

AGH

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

**WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI,
INFORMATYKI I INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ**

KATEDRA AUTOMATYKI I INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ

ROZPRAWA DOKTORSKA

Artur Zawadzki

Rekonfigurowalny sterownik urządzenia ruchomego oparty na
sprzężeniu wizyjnym wykorzystującym algorytm śledzenia obiektu

PROMOTOR:

dr hab. inż. Marek Gorgoń, prof. AGH

Kraków 2014

1 Wstęp

1.1 Motywacja

Zagadnienia śledzenia obiektów mogą znajdować zastosowanie wszędzie tam, gdzie istnieje konieczność obserwacji otoczenia i reagowania na zmiany w nim zachodzące bez udziału operatora. W ostatnich latach obserwuje się duży rozwój systemów monitoringu. Zwiększanie liczby kamer monitorujących wywołuje duże trudności obserwacyjne. Operator kamer musi na bieżąco obserwować nieraz dziesiątki obrazów, z których część jest przez większość czasu statycznych, podczas gdy inne charakteryzują się dużą ilością zmiennej treści. Zdarza się też, że obiekt warty obserwacji przemieszcza się poza obszar widziany przez daną kamerę. W takiej sytuacji, gdy pojedyncza kamera ma za zadanie obserwować obszar większy niż jej pole widzenia, stosuje się kamery wyposażone w ruchome głowice. Łatwo można sobie wyobrazić sytuację, w której operator takiej kamery jednak nie zauważy w porę sytuacji wymagającej reakcji, obiekt obserwowany opuści pole widzenia kamery, a kamera nie zostanie obrócona w jego kierunku. Wówczas poza zakresem obserwacji mogą zajść wydarzenia, które nie zostaną zarejestrowane, a ewentualna akcja z nimi związana nie zostanie podjęta. Rozwiązaniem zapobiegającym takim zdarzeniom mogłoby być zastosowanie kamery, która automatycznie wykrywałaby i obserwowała poruszający się w jej polu widzenia obiekt, nie powodując utraty potencjalnie ważnych informacji.

Kamery posiadające funkcję interakcji z otoczeniem nazywane są kamerami inteligentnymi. Istnieje wiele strategii wskazujących, jak zachowywać ma się taka kamera. Jedną z możliwych jest funkcja śledzenia. Pełnione funkcje zależą od stopnia zaawansowania całego systemu, a możliwości śledzenia znacznie zwiększa obecność sterowania położeniem urządzenia. Wymaga to obecności sterownika, którego zadaniem jest określenie sygnałów dla modułów wykonawczych decydujących o orientacji kamery. Sterownik taki może być w znacznym stopniu autonomiczny i samodzielnie podejmować decyzję o śledzeniu. Istotnym zagadnieniem jest przy tym szybkość reakcji urządzenia. Z jednej strony wymagane jest szybkie przetwarzanie obrazu, z drugiej określenie wartości sygnałów sterujących położeniem kamery tak, aby obiekt śledzony utrzymywany był w polu widzenia kamery.

Autor postanowił skupić się na budowie kamery zdolnej do śledzenia i podążania za obiektem. Potencjalnych obszarów zastosowań jest oczywiście bardzo wiele, między innymi zadania monitoringu miejsc publicznych, nadzoru samotnie mieszkających osób starszych i inne zastosowania telemedycyny. Równie korzystne byłoby stosowanie inteligentnych kamer do sterowania oświetlenia, na przykład scenicznego, w czasie przedstawień teatralnych bądź koncertów. Możliwe byłoby również użycie ich do interaktywnego oświetlenia przestrzeni wystawowych, w muzeach czy galeriach, jako systemów reagujących na obecność widza. Cechą wspólną takich urządzeń powinna być autonomiczność, praca w czasie rzeczywistym, kompaktowe rozmiary, a także energooszczędność.

W zamiarze Autora, skonstruowanie kamery inteligentnej z wykorzystaniem układu reprogramowalnego, pozwoli na implementację, testowanie i ewaluację algorytmów śledzenia. Możliwe będzie dzięki temu określenie, w jakim stopniu kamera inteligentna będzie przydatna w zadaniach śledzenia w czasie rzeczywistym, a także jakie ograniczenia niesie za sobą takie rozwiązanie. Równocześnie możliwe będzie przeanalizowanie różnych architektur systemu obliczeniowego i konfiguracji układu reprogramowalnego.

1.2 Cele i teza pracy

Celem pracy było skonstruowanie i zbadanie możliwości wykorzystania, w zadaniach śledzenia obiektu ruchomego, zintegrowanego urządzenia wizyjnego, które również znajdujące się w ruchu. Zintegrowanie systemu wykonawczego z kamerą i jednostką obliczeniową stosowane jest względnie rzadko [1]. W takich przypadkach, w celu zapewnienia odpowiednich mocy obliczeniowych, wystarczających do wykonywania zadań przetwarzania i analizy obrazów, przy zachowaniu wymagań dotyczących systemów typu *embedded*, korzystne jest stosowanie układów rekonfigurowalnych [2][3]. Wykorzystanie układu FPGA daje możliwość realizacji zadań obliczeniowych w czasie rzeczywistym, zazwyczaj przy znacznej liczbie klatek obrazu przetwarzanych na sekundę, niskim zużyciu energii i kompaktowych rozmiarach urządzenia [4]. Te kryteria są szczególnie ważne w rozpatrywanym zagadnieniu, co znajduje odzwierciedlenie w postawionej tezie pracy, która brzmi:

ADAPTACJA I ZRÓWNOLEGLIENIE ALGORYTMÓW ŚLEDZENIA OBIEKTÓW I ICH IMPLEMENTACJA
NA REKONFIGUROWALNEJ PLATFORMIE OBLICZENIOWEJ, POZWOLI NA REALIZACJĘ SPRZĘŻENIA
WIZYJNEGO W STEROWNIKU KONTROLUJĄCYM W CZASIE RZECZYWISTYM URZĄDZENIE
RUCHOME.

Przedmiotem niniejszej pracy jest skonstruowanie urządzenia względnie taniego, łatwego w ewentualnej produkcji. Urządzenie powinno stanowić niezależny, zwarty gabarytowo i energooszczędny składnik systemu monitorowania, nadzoru lub sterowania automatycznego, zdolnego reagować na ruch obiektu znajdujący się w polu widzenia kamery. Ze względu na uniwersalną architekturę urządzenia, możliwe jest zastosowanie go w całej gamie mobilnych aparatów stosowanych w urządzeniach automatyki i robotyce [5], w tym wykorzystanie tego typu systemów do śledzenia osób w systemach monitoringu, nadzoru, w telemedycynie, w systemach wykrywających obecność ludzi w zasięgu jego działania, a także w inteligentnych systemach oświetlenia [6], interaktywnie iluminujących otoczenie.

1.3 Stan wiedzy

Inteligentne kamery (ang. *smart cameras*, *intelligent cameras*) są urządzeniami, które integrują w sobie funkcje akwizycji obrazu oraz system przetwarzania i analizy obrazu, a celem tego nie jest jedynie poprawa jakości rejestrowanego obrazu, lecz uzyskanie określonej zawartej w nim informacji. Sygnałem wyjściowym zatem nie musi być obraz, ale może być to zestaw jego cech, wektory ruchu poruszających się obiektów, informacja o typach i lokalizacji obiektów. Ponadto kamera inteligentna może podejmować akcje, takie jak zmiana kierunku obserwacji, stopnia powiększenia czy parametrów ekspozycji, a także generować komunikaty do systemu nadzorczego. Może być wykorzystana do sterowania ramieniem manipulatora czy nawet całym poruszającym się obiektem (na przykład pojazdem samobieżnym, autonomicznym samochodem).

Według Automated Imaging Association (AIA), organizacji skupiającej podmioty zaangażowane w zagadnienia między innymi wizji maszynowej, kamera inteligentna powinna się charakteryzować następującymi cechami [7]:

- integracja w urządzeniu kluczowych funkcji, takich jak na przykład optyka, oświetlenie, system akwizycji obrazu, przetwarzanie obrazu,
- użycie jednostki obliczeniowej i oprogramowania w celu realizacji pewnej inteligencji,
- zdolność do realizacji powierzonych funkcji bez zewnętrznej ingerencji.

Wynik przeglądu i analizy dostępnych rozwiązań kamer inteligentnych z układami FPGA wskazuje na to, że zintegrowane kamery wyposażone w możliwość ruchu nie są urządzeniami powszechnie spotykanymi. Możliwe jest ich zestawienie z niezależnych urządzeń – głowicy i kamery. Jedną z nielicznych konstrukcji tego typu jest kamera opisana w [8], składająca się z karty z układem Virtex-II i kamery typu PTZ (ang. *pan-tilt-zoom*, czyli mającej możliwość obrotu wokół dwóch osi i funkcję powiększania optycznego). W większości przypadków jednak układy FPGA realizują funkcje wstępnego przetwarzania, ewentualnie kompresji, dość często stanowią swoisty interkonektor pośredniczący w przepływie danych obrazowych do mikroprocesorowych jednostek obliczeniowych. Ze względu na charakter obliczeń, w którym wymagane są duże pojemności pamięci do akwizycji obrazów o dużych rozdzielczościach, w urządzeniach takich prawie zawsze używane są pamięci dynamiczne. Na tym tle opisana w rozprawie inteligentna kamera znacząco się wyróżnia – zawiera zintegrowane w obudowie urządzenia elementy wykonawcze zapewniające zmianę położenia i wykorzystuje wyłączenie pamięci statyczne.

Do przechowywania danych zastosowano wiele modułów pamięci statycznej RAM, połączonych bezpośrednio z układem FPGA. Zastosowanie pamięci statycznych daje sporo korzyści, ze względu na łatwy i szybki dostęp do danych. Dostęp do każdej lokacji adresowej odbywa się z tą samą prędkością, niezależnie od tego, do której lokacji adresowej odbywał się poprzedni dostęp. Oznacza to, że możliwy jest zapis lub odczyt danych w dowolnej kolejności bez żadnych zbędnych opóźnień. Jest to główna różnica w stosunku do pamięci dynamicznych, w których szybki dostęp do danych (zorganizowanych w macierz) jest możliwy w obrębie danego wiersza, zmiana kolumny wnosi zaś pewne opóźnienia. Ponadto odczyt pamięci niesie konieczność odświeżania ładunku, co powoduje dodatkowe opóźnienia. Zaletą pamięci dynamicznych jest z kolei większa pojemność (wynikająca z mniejszego kosztu produkcji). W przypadku skonstruowanej kamery inteligentnej przewidziana pojemność (osiem pamięci o pojemności 2 MB każda) jest jednak w pełni wystarczająca dla przewidywanych zadań.

2 Zawartość rozprawy

Rozprawę podzielono na 7 rozdziałów, w których starano się w sposób metodyczny przejść od podstaw teoretycznych, poprzez opis budowy inteligentnej kamery, aż po implementację algorytmu śledzenia obiektu i dyskusję uzyskanych wyników.

W rozdziale 1: „Wstęp” przedstawiono wprowadzenie do tematyki rozprawy, a więc omówiono istotę wybranego kierunku badań, możliwe i wybrane sposoby jego realizacji. Przedstawiono cel, tezę oraz zawartość rozprawy.

W rozdziale 2: „Przegląd literatury” zaprezentowano, na podstawie badań literaturowych, rozwój idei inteligentnych kamer na przestrzeni lat i przegląd algorytmów śledzenia obiektów.

W rozdziale 3 : „Zagadnienia teoretyczne i ich weryfikacja” nakreślono teoretyczne podstawy realizowanego zadania, a więc wyjaśniono, czym są układy FPGA, przedstawiono podstawy geometrycznych przekształceń obrazu i wybranych algorytmów przetwarzania i analizy obrazów, opisano użyty algorytm śledzenia obiektu wraz z jego weryfikacją programową, a także omówiono zagadnienia związane z dynamiką ruchomej kamery. Ponadto przedstawiono wyniki implementacji zastosowanego w pracy algorytmu detekcji krawędzi w układach FPGA.

W rozdziale 4 : „Konstrukcja urządzenia” opisano najważniejsze i kluczowe dla działania urządzenia szczegóły jego budowy, wraz z wyszczególnieniem najważniejszych elementów składowych.

W rozdziale 5 : „Implementacja w FPGA” przedstawiono metodologię projektowania układów FPGA i założenia implementacyjne oraz zebrano opisy bloków projektu odpowiedzialnych za poszczególne etapy algorytmu, z odniesieniami do odpowiednich podrozdziałów z rozdziału 3.

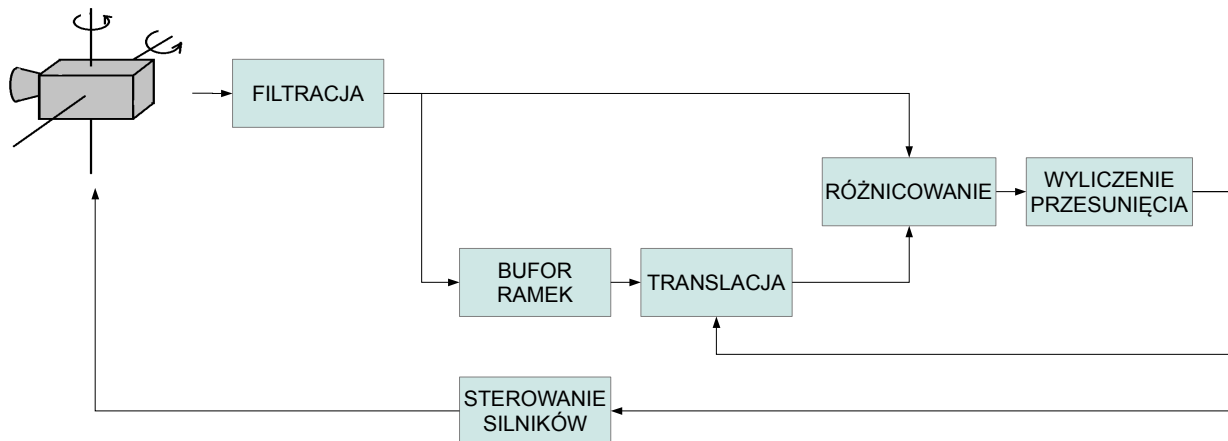
W rozdziale 6 : „Uruchamianie i testowanie” zaprezentowano wyniki doświadczalne uzyskane w trakcie pracy kamery inteligentnej w różnych warunkach otoczenia i dla różnych śledzonych obiektów. Przeanalizowano skuteczność i osiąganą szybkość śledzenia. Ponadto rozważono zagadnienia energetyczne i związane z wydajnością zastosowanego układu.

W rozdziale 7 : „Podsumowanie” dokonano zebrania najważniejszych rezultatów rozprawy, przeprowadzono dyskusję ze wskazaniem możliwych dalszych kierunków prac oraz sformułowano wnioski.

W załącznikach przedstawiono szczegółowe schematy ideowe części elektronicznej, projekty płytek PCB oraz protokół komunikacyjny interfejsu nadzorczego.

3 Zastosowany algorytm śledzenia obiektu

Ogólny schemat blokowy przepływu danych w algorytmie śledzenia obiektu przedstawiony jest na rysunku 3-1.



Rysunek 3-1: Schemat ogólny przepływu danych algorytmu

Algorytm śledzenia obiektów składa się z kilku kroków – akwizycji obrazu, filtracji wstępnej, bufora ramek, modułu translacji (opcjonalnego) przesuwanego obraz na podstawie znanego obrotu kamery pomiędzy kolejnymi zarejestrowanymi obrazami, bloku różnicowania, wyliczenia przesunięcia oraz modułu sterowania silnikami. Kluczowy z punktu widzenia algorytmu jest etap różnicowania. Na podstawie obu obrazów – aktualnego oraz historycznego, wyliczany jest szereg cech, mających na celu określenie, które obszary obrazu zmieniły się. Moduł różnicowania określa, w którym obszarze obrazu różnicowego zaszły istotne zmiany, które z wystarczającym prawdopodobieństwem wskazują na to, że w obszarze tym zaszedł ruch śledzonego obiektu. Jako wejście dla modułu różnicowania brane są obrazy aktualny (n) oraz przesunięty historyczny (n-1). Pomiędzy zarejestrowaniem obrazów (n-1) i (n) kamera zmieniła kierunek obserwacji, który jest znany, zatem przesunięcie obrazu (n-1) wykonane jest na podstawie informacji o zmianie kątów obserwacji kamery α i β [9] oraz relacji 3-1 i 3-2:

$$x' = x \cos \alpha - f \sin \alpha \quad (3-1)$$

$$y' = x \sin \alpha \sin \beta + y \cos \beta + f \cos \alpha \sin \beta \quad (3-2)$$

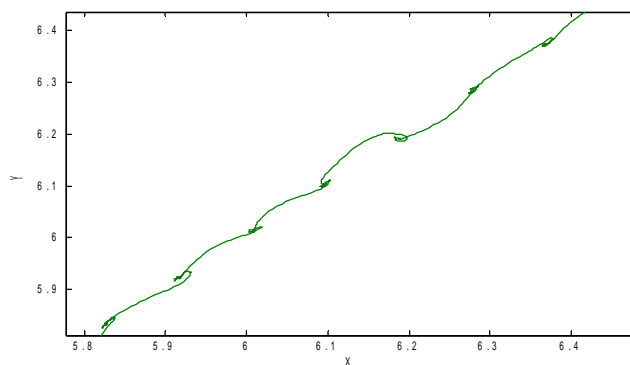
gdzie α i β to kąty obrotu kamery wokół dwóch osi, f to ogniskowa kamery, a x i y oraz x' i y' to współrzędne punktów odpowiednio przed i po translacji.

Odpowiadające sobie obszary obrazów mogą być ze sobą porównywane. Obszar porównywalny jest częścią pełnego obrazu, ze względu na to, że część zaobserwowana poprzednio znalazła się poza kadrem. Z kolei na nowym obrazie pojawił się niewidoczny wcześniej fragment.

Część obrazów, która może być bezpośrednio porównywana, dzielona jest na obszary. Obszary mogą być prostokątnego kształtu, dzieląc porównywany obszar na matrycę $i \times j$ elementów. Dla każdego wydzielonego elementu, dla obu obrazów, liczona jest cecha lub zestaw cech. Cechami tymi może być struktura krawędzi, składowe kolorów lub inne.

Jeżeli w obserwowanej scenie śledzony obiekt poruszył się, to cechy w elementach obrazów w obszarze ruchu będą się różnić. Pozwoli to na określenie, w której części aktualnego obrazu zaszedł ruch. Odległość środka ciężkości tego obszaru od centrum obrazu, czyli osi optycznej kamery, pozwoli wyznaczyć kąt kolejnego obrotu kamery, aby śledzony obiekt znalazł się w centrum obserwowanej sceny. Jeżeli w porównywanym obszarze nie zostanie wykryty żaden ruch, kamera powinna się zatrzymać. Po upływie czasu niezbędnego do zatrzymania kamery system powinien przejść do śledzenia statycznego. Algorytmicznie nic się nie zmienia, z wyjątkiem braku przesuwania obrazu historycznego, gdyż kamera w tym przypadku jest nieruchoma. Śledzenie statyczne ma również miejsce przy pominięciu translacji w uproszczonej wersji algorytmu.

Kamera znajduje się w ruchu, stąd też trzeba uwzględnić kilka zjawisk, do których należy przystosować sposób porównywania ze sobą dwóch obrazów. Nie można założyć, że piksel $P=(x_1, y_1)$ z obrazu pierwszego będzie odpowiadał pikselowi $P=(x_2, y_2)$, który powstał przez transpozycję obrazu.



Rysunek 3-2: Symulacja kamery - fragment trajektorii

Pierwszym z powodów jest fakt, że kamera znajdująca się w ruchu narażona jest na ciągłe drgania, wynikające z niedostatecznej sztywności mechanicznej układu oraz typu zastosowanego napędu (wyniki symulacji – rysunek 3-2). Silniki krokowe charakteryzują się tym, że w odpowiedzi na sterowanie wykonują obrót o jeden krok w wybranym kierunku. Krok taki odpowiada pewnemu kątowi, wynikającemu z konstrukcji silnika i wynosi typowo od 1,8 stopnia do nawet kilkudziesięciu stopni. W efekcie obrotu silnika mają

charakter impulsowy, co w przypadku połączenia z przekładnią redukcyjną powoduje przenoszenie drgań na kolejne stopnie przekładni. Można to zaobserwować jako głośnie pracę układu i wyczuwalną impulsowość wykonywanego ruchu, zwłaszcza przy wolnych obrotach. Zastosowanie sterowania mikro krokowego silnika pozwala co prawda zminimalizować ten efekt, lecz zawsze będzie on wyczuwalny.

Zastosowania silnika z przekładnią redukcyjną niesie również za sobą występowanie nieuniknionych luzów. Oznacza to, że funkcja opisująca obrót kamery jest nieliniowa. Wyjście układu mechanicznego, którym jest obrót kamery, nie jest w początkowej fazie ruchu powiązane liniowo z wejściem, którym jest obrót silnika. Wobec tego może się zdarzyć, że małe co do wartości żądanie obrotu kamery nie spowoduje wykonania żadnego ruchu na końcu układu. Ruch kamery dokona się dopiero po skasowaniu wszystkich luzów. Stąd też wyliczenie dokładnego przesunięcia pomiędzy obrazami w zależności od zadanego kąta obrotu nigdy nie będzie dokładne.

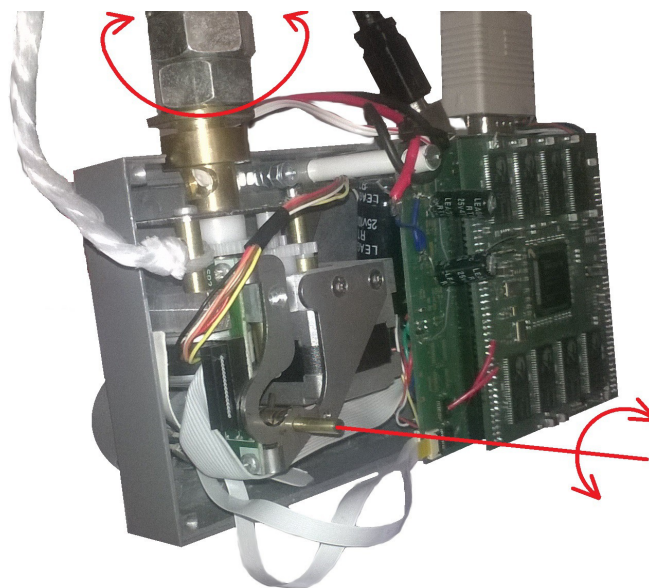
Należy jeszcze uwzględnić, że oś optyczna kamery nie znajduje się dokładnie na przecięciu osi obrotu X oraz Y. W efekcie relacja wiążąca przesunięcie obrazów i kąt obrotu kamery nie jest ściśła. Błąd wnoszony przez przyjęte założenie pokrywania się osi optycznej z przecięciem prostopadłych osi obrotów jest tym większy, im bliższe obiekty są obserwowane.

Nie można również zapomnieć, że obraz rejestrowany przez kamerę CMOS charakteryzuje się występowaniem szumu. Wobec tego wartości tego samego piksela nawet przy nieruchomej kamerze będą się nieznacznie różnić, zwłaszcza w przypadku złych warunków oświetlenia.

4 Skonstruowana kamera inteligentna

4.1 Budowa

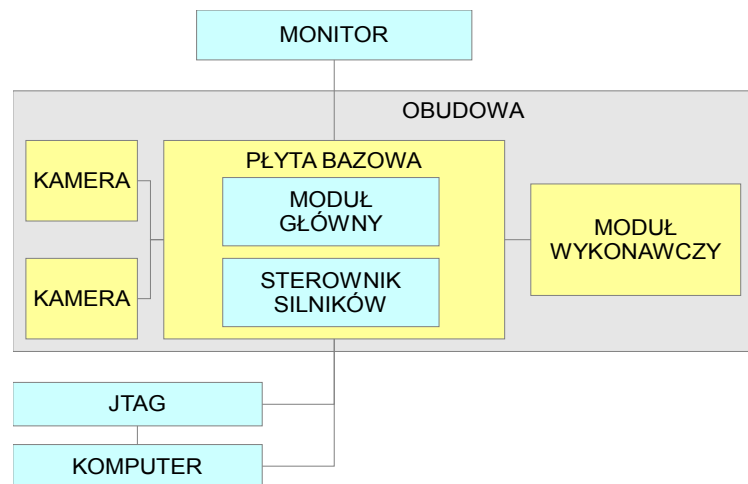
W ramach pracy zbudowano urządzenie, przedstawione na rysunku 4-1, które stanowi połączenie kamery, rekonfigurowalnego sterownika i napędu [10][11].



Rysunek 4-1: Skonstruowana inteligentna kamera

Dzięki temu stanowi bazę dla implementacji w układzie FPGA algorytmu śledzenia ruchomego obiektu, na podstawie rejestrowanego przez kamerę obrazu. Napęd umożliwia z kolei zmianę kierunku patrzenia kamery. Założony zakres ruchu kamery to pełen obrót o 360 stopni i możliwość pochylenia od 0 do -90 stopni.

Ogólny schemat blokowy skonstruowanego urządzenia przedstawiono na rysunku 4-2. Urządzenie składa się z kilku podstawowych części: elektronicznego modułu sterującego zawierającego układ reprogramowalny, kamery CMOS, a także zespołu napędowego i obudowy, zapożyczonych z oprawy oświetleniowej, której Autor był głównym konstruktorem [12][13][14].



Rysunek 4-2: Budowa ogólna

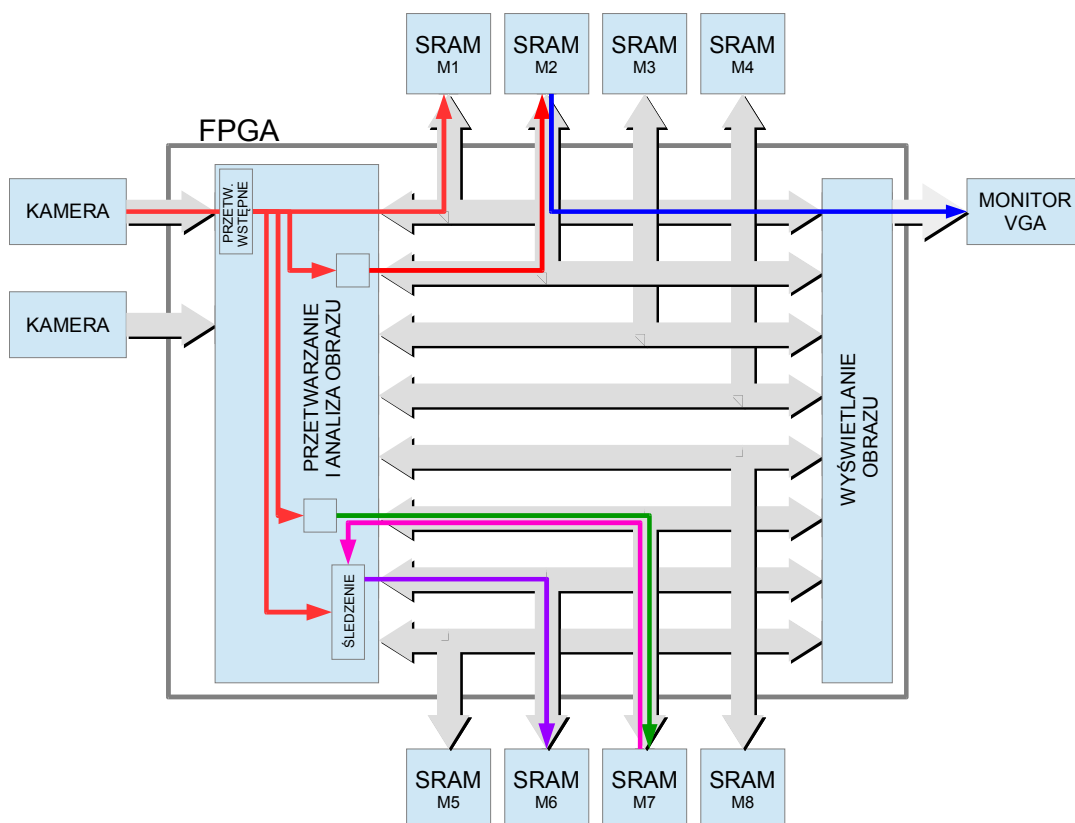
Elektroniczny moduł sterujący zbudowany jest w oparciu o płytę bazową, na której umieszczone są między innymi złącza, służące do podłączenia płytki modułu głównego oraz płytki sterownika silników. Całość umieszczona jest wraz z modułem wykonawczym (zespołem napędowym) w obudowie. Urządzenie mocowane jest do punktu zaczepienia za pionową oś o zakresie ruchu 0..360 stopni. Z kolei do drugiej, poziomej osi obrotu, o zakresie ruchu 0..-90 stopni, istnieje możliwość zamontowania jednej lub dwóch miniaturowych kamer. Do konfigurowania urządzenia używa się interfejsu JTAG, który podłączony jest do komputera. Z komputerem istnieje również połączenie przez interfejs USB. Urządzenie wyposażone jest w gniazdo VGA służące do podłączenia monitora w celu podglądu rejestrowanego obrazu. Napędem urządzenia jest zestaw składający się z dwóch silników krokowych, z których moment napędowy przenoszony jest przez dwie przekładnie – ślimakową do osi poziomej i zębatą prostą do osi pionowej.

Sterownik silników krokowych umieszczony jest na osobnej płytce, jako niezależny moduł podłączany do płyty bazowej. Dzięki temu możliwe jest stosowanie dowolnego sterownika silników, bez przeprojektowywania reszty systemu.

Płytkę PCB modułu głównego, zawierającego układ reprogramowalny i zasoby pamięciowe, zaprojektowano jako płytkę 6-warstwową. Projektując płytkę dla systemu zawierającego układ FPGA o wysokiej skali integracji i mogącego pracować z dużymi częstotliwościami oraz szybkich pamięci statycznych, trzeba było wziąć pod uwagę wiele aspektów, mających wpływ na stabilność pracy.

4.2 Architektura dostępu do pamięci

Zbudowana inteligentna kamera umożliwia, jak wspomniano wcześniej, użycie ośmiu pamięci statycznych, zapewniając do nich równoczesny i w pełni niezależny dostęp. Schemat, który dobrze ilustruje możliwość równoległej pracy pamięci, przedstawiono na rysunku 4-3. Uwidoczniono na nim układ FPGA i podłączone do niego układy pamięci. Spośród ośmiu banków SRAM dostępnych w urządzeniu, w ramach dokonanej implementacji wykorzystywane są cztery. Podobnie używana jest tylko jedna kamera. Na schemacie zaznaczono przykładowy przepływ danych, który może odbywać się jednocześnie. Obraz, pobierany przez jedną z kamer, jest kierowany na bloki przetwarzające w torze wizyjnym. Wyniki cząstkowe mogą być zapisywane. Naprzemiennie z zapisem nowego obrazu, dzięki arbitrażowi dostępu, możliwy jest również odczyt z innego obszaru tej samej pamięci. Funkcjonalność ta okazuje się przydatna do realizacji operacji przetwarzania i analizy obrazu, w których dostęp do danych następuje w kolejności innej, niż możliwa w potokowym systemie przetwarzania. Cechę tą wykorzystano w niniejszej pracy w realizacji algorytmu śledzenia. Wymienione ścieżki przepływu danych znajdują się w zakresie domeny zegarowej związanej z obrazem generowanym przez kamerę. Niezależnie od tego, możliwy jest asynchroniczny dostęp do pamięci z modułu wyświetlającego obraz na monitorze VGA, który pracuje w innej domenie zegarowej. Wykorzystuje on pamięć SRAM jako bufor ramki obrazu, w której zapis i odczyt może odwoływać się naprzemiennie do komórek pamięci posiadających dowolne adresy (na przykład pamięć M2 z tego samego schematu). Oczywiście należy pamiętać, że pamięci są jednoportowe, a więc umożliwiają w danym momencie albo zapis, albo odczyt. Opisana asynchroniczność polega jednak na tym, że możliwy jest, w ramach przepustowości interfejsu pamięci, swobodny dostęp do dowolnie ułożonych lokacji adresowych. Realizacja tego typu dostępu do danych przy użyciu pamięci dynamicznych nie byłaby możliwa.



Rysunek 4-3: Schemat ilustrujący równoczesność dostępu do pamięci

5 Wyniki praktyczne

5.1 Energochłonność i wydajność

Zmierzony pobór mocy przez moduł główny wyniósł 0,49 W. Jest to moc przynależna wyłącznie układowi FPGA z wyłączeniem zasilania banków I/O. Pobór mocy przez całe urządzenie, nie wykonujące w momencie pomiaru żadnych obrotów kamerą, wyniósł 2,1 W. Przedstawiony bilans energetyczny nie uwzględnia konsumpcji energii przez silniki krokowe. Ze względu na samohamowny charakter przekładni ślimakowej zastosowanej do napędu osi poziomej i pionowe umieszczenie drugiej osi obrotu, możliwe było wyłączanie zasilania silników przy braku ruchu. Wobec tego energia była pobierana jedynie w czasie ruchu, osiągając zmienne wartości zależne od fazy ruchu i prędkości.

Ważnym kryterium oceny przydatności rekonfigurowalnej kamery obliczeniowej jest uzyskiwana moc obliczeniowa oraz moc obliczeniowa uzyskiwana przy określonej mocy rozpraszanej. Obliczono wydajność układu FPGA uzyskiwaną w skonstruowanej kamerze przy realizacji opisanego w pracy algorytmu śledzenia. Cały tor przetwarzania obrazu, wraz z systemem ciągłej wizualizacji, zaimplementowany w skonstruowanym urządzeniu, dostarcza moc obliczeniową około 3200 MOPS (milionów operacji na sekundę). Ponadto w zasobach układu FPGA zaimplementowany jest softprocesor Microblaze nieuwzględniony w powyższym wyliczeniu. Oznacza to, że skonstruowana kamera charakteryzuje się wydajnością 1,6 GOPS/W, co jest bardzo dobrym wynikiem.

5.2 Zajętość zasobów

Ustalono następujące częstotliwości pracy poszczególnych części funkcjonalnych:

- sterownik pamięci SRAM: 100 MHz,
- softprocesor Microblaze: 50 MHz,
- zegar pikseli: konfigurowalny, maksymalnie 8 MHz,
- bloki toru wizyjnego: 50 MHz i 8 MHz,
- generator obrazu: 25 MHz.

Według podanych przez pakiet ISE Design Suite wyników, projekt zajął zasoby układu Spartan-6 przedstawione w tabeli 5-1.

Nazwa modułu (rysunek)	Nazwa jednostki FPGA				
	Slice	Slice registers	LUT	LUTRAM	DSP48A1
	11434 (49%)	3638 (1%)	33940 (36%)	16681 (76%)	

Tabela 5-1: Zajętość zasobów FPGA

5.3 Testy śledzenia

Próby praktyczne śledzenia różnego typu ruchomych obiektów przeprowadzono w zmiennych warunkach oświetleniowych i w różnych pomieszczeniach. Dokonano również analizy śledzenia osób w warunkach

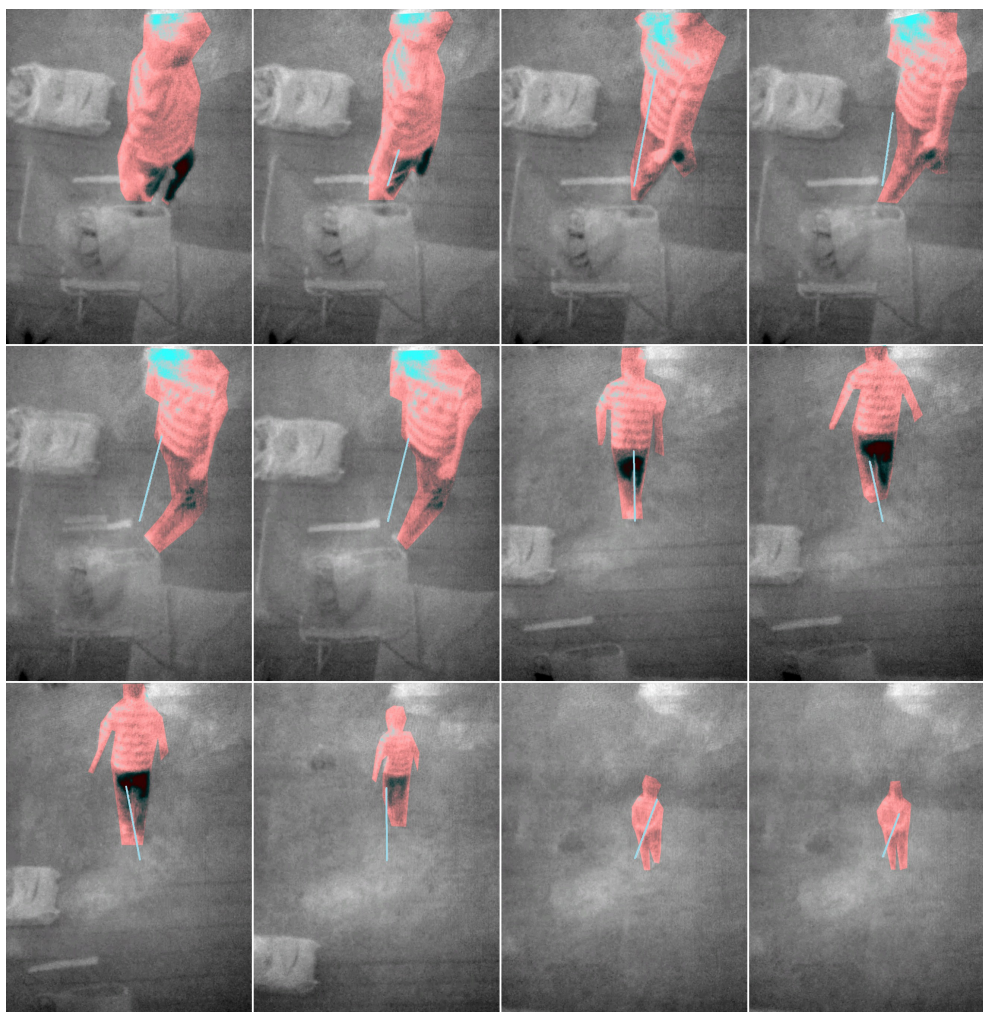
zewnętrznych. Inteligentną kamerę umieszczono na specjalnie skonstruowanym stojaku. Urządzenie zamocowane było na wysokości 2,20 m nad powierzchnią podłoża, na wysięgniku, dzięki czemu zachowana była możliwość ruchu w niemal pełnym zakresie obrotów obu osi.

Na rysunku 5-1 zaprezentowano ujęcia szybko poruszającej się osoby w dużym jasnym pomieszczeniu przy oświetleniu naturalnym, wykonane co około 2 sekundy. Pokazana sekwencja uwidacznia, że kamera podąża za poruszającym się obiektem, utrzymując go cały czas w polu widzenia. Dla lepszej wizualizacji śledzoną postać wyróżniono na czerwono, a wyliczony wektor ruchu podkreślono niebieskim kolorem.



Rysunek 5-1: Śledzenie szybko poruszającej się postaci

Przeprowadzono również test w warunkach zewnętrznych. Prób dokonywano przy oświetleniu dziennym i przy mocnym oświetleniu sztucznym po zapadnięciu zmroku. Śledzenie obejmowało pojedynczy ruchomy obiekt – dziecko lub osobę dorosłą. Na rysunku 5-2 przedstawiono śledzenie dziecka na podstawie cechy jasności w obrębie prostokątów po pikselizacji. Obraz wejściowy był poddany filtracji filtrem Gaussa o rozmiarze okna 5x5. Zarejestrowana sekwencja przedstawia reprezentatywne klatki z ujęcia o czasie trwania 5,4 sekundy. Jak poprzednio, dla lepszej wizualizacji, postać śledzoną podkreślono czerwonym kolorem, a wyliczony wektor ruchu – niebieskim.



Rysunek 5-2: Śledzenie przy kryterium jasności

6 Podsumowanie

W ramach niniejszej rozprawy doktorskiej skonstruowano kamerę inteligentną wyposażoną w rekonfigurowalną platformę obliczeniową. Celem zrealizowanych prac było wykazanie, że wyposażenie urządzenia w układ reprogramowalny FPGA pozwoli na zbudowanie urządzenia zdolnego do aktywnego śledzenia poruszających się obiektów. Duża wydajność obliczeniowa zapewniana przez układ FPGA miała zapewnić możliwość wykonania operacji przetwarzania i analizy obrazu w czasie rzeczywistym, a niski pobór energii umożliwić stworzenie oszczędnego urządzenia wbudowanego. Cele te zostały w pełni potwierdzone przez osiągnięte wyniki.

Zbudowanie kamery inteligentnej wymagało kompleksowego rozwiązania problemów dotyczących jej konstrukcji, algorytmów sterowania obrotem w dwóch osiach, projektowania złożonego cyfrowego systemu elektronicznego, w tym wielowarstwowego obwodu drukowanego, zaproponowania oraz implementacji programowej i sprzętowej (tj. w układzie FPGA) algorytmu śledzenia, jak również testowania i oceny parametrów użytkowych prototypu.

Architektura systemu i konstrukcja inteligentnej kamery stanowiły własne rozwiązanie Autora. System wizyjny kamery zbudowany został z wykorzystaniem kamery miniaturowej CMOS, jednostki obliczeniowej w układzie FPGA (wraz z układami towarzyszącymi) z ośmioma w pełni niezależnymi bankami pamięci statycznej. Został on wyposażony w stosunkowo prosty, lecz skuteczny mechanizm wizualizacji obrazu wynikowego oraz zapewnił możliwość wyświetlania wyników pośrednich. Pozostałe systemy elektroniczne przeznaczone zostały do współpracy z mechanizmem napędowym opartym na dwóch silnikach krokowych. Moduł główny (FPGA wraz z pamięciami) oraz moduł sterowania silnikami umieszczono w gniazdach na płycie bazowej.

Oryginalnym rozwiązaniem w skonstruowanej kamerze jest wykorzystanie ośmiu banków pamięci statycznej, bezpośrednio, równolegle i równocześnie dostępnych z układu FPGA. Rozwiązania proponowane przez producentów płyt i systemów FPGA, wykorzystywane w systemach wizyjnych, opierają się na użyciu jednego lub dwóch układów pamięci dynamicznych o dużej pojemności. W rozwiązaniach takich dostęp do dowolnego piksela przetwarzanego obrazu obwarowany jest ograniczeniem związanym z protokołem transmisji. W przypadku wykorzystania pamięci statycznych, częstotliwość zegara pamięci jest co prawda mniejsza, nie mniej jednak możliwy jest dostęp do wszystkich banków pamięci jednocześnie, a zapis lub odczyt pikseli następuje w dowolnej kolejności. Ma to fundamentalne znaczenia dla implementacji algorytmów przetwarzania i analizy obrazów, w których wymagany jest niezdeteminowany kolejnością transmisji dostęp do danych. W zrealizowanej aplikacji korzystano z takiego dostępu w algorytmie śledzenia oraz w trakcie wizualizacji obrazów.

W trakcie konstruowania, montowania i uruchamiania urządzenia stosowano się do zasad projektowania urządzeń elektronicznych o dużym stopniu złożoności, wykorzystujących układy o wysokiej skali integracji. Prace w efekcie doprowadziły do powstania działającego urządzenia, wyposażonego w funkcję obrotu głowicy wokół dwóch osi, mogącego realizować sformułowane na wstępie zadanie śledzenia ruchomego obiektu. Istniała przy tym potrzeba uwzględnienia aspektów mechanicznych i dynamiki urządzenia napędzanego silnikami krokowymi, a także zagadnień dotyczących sterowania. Zjawiska dynamiczne związane z generowaniem ruchu przy śledzeniu obiektu przez układ mechaniczny oparty na silnikach krokowych, zasymulowano w postaci modelu komputerowego. Wnioski płynące z symulacji uwzględniono w urządzeniu i tak zrealizowano system generacji obrotów kamery, aby jej ruch był możliwie łagodny i płynny. Wszystkie moduły urządzenia zostały umieszczone w kompaktowej obudowie przystosowanej do zamontowania w miejscu korzystnym do realizacji badań własności urządzenia.

Prace poprzedzono przedstawieniem stanu wiedzy: historycznym spojrzeniem na ewolucję kamer inteligentnych i przeglądem algorytmów śledzenia obiektów, w tym także realizowanych sprzętowo. Widząc spektrum możliwych rozwiązań, zaproponowano własny algorytm śledzenia obiektu, którego specyfika dopasowana była między innymi do realizacji w układzie FPGA (możliwość przetwarzania strumienia obrazu) i zastosowanych urządzeń napędowych. W jego ramach zaproponowano autorskie podejście do zagadnienia porównywania kolejnych ramek obrazu z wykorzystaniem podziału na rejony w kształcie trapezów, po uprzedniej translacji. Algorytm przetestowano w programie Matlab, a jego uproszczoną wersję, z pominięciem etapu translacji ramek, zaimplementowano w skonstruowanej inteligentnej kamerze. Również ta wersja algorytmu charakteryzowała się dużą skutecznością w działaniu.

Częścią składową algorytmu śledzenia była detekcja krawędzi algorytmem Canny. Własna implementacja Autora, wykonana na układzie FPGA w skonstruowanej kamerze, umożliwiała pracę w czasie rzeczywistym.

Dla realizacji projektu posłużono się kilkoma różnymi językami programowania i narzędziami, w tym przede wszystkim językiem opisu sprzętu VHDL, ale także językiem C dla programu softprocesora zaimplementowanego w układzie FPGA oraz językiem skryptowym Matlab wraz z modelowaniem w Simulink. Całość zakończono dużą liczbą badań cząstkowych (poszczególne moduły) i kompleksowych (gotowa kamera inteligentna), mających wskazać mocne i słabe punkty zaproponowanego rozwiązania. Oceniono również wymagania energetyczne urządzenia, które pokazały dużą energooszczędność konstrukcji. Dokonano także oszacowania liczby operacji w zrealizowanym algorytmie. Wskazano też, że realizacja zaproponowanego algorytmu wymagałaby użycia procesorów o znacząco większych mocach obliczeniowych niż te, które obecnie stosowane w kamerach inteligentnych, cechujących się porównywalnym poborem mocy do skonstruowanego urządzenia.

Przeprowadzone badania wykazały, że postawiona na wstępie teza została potwierdzona. Inteligentna kamera realizowała śledzenie poruszającego się obiektu i podążała za nim, utrzymując go w polu widzenia możliwie jak najbliżej osi optycznej kamery. Przykładowo, urządzenie dobrze realizowało zadanie utrzymywania w kadrze poruszającej się osoby, w pomieszczeniu oraz na otwartej przestrzeni. Kamera podążała za poruszającą się postacią w sposób płynny, mimo istniejących drobnych zaburzeń sceny (więcej wiatr poruszający drzewami).

Przeprowadzono również eksperymenty dla dwóch poruszających się postaci. Spodziewano się, że śledzenie zostanie zaburzone, gdyż wersja algorytmu zaimplementowana w układzie rekonfigurowalnym nie przywidywała wystąpienia w obrębie sceny dwóch porównywalnych ruchomych obiektów. Jeżeli obiekty są podobne gabarytowo, nie istnieje kryterium wyboru, który obiekt śledzić. Wówczas kamera zachowa się na dwa sposoby, zależnie od wielkości obiektów: będzie ustawiać się w pozycji uśrednionej, na środku odcinka łączącego środki ciężkości obu obiektów albo przejmie śledzenie dominującego obiektu. Jest to kompromisowe rozwiązanie, umożliwiające uniknięcie sytuacji, w której następowałoby szybkie "przeskakiwanie" kamery pomiędzy kilkoma równoważnymi obiektami. Wyniki eksperymentu potwierdziły tą własność algorytmu.

Ważnym celem rozprawy było przebadanie rozwiązań konstrukcyjnych i implementacyjnych dla konkretnej aplikacji. Stąd też efekty prób zaproponowanego algorytmu można wykorzystać do sformułowania wniosków o jego cechach i możliwościach rozwoju. W pracy przedstawiono efekty śledzenia na podstawie intensywności pikseli (maska Bayera poddana filtracji Gaussa) oraz na podstawie zagęszczenia krawędzi. Połączenie równoległe obu torów umożliwiłoby potencjalną minimalizację fałszywych wskazań ruchomych obiektów z jednej strony i zwiększenie skuteczności rozpoznania z drugiej. Ponadto wykonalne jest wówczas zdefiniowanie wektora cech obiektu, dzięki czemu możliwe staje się śledzenie jednej wyróżnionej postaci przy obecności w kadrze kilku poruszających się obiektów.

Inteligentna kamera została zaprojektowana w taki sposób, żeby umożliwić realizację na niej wielu zadań związanych ze śledzeniem, daleko wykraczających swym zakresem poza zaproponowany demonstracyjny algorytm. Możliwości rozwoju platformy mogą iść w różnych kierunkach. Przede wszystkim, zastosowana duża liczba w pełni niezależnych banków pamięci statycznej umożliwić może realizację algorytmów przetwarzania i analizy obrazów wymagających nieliniowego dostępu do zasobów pamięciowych. Z możliwości tej w pewnym stopniu skorzystano w zaimplementowanym algorytmie śledzenia, co było bardzo korzystne dla swobody projektowania przepływu danych obrazowych.

Drugą ważną cechą urządzenia, która stwarza duże pole rozwoju, jest obecność interfejsu dla dwóch

kamer. W uzupełnieniu o wspomniane wcześniej pamięci statyczne, możliwe byłoby rozszerzenie algorytmu o elementy stereowizji. Przeniesienie śledzenia w trzeci wymiar mogłoby stanowić znaczne udoskonalenie realizacji operacji śledzenia.

Trzecim kierunkiem mogłoby być dążenie do zwiększenia rozdzielczości przetwarzanych obrazów, poprzez zastosowanie kamery o większych możliwościach. Równoległe zwiększenie liczby przetwarzanych klatek na sekundę wymagałoby jednak zapewne zastosowania układu FPGA o większej serii szybkościowej (w pracy zastosowano najwolniejszą serię „-2”).

Podsumowując całość prac należy jednak stwierdzić, że skonstruowana inteligentna kamera dowiodła celowości zastosowania układu rekonfigurowalnego współpracującego z pamięciami statycznymi do realizacji zadania śledzenia obiektu. Stanowi ona bardzo dobrą bazę do dalszych badań wielu użytecznych algorytmów śledzenia.

Bibliografia

- [1] AXIS Communications, „AXIS 233D Network Dome Camera datasheet”.
- [2] S. Ghiasi, H. J. Moon, A. Nahapetian, i M. Sarrafzadeh, „Collaborative and Reconfigurable Object Tracking”, *The Journal of Supercomputing*, t. 30, nr 3, ss. 213–238, 2004.
- [3] C. T. Johnston, D. G. Bailey, i K. T. Gribbon, „Optimisation of a colour segmentation and tracking algorithm for real-time FPGA implementation”, *Image and Vision Computing Conference New Zealand (IVCNZ '05)*, ss. 422–427, 2005.
- [4] M. Gorgoń, *Architektury rekonfigurowalne do przetwarzania i analizy obrazu oraz dekodowania cyfrowego sygnału wideo*. Rozprawy Monografie - Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, 2007.
- [5] M. Arias-Estrada i E. Rodríguez-Palacios, „An FPGA Co-processor for Real-Time Visual Tracking”, *Field-Programmable Logic and Applications: Reconfigurable Computing Is Going Mainstream*, nr 2438, ss. 73–98, 2002.
- [6] A. Zawadzki, „Lighting fitting controller using image processing system”, *Preprints of IFAC workshop on Programmable Devices and Embedded Systems PDES 2009*, t. 9, nr 1, ss. 137–140, 2009.
- [7] A. N. Beldachir, *Smart Cameras*, 2010.
- [8] Virtex Smart Camera CEERI-IITD. [Online]. Dostępne na: <http://www.ceeri.res.in/main/smartcamera.pdf>
- [9] Y.-P. Tan, S. R. Kulkarni, i P. J. Ramadge, „A new method for camera motion parameter estimation”, *Department of Electrical Engineering, Princetown Univerisity*, 1995.
- [10] M. Gorgoń i A. Zawadzki, „Intelligent camera system based on the Spartan 6”, *FPL 2011 : proceedings of the FPL2011 workshop on Computer vision on low-power reconfigurable architectures : September 4, 2011, Chania, Crete, Greese*, ss. 21–22, 2011.
- [11] M. Gorgoń i A. Zawadzki, „Nowa architektura wizyjnego systemu wbudowanego dedykowana dla kamery inteligentnej”, *Pomiary, Automatyka, Kontrola*, t. 57, nr 8, ss. 902–904, 2011.
- [12] B. Pilszczyk i A. Zawadzki, „Sposób i układ zdalnego sterowania oświetleniem”, PL 213579 B12013 [Online]. Dostępne na: <http://patenty.bg.agh.edu.pl/pelneteksty/PL213579B1.pdf>
- [13] B. Pilszczyk i A. Zawadzki, „Method and system of remote lighting control; WO 2008/097114 A1”, 2008 [Online]. Dostępne na: <http://patenty.bg.agh.edu.pl/pelneteksty/WO2008097114A1.pdf>
- [14] B. Pilszczyk i A. Zawadzki, „Verfahren und system zur fernbeleuchtungssteuerung — Method and system of remote lighting control; EP 2165577 A1”, 2010 [Online]. Dostępne na: <http://patenty.bg.agh.edu.pl/pelneteksty/EP2165577A1.pdf>