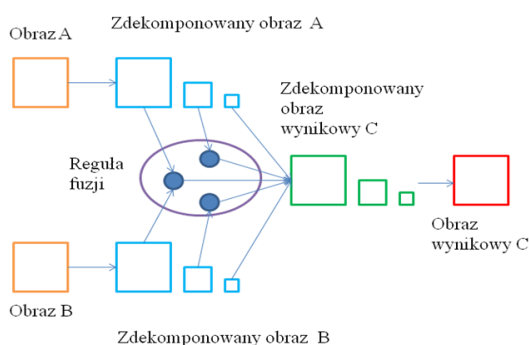
$$G_0 = \sum_{p=0}^N L_{p,p} \quad (8)$$

gdzie $L_{p,p}$ oznacza p -krotne rozszerzenie obrazu L_p za pomocą operatora $EXPAND$.

Algorytm fuzji obrazów z wykorzystaniem piramidy Laplace'a realizowany jest w trzech podstawowych etapach [7]:

- dekompozycja każdego z obrazów wejściowych do postaci piramidy Laplace'a,
- agregacja zdekomponowanych obrazów na każdym z poziomów piramidy z zastosowaniem odpowiedniej reguły fuzji,
- synteza obrazu na podstawie zagregowanej piramidy.

Schematyczną reprezentację algorytmu przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Schemat algorytmu fuzji obrazów z wykorzystaniem piramidy Laplace'a (na podstawie [1])

Fig. 3. Block diagram of image fusion realized using Laplacian pyramid (on the ground of [1])

W celu utworzenia piramidy zagregowanych obrazów można posłużyć się jedną z dwóch podstawowych metod [1]:

- selekcja – wartość jasności piksela na obrazie zagregowanym określana wskutek wyboru jednego z odpowiadających pikseli w obrazach wejściowych, w sposób odpowiedni dla danego zastosowania. Ta metoda stosowana jest dla obrazów znacznie się różniących, np. zarejestrowanych urządzeniami działającymi w różnych zakresach długości fali świetlnej;
- uśrednianie – wartość jasności piksela na obrazie zagregowanym określana jest obliczana za pomocą odpowiedniej zależno-

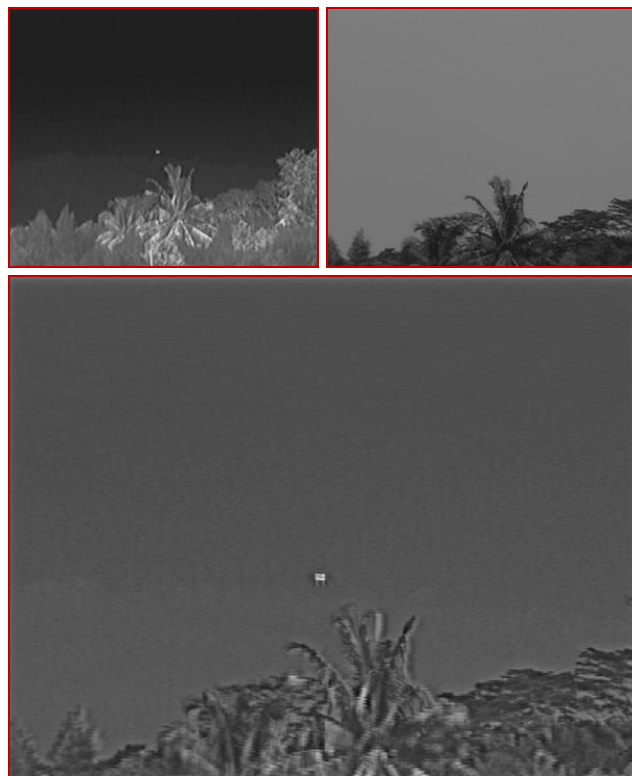
ści matematycznej uwzględniającej wartości jasności odpowiadających pikseli z wszystkich obrazów wejściowych. Metoda stosowana dla obrazów podobnych.

Implementując algorytm zdecydowano się na zastosowanie metody selekcji polegającej na wyborze piksela o maksymalnej wartości bezwzględnej. Metoda ta jest stosowana na wszystkich poziomach piramidy oprócz ostatniego. Ze względu na konieczność dokonania rekonstrukcji obrazu na podstawie piramidy obrazów zagregowanych, na ostatnim poziomie piramidy znajduje się uśredniony obraz z poprzedniego stopnia piramidy Gaussa (nie zaś obraz różnicowy).

3. Testy algorytmu

Algorytm przed podjęciem decyzji o realizacji sprzętowej został najpierw zaimplementowany w Matlabie, następnie w środowisku C++, na koniec zaś był testowany jako wtyczka napisana na poziomie języka ANSI C do prototypowej platformy testowej, w której modelowany był tok przetwarzania obrazów. Analiza jakości fuzji prowadzona była metodą subiektywnej jej oceny przez obserwatorów, zarówno w odniesieniu do pojedynczych obrazów, jak w stosunku do długich sekwencji otrzymanych w efekcie zastosowanego algorytmu fuzji.

Na rys. 4 przedstawiono obrazy wejściowe wykonane kamerą działającą w paśmie światła widzialnego oraz kamerą termowizyjną, istotne z punktu widzenia kontroli ruchu lotniczego. Analizowane obrazy miały rozdzielczość 640x480 punktów. O obecności samolotu świadczy jedynie ciepło emitowane przez silniki, widoczne na obrazie termowizyjnym. Pożądanym efektem działania algorytmu fuzji był więc obraz uwzględniający i uwypuklający położenie samolotu, jednocześnie oddający fakturę drzew, tak aby możliwe było jego zlokalizowanie w realnym środowisku.



Rys. 4. Obrazy IR i TV (u góry) oraz wynik fuzji (u dołu) wykonanej przy użyciu piramidy Laplace'a

Fig. 4. IR and TV images (top) and the image fusion result (bottom) realized using the Laplacian pyramid

Przeprowadzone dodatkowe testy pokazały, że niezależnie od stanu zachmurzenia (koloru tła) zastosowane w algorytmie uśrednianie obrazów na ostatnim stopniu dekompozycji, zapobiega

niebezpieczeństwu utraty ciepłych obiektów widocznych na obrazie IR, przy jednoczesnym występowaniu bardzo jasnego tła (zblizonego do bieli) na obrazie TV. Dodatkowo w zastosowanym algorytmie na każdym z poziomów piramidy obraz reprezentowany jest poprzez krawędzie występujące w obrazie wejściowym, a nie poziomy luminancji, co pozwoliło na uwydatnienie szczegółów poszczególnych obrazów.

Inną podstawową cechą fuzji obrazów jest adaptacyjność w przypadku, gdy oba obrazy zawierają podobne lub te same informacje. Ważne jest, aby ich fuzja uwzględniała prawdopodobieństwo interferencji informacji i w rezultacie możliwość ich utraty w obrazie wynikowym.

Na rys. 5 przedstawiono przykład danych z systemu monitorowania - obrazy testowe przedstawiające scenę w warunkach zimowych, gdzie jasny śnieg na obrazie termowizyjnym, ze względu na swoją temperaturę, jest ciemny. Testowany algorytm wyodrębnia najwyraźniejsze cechy występujące na obu obrazach. Cechy obrazu termowizyjnego, jako mniej wyraźnego, są mniej widoczne. Dominujący jest obraz zarejestrowany w paśmie widzialnym, został on wyostrzony, obiekty cieplejsze wyróżnione zostały delikatnym efektem halo, który nie ma jednak charakteru niepożądanego poświaty. Stwierdzono, że interferencja, jeśli występuje, może być pomijalna.



Rys. 5. Obrazy IR i TV (u góry) oraz wynik fuzji (u dołu) wykonanej przy użyciu piramidy Laplace'a

Fig. 5. IR and TV images (top) and the image fusion result (bottom) realized using the Laplacian pyramid

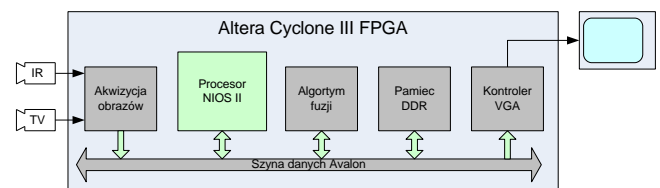
4. Implementacja algorytmu fuzji obrazów w układzie FPGA

Po weryfikacji działania zaproponowanego algorytmu w układzie testowym, zostały podjęte prace nad implementacją w rzeczywistym systemie przetwarzania obrazów. Analiza algorytmu fuzji obrazów metodą piramidy Laplace'a wskazała na potrzebę budowy systemu, który zapewni wysoką wydajność obliczeniową poprzez potokowe i równoległe przetwarzanie danych pochodzących z dwóch kamer. Dodatkowo system taki powinien posiadać przejrzysty sposób konfiguracji i obsługi.

Przy obecnym stanie techniki odpowiednim rozwiązaniem jest programowalny układ logiczny FPGA. Układy te dają bardzo

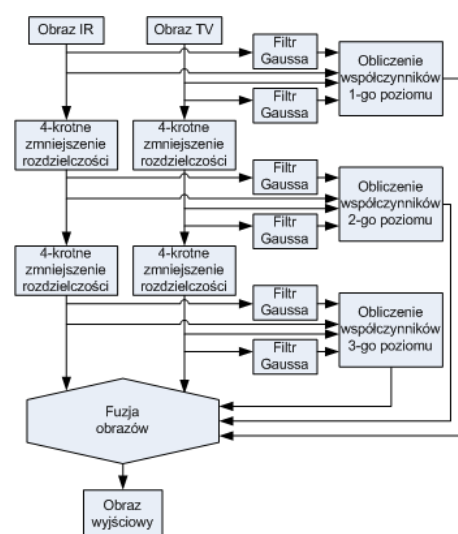
szerokie możliwości jednoczesnego przetwarzania wielu danych w sposób równoległy i potokowy. W ten sposób można zaprojektować bardzo efektywny moduł realizujący fuzję obrazów w czasie rzeczywistym. Opisany system został zaimplementowany w układzie Altera Cyclone III [9] w sposób przedstawiony na rys. 6.

Ważnym aspektem jest możliwość łatwej konfiguracji takiego systemu zbudowanego w układzie programowalnym. Zadaniem tym może zajmować się software'owy procesor NIOS II [10] zbudowany z układów logicznych dostępnych w FPGA. Do zadań procesora należy konfiguracja kodeków wideo, obsługa modułu obliczającego fuzję obrazów, poprawne zainicjalizowanie odpowiednich układów wejściowych oraz wyjściowych. Dodatkowym elementem takiego systemu jest pamięć DDR (która służy do lokalnego przechowywania poszczególnych klatek obrazów wejściowych i wyjściowych) oraz kontroler interfejsu VGA.



Rys. 6. Schemat blokowy systemu realizującego fuzję obrazów
Fig. 6. Block diagram of image fusion system

Implementowany algorytm fuzji obrazów składa się z dwóch części: dekompozycji oraz głównej syntezy. Pierwszy stopień obliczeń ma na celu wyznaczenie dla każdego piksela obrazu współczynników niezbędnych do późniejszej fuzji (rys. 7). Jest to realizowane poprzez filtrację fragmentu obrazu filtrem Gaussa o współczynnikach przedstawionych w rozdziale 2 wzorem (3). W wybranym algorytmie dodatkowo zastosowano trójpoziomą piramidę Laplace'a. W rezultacie na każdym stopniu dekompozycji rozdzielczość przetwarzanych obrazów zmniejszana jest czterokrotnie.



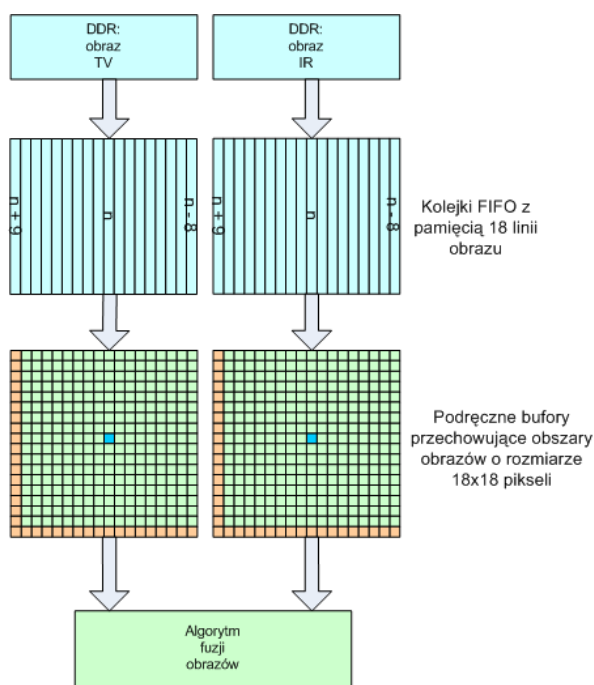
Rys. 7. Schemat blokowy modułu realizującego fuzję obrazów metodą trójpoziomowej piramidy Laplace'a

Fig. 7. Block diagram of image fusion module for realization of 3-levels Laplacian pyramid

Zastosowany filtr Gaussa oraz późniejsze dekompozycje wymagają natychmiastowego dostępu do wielu komórek obrazu i wartości pośrednich. Przechowywanie tych danych w pamięci dynamicznej DDR pociągałoby za sobą konieczność wielokrotnych odczytów poprzez magistralę danych, co znacznie zmniejszyłoby szybkość działania systemu. Dlatego też wszystkie obliczenia wykonywane są w sposób potokowy i równoległy na pod-

stawie tymczasowych wyników pośrednich, bez konieczności odwoływania się do pamięci DDR. W opisywanym systemie jest to realizowane poprzez blok, którego schemat przedstawiony jest na rys. 8.

Dane wyjściowe w postaci tablic o rozmiarach 18x18 pikseli wypełnione są fragmentami obrazów, w których aktualnie przetwarzany piksel znajduje się w siódmej kolumnie siódmego wiersza. Dostęp do wszystkich komórek w buforze może się odbywać równolegle. Rozmiar każdej z tablic jest konsekwencją zastosowania 3 stopni piramidy Laplace'a oraz filtra Gaussa o jądrze 5x5 - pierwszy stopień algorytmu wymaga dostępu do fragmentu obrazu o rozmiarze 5x5 pikseli, drugi 9x9, natomiast trzeci 17x17. Dodatkowo 18 kolumna i 18 wiersz wykorzystywane są do przygotowywania danych niezbędnych przy kolejnych krokach algorytmu, co stwarza możliwość wykonywania obliczeń potokowo. Fragmenty obrazów IR i TV o wielkości 17x17 pikseli, pochodzące z lokalnego bufora, służą jako dane wejściowe dla kolejnych filtrów Gaussa na poszczególnych stopniach dekompozycji. Stosując wzory opisane w punkcie 2 w rezultacie otrzymujemy zestaw współczynników, które wykorzystywane są w procesie właściwej fuzji obrazów.



Rys. 8. Schemat bloku przygotowującego dane wejściowe dla algorytmu fuzji
Fig. 8. Diagram of the block preparing input data for fusion algorithm

5. Wyniki implementacji

Tak zrealizowany na platformie FPGA algorytm taktowany jest sygnałem zegarowym 150 MHz. Dzięki zastosowaniu równoległego oraz potokowego przetwarzania danych algorytm fuzji wykonywany jest w czasie poniżej 10 ms, co w przypadku typowych kamer można uznać za realizację w czasie rzeczywistym. W tabeli 1 przedstawione zostały wykorzystane zasoby sprzętowe układu FPGA.

Można zauważyć, że prezentowany system w porównaniu do podobnych rozwiązań, podanych na przykład w [6] czy [11], wymaga niewielkiej pamięci wewnętrznej oraz niedużej liczby układów mnożących i układów logicznych. Pozwala to na realizację dodatkowych algorytmów przetwarzania obrazów, poprzez zastosowanie nowych komponentów dołączanych do magistrali procesora NIOS. Możliwe jest również wykorzystanie opracowanego systemu do fuzji obrazów barwnych poprzez wykonywanie obliczeń dla 3 kanałów barw [6].

Opisywane rozwiązanie wraz z zaimplementowanym w układzie FPGA algorytmem dopasowania obrazów [8], może stanowić pełen układ przetwarzania obrazów na potrzeby systemów nadzoru i diagnostyki, zrealizowany w jednym układzie scalonym.

Tab. 1. Wykorzystane zasoby układu Altera Cyclone III FPGA
Tab. 1. Resources of Altera Cyclone III FPGA used in fusion system

Zasoby	Wykorzystane	Dostępne	Zużycie [%]
Logic Cells	17360	119088	14
Registers	7552	119088	6
Memory Bits	617472	3981312	15
DSP elements	0	576	0

6. Podsumowanie

Zaprojektowany system stwarza możliwość efektywnej realizacji algorytmu fuzji obrazów w pojedynczym układzie FPGA. Dodatkowo poprzez zastosowanie podejścia modułowego uzyskano wysoką elastyczność, łatwość konfiguracji oraz dużą szybkość działania zrealizowanego algorytmu. Opracowany testowy system można w łatwy sposób dostosować do różnych formatów obrazów wejściowych poprzez zaimplementowanie odpowiedniego wstępnego przetwarzania danych wejściowych. Zastosowanie wbudowanego procesora NIOS dodatkowo pozwala na realizację dużych systemów przetwarzania danych diagnostycznych opisanych zarówno w języku C, jak i VHDL.

Praca wykonana częściowo w ramach projektu rozwojowego MNiSW nr O R00 0019 07.

7. Literatura

- [1] Burt P.J., Kolczynski R.J.: Enhanced image capture through fusion, Computer Vision, 1993. Proceedings, Fourth International Conference on, pp.173-182, 1993.
- [2] Dong J., Zhuan D., Huang Y., Fu J.: Advances in Multi-Sensor Data Fusion: Algorithms and Applications. Sensors 2009, 9, 7771-7784.
- [3] Sadjadi F.: Comparative Image Fusion Analysis, Computer Vision and Pattern Recognition – Proceedings of the 2nd Joint IEEE International Workshop on Object Tracking and Classification in and Beyond the Visible Spectrum OTCBVS05. Pages: W01-13-1-W01-13-8, 2005.
- [4] Mohamed M.A., El-Den B. M.: Implementation of Image Fusion Techniques Using FPGA. IJCSNS International Journal of Computer science and Network Security, VOL. 10, no 5, May 2010, 95-102.
- [5] Rockinger O.: Image Sequence Fusion Using a Shift-Invariant Wavelet Transform. ICIP '97 Proceedings of the 1997 International Conference on Image Processing, vol. 3, 4 pp.
- [6] 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.
- [7] Burt P. J., Adelson E. H.: The Laplacian Pyramid as a Compact Image Code, IEEE Transactions on Communications, vol. 31, pp. 532-540, 1983.
- [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] Altera, Cyclone III Device Handbook – Volume 1,2, 2010. http://www.altera.com/literature/hb/cyc3/cyclone3_handbook.pdf
- [10] Altera, NIOS II Processor Reference Handbook, 2010. http://www.altera.com/literature/hb/nios2/n2cpu_nii5v1.pdf
- [11] Sims O., Irvine J.: An FPGA implementation of pattern-selective pyramidal image fusion. IEEE Proceedings of Field-Programmable Logic and Applications, FPL'2006. pp 1-4.