

Sieć miniaturowych czujników termowizyjnych do wykrywania i śledzenia obiektów

Grzegorz Bieszczad, Tomasz Sosnowski, Krzysztof Sawicki, Sławomir Gogler, Andrzej Ligienza, Mariusz Mścichowski

Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Optoelektroniki, ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

Streszczenie: W artykule przedstawiono koncepcję i realizację sieci czujników zobrazowania w podczerwieni służącą do lokalizacji i śledzenia obiektów. Sieć czujników używa zespołu wielu miniaturowych mikrobolometrycznych kamer termowizyjnych o niskiej rozdzielczości (80×80 pikseli) do wykrywania, śledzenia i lokalizacji obiektów w obszarze obserwacji. Zastosowanie systemów termowizyjnych reagujących na promieniowanie podczerwone pochodzące z obiektów sprawia, że system jest odporny na warunki oświetlenia zewnętrznego i warunki środowiskowe. Jednocześnie zastosowanie czujnika podczerwieni wymaga zastosowania specjalnie zaprojektowanych, dedykowanych technik przetwarzania obrazu. W artykule opisano techniki przetwarzania obrazu, sposoby lokalizacji obiektów, pomiary dokładności, porównanie z innymi znanymi rozwiązaniami oraz wnioski końcowe.

Słowa kluczowe: termowizja, śledzenie, analiza obrazu, przetwarzanie obrazu, sieć czujników, detekcja

1. Wprowadzenie

Systemy bezpieczeństwa, monitoringu i inteligentnego miasta są zazwyczaj wyposażone w różnego rodzaju czujniki, takie jak kamery, radary, mikrofony, detektory pirometryczne itp., które zapewniają wykrywanie, rozpoznawanie i identyfikację obiektów i zdarzeń [3]. Oczekuje się, że te systemy będą niezawodne i będą działać w szerokim zakresie warunków pogodowych oraz różnych porach dnia [10]. Kamera termowizyjna jest przykładem czujnika wizyjnego, który może zwiększyć możliwości wykrywania, rozpoznawania i identyfikacji systemu obserwacyjnego [2] w zróżnicowanych warunkach środowiskowych. Kilka ośrodków badawczych [13, 7, 12] bada aspekty jednoczesnej analizy danych obrazowych z wielu źródeł, co daje możliwość wydobycia dodatkowych informacji o obiekcie i jego położeniu. Zastosowanie kamery termowizyjnej umożliwia pracę w nocy oraz w warunkach słabej widoczności, takich jak mgła czy lekki deszcz, bez konieczności dodatkowego oświetlenia [5]. Ponadto kamera termowizyjna może dostarczyć przydatnych informacji pozwalających na zastosowanie ich przy zapobieganiu pożarom lub wykrywaniu wycieków gazu. Przedstawiona w artykule sieć czujników składa się z takich kamer i wykorzystuje podejście Internetu Rzeczy

do realizacji komunikacji wewnętrznej i zwiększenia świadomości sytuacyjnej. Eliminuje to potrzebę budowania rozbudowanych sieci przewodowych i przyspiesza proces wdrażania dzięki zastosowanym protokołom automatyzującym proces konfiguracji elementów sieci. Podstawową rolą prezentowanego systemu jest monitorowanie obszaru zainteresowania i wykrywanie: ruchu, sytuacji kryzysowych, przepływu ludzi czy prób sabotażu. System wykorzystuje sieć miniaturowych kamer termowizyjnych z matrycą detektorów mikrobolometrycznych typu Micro80 o wymiarach 80×80 detektorów wyprodukowanym przez francuską firmę Lynred.

2. Architektura Mesh dla sieci sensorowej

Opracowany system, składający się z czujników podczerwieni, jest w stanie całkowicie pasywnie lokalizować i śledzić obiekty, zapewniając w ten sposób bezpieczeństwo, przez monitorowanie obszaru zainteresowania pod kątem określonych zdarzeń. Proponowane czujniki podczerwieni tworzą sieć mesh Wi-Fi. Wszystkie czujniki zostały wyposażone tak, że mogą przysyłać informacje o obrazie termicznym w czasie rzeczywistym. Przesyłany strumień wideo nieskompresowanych danych termicznych ma przepływność:

$$B = fps \cdot X \cdot Y \cdot bpp \quad (1)$$

gdzie: fps – częstotliwość ramek generowanych przez matrycę mikrobolometryczną, X i Y – wymiary odpowiednio poziomy i pionowy matrycy wyrażone w pikselach, bpp – szerokość bitowa słowa kodującego informację termiczną.

Przy częstotliwości generowania ramek obrazu wynoszącej 50 Hz, wymiarze matrycy detektorów $X = 80$ pikseli, $Y =$

Autor korespondujący:

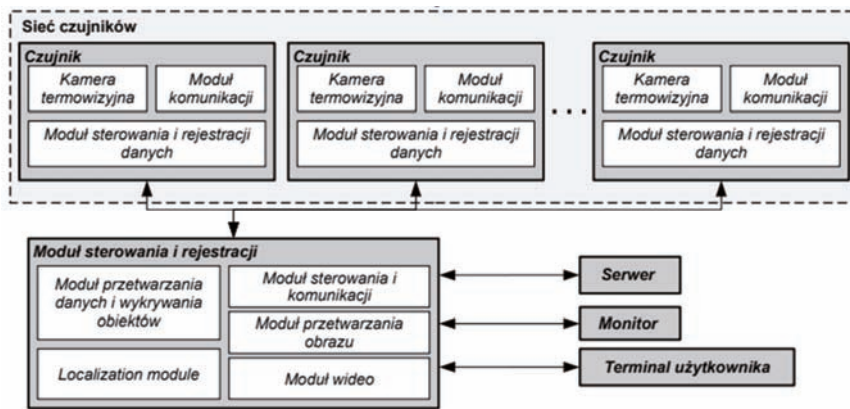
Tomasz Sosnowski, tsosnowski@wat.edu.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 16.06.2021 r., przyjęty do druku 20.10.2021 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

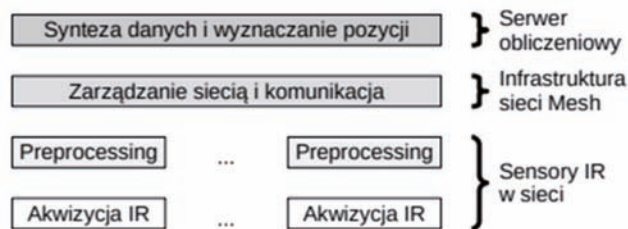


Rys. 1. Architektura zaprojektowanej sieci sensorowej
Fig. 1. Architecture of the developed sensor network

80 pikseli i 16 bitach danych niezbędnych do zakodowania nieprzetworzonego sygnału termicznego, przepływność strumienia danych dla pojedynczego węzła sieci obsługującego sygnał detektora wynosi 5,12 Mb/s zgodnie z równaniem (1). Choć ta przepływność nie jest duża dla współczesnych sieci Wi-Fi, możliwość skalowania sieci dla dużej liczby czujników może być ograniczona przez zastosowaną technikę łączności.

Zadaniem sieci czujników jest synteza danych ze zbioru węzłów i dostarczanie na ich podstawie informacji o położeniu obiektu w przestrzeni. Byłoby to niemożliwe do osiągnięcia przez pojedyncze, niewspółpracujące czujniki. Informacja o położeniu obiektu na obrazie termowizyjnym wraz z informacją o własnym położeniu czujnika w przestrzeni ustaloną przy pomocy modułu GPS, jest używana do obliczenia bezwzględnej pozycji obiektu za pomocą zaprojektowanego algorytmu lokalizacji na podstawie technik triangulacji. W związku z tym, aby obliczyć jego położenie na płaszczyźnie ziemi, obiekt musi zostać wykryty przez co najmniej dwa czujniki. Wykorzystanie technologii sieci mesh do koordynacji rozproszonej sieci czujników zwiększa użyteczność systemu, ułatwiając instalację ad-hoc w terenie. Dzięki temu możliwe jest łatwe wdrożenie systemu do monitorowania mobilnych elementów infrastruktury krytycznej.

Pozyskiwanie i przetwarzanie obrazu podczerwonego IR (ang. *InfraRed*) odbywa się w czujnikach (jest to tzw. przetwarzanie On the Edge), natomiast zarządzanie siecią i synteza danych zapewniająca lokalizację obiektów realizowana jest centralnie przez węzeł nadrzędny, który pełni również funkcję serwera obliczeniowego. Model warstwowy architektury systemu sieci detektorów zaprezentowano na rysunku 2.



Rys. 2. Model warstwowy architektury sieci czujników podczerwieni
Fig. 2. Layer model of infrared sensor network architecture

3. Przetwarzanie obrazu termowizyjnego

Obraz termowizyjny jest uzyskiwany przez system za pomocą mikrobolometrycznej matrycy detektorów. Mikrobolometr to detektor promieniowania podczerwonego należący do rodziny czujników termicznych. Czujnik termiczny absorbuje strumień promieniowania przychodzącego na jego powierzchnię, powodując wahania jego temperatury. Ta zmiana temperatury

powoduje zmianę rezystancji mikrobolometru. Specjalistyczny układ odczytowy mierzy tę rezystancję, dostarczając sygnał proporcjonalny do temperatury obserwowanego obiektu. Detektory mikrobolometryczne mają przewagę nad detektorami fotonowymi, ponieważ mogą działać bez chłodzenia kriogenicznego, dlatego często nazywa się je detektorami niechłodzonymi. W Europie, między innymi, firma Lynred produkuje mikrobolometryczne matryce detektorów wrażliwe na promieniowanie w widmie długofalowej podczerwieni (8–12 μm). Ten typ matryc detektorów jest produkowany w procesie CMOS i dzięki temu są zintegrowane z układem odczytu. Detektory mikrobolometryczne mają

postać mikromostków rezystancyjnych wykonanych z amorficznego krzemu. Charakterystyczna wielkość detektora zależy od modelu tablicy detektorów i waha się od 35 mm do 12 mm.

3.1. Korekcja niejednorodności

Matryce mikrobolometryczne i detektory fotonowe charakteryzują się niejednorodną odpowiedzią detektorów na jednorodne promieniowanie podczerwone padające na powierzchnię matrycy. Przyczyną tych odchyłań są niedoskonałości poszczególnych detektorów i układu odczytowego, wynikające z procesu technologicznego. Odchyłka rozmiaru detektora powoduje losową niejednorodność czułości detektora i powstanie losowego napięcia nierównoważenia [6]. Tolerancje produkcyjne ślepego bolometru i wzmacniacza całkowitego powodują powstanie charakterystycznego wzoru kolumnowego na obrazie wynikowym. Ze względu na różne niedoskonałości w matrycy detektorów, kamera termowizyjna wytwarza niejednorodny obraz z nałożonym szumem o stałym wzorze (FPN), nawet mimo oświetlenia jednorodnym promieniowaniem podczerwonym. Przykładowy obraz z matrycy mikrobolometrów z nałożonym FPN przedstawiono na rysunku 3a.



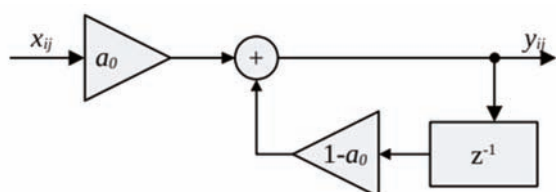
Rys. 3. Termogram pozyskany z kamery termowizyjnej bez (a) oraz z (b) korekcją niejednorodności
Fig. 3. Thermal image acquired from the sensor (a) without and (b) with NUC

Stały wzór szumowy spowodowany niejednorodnością jest zjawiskiem niepożądanym, ponieważ zmniejsza przestrzenną rozdzielczość urządzenia [4]. Przykładowy obraz po korekcji niejednorodności uzyskany z detektora podczerwieni zastosowanego w układzie eksperymentalnym, pokazano na rysunku 3b. Powszechnie stosowane algorytmy korekcji niejednorodności (NUC) są metodami typu referencyjnego i używają jednego lub dwóch referencyjnych zestawów danych dla realizacji algorytmu NUC [9]. Algorytmy korekcji niejednorodności oparte na wzorcowaniu zwykle wymagają mechanizmu aktualizacji, w celu kompensacji resztkowego szumu przestrzennego, który może powstać w wyniku nierównomiernego dryftu termicznego detektorów w matrycy. Aktualizacja współczynników korekcyjnych odbywa się zwykle za pomocą mechanicznej migawki,

która czasowo blokuje promieniowanie z obserwowanej sceny i przedstawia jednolite promieniowanie referencyjne dla algorytmu korekcji. Blokada czasowa sprawia, że czujnik nie może realizować podstawowego zadania obserwacji przez krótki czas niezbędny do przeprowadzenia korekcji (zwykle kilka sekund), co sprawia, że obserwacja jest nieciągła. W systemach monitoringu uruchomienie tego mechanizmu może być nadużywane i pozwalać na potencjalne naruszenie bezpieczeństwa. Dlatego zaimplementowano specjalnie opracowany algorytm NUC oparty na analizie danych ze sceny, aby wyeliminować FPN z obrazów termicznych.

Sieć czujników powinna działać bez przerw, dlatego należy zastosować odpowiedni bezprzesłony algorytm korekcji niejednorodności. Zasadniczo istnieją dwa podejścia do bezprzesłonego NUC: fabrycznie skorygowany czujnik metodą „brute force” przechowujący dane referencyjne dla dużego zestawu różnych temperatur otoczenia [1] oraz algorytm oparty na analizie parametrów statystycznych obserwowanej sceny [14]. Proces pomiaru odpowiedzi matrycy detektorów dla wielu wartości temperatury otoczenia, uzyskany na przykład w kontrolowanej komorze klimatycznej, jest czasochłonny i może być znaczącym czynnikiem generującym koszty. Jest to szczególnie istotne w przypadku tanich czujników podczerwieni o niskiej rozdzielczości, takich jak zastosowane w projekcie. W rozwiązaniu zdecydowano się na wariant oparty na uproszczonej analizie parametrów obserwowanej sceny, aby przyspieszyć proces uruchomienia systemu składającego się z wielu czujników i zapewnić niezawodne działanie w niestabilnym, zróżnicowanym środowisku zewnętrznym.

Niepożądane przesunięcie sygnału wyjściowego z matrycy detektorów powodujące FPN zmienia się nieznacznie wraz z temperaturą detektorów. W ten sposób dynamika sygnału FPA jest połączona z właściwościami termicznymi kamery termowizyjnej. Przy stosunkowo wysokiej stałej termicznej komponentów kamery, szum o stałym wzorze znajduje się w domenie częstotliwościowej sygnału w zakresie niskich częstotliwości [9]. Pożądanym użytecznym sygnałem ze sceny ma natomiast stosunkowo wysoką częstotliwość (obiekty szybko poruszające się). Jeśli wykrywanie obiektów odbywa się przez wykrywanie ich ruchu, to można założyć, że temperatura bezwzględna obiektów i szczegóły statycznego tła nie dostarczają użytecznych informacji. Użyteczne są zatem sygnały szybkozmienne, a nieużyteczne wolnozienne. Zatem korekta niejednorodności może być wykonana za pomocą filtra górnoprzepustowego, który odfiltruje zarówno niepożądane zmiany powodujące wzór FPN jak i statyczne promieniowanie tła. Faktyczna realizacja procedury korekcji została zrealizowana metodą komplementarną do opisaną powyżej – filtrem dolnoprzepustowym wyznacza się obraz referencyjny (obraz sumy sygnału niejednorodności i tła) a następnie od obrazu zarejestrowanego w kamerze odejmowany jest obraz referencyjny. Filtr powinien być wydajny i mieć niewielkie wymagania obliczeniowe, stąd zaimplementowano filtr typu IIR. Zaprojektowany filtr ma konfigurowalną charakterystykę częstotliwościową, aby dostosować go do zmieniających się warunków akwizycji. Podstawowy schemat filtra IIR służącego do wyznaczenia obrazu odniesienia zaprezentowano na rysunku 4.



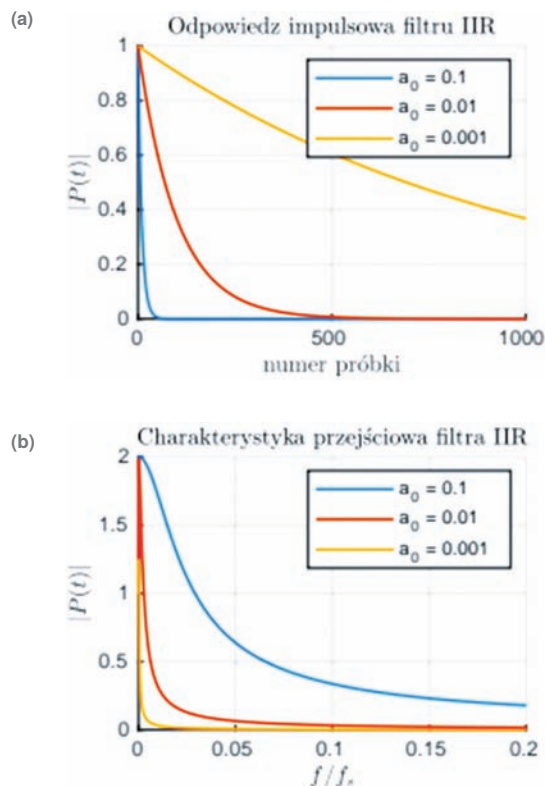
Rys. 4. Schemat filtra dolnoprzepustowego o nieskończonej odpowiedzi impulsowej (IIR)

Fig. 4. Diagram of IIR LP filter with controlled time constant

Odpowiedź częstotliwościowa tego filtra IIR zależy od parametru a_0 , który jest obliczany według wzoru (2).

$$a_0 = \begin{cases} 1/N_{\max} & : n \geq N_{\max} \\ 1/n & : n < N_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

Parametr n jest numerem ramki, której liczenie rozpoczyna się od momentu wyzwolenia procedury korekcji niejednorodności. Parametr N_{\max} definiuje maksymalną stałą czasową dla filtra. Na rysunku 5a pokazana jest odpowiedź jednostkowa filtra IIR, która zależy od parametru a_0 . Na rysunku 5b pokazano charakterystykę widmową filtra IIR w stanie ustalonym ($n \geq N_{\max}$) w zależności od parametru a_0 .



Rys. 5. Odpowiedź impulsowa (a) i unormowana charakterystyka (b) filtra IIR dla różnych wartości parametru a_0

Fig. 5. Impulse response (a) and normalised spectral transfer function (b) of IIR filter with different a_0 parameter

Sygnał wyjściowy filtra zawiera sumę zarówno sygnału odpowiadającego rozkładowi promieniowania statycznego tła obserwowanej sceny, jak i wewnętrznego napięcia niezrównoważenia każdego z detektorów w matrycy mikrobolometrycznej. Filtrowanie odbywa się niezależnie dla każdego detektora w tablicy, stąd przy rozdzielczości detektora 80, w sumie 6400 filtrów działa jednocześnie i do każdego z nich jest dostarczana jedna próbka sygnału na każdą klatkę obrazu termicznego. Sygnał wyjściowy po korekcji powstały w wyniku filtracji obrazem odniesienia jest następnie poddawany algorytmowi detekcji.

3.2. Algorytm detekcji

Opracowana metoda detekcji obiektów realizuje zadanie poprzez rejestrację wartości termicznych obrazu, a następnie obliczanie obrazu referencyjnego. Następnie dokonuje się porównania między nowo uzyskanym obrazem termicznym i obrazem referencyjnym. Po określeniu obrazu referencyjnego algorytm przechodzi do wyznaczenia obrazu różnicowego Δf dla każdego nowo zarejestrowanego obrazu. Wykrywanie obiektu odbywa się przez dyskryminację amplitudy odchylenia sygnału

ze sceny od sygnału tła. Obraz różnicowy Δf jest obliczany według równania:

$$\Delta f(x, y) = |f(x, y) - f(x, y)| \quad (3)$$

Po tej operacji następuje binaryzacja obrazu wykonywana na obrazie różnicowym, która służy do klasyfikacji każdego piksela obrazu do jednego z dwóch stanów „obiekt” (biały) i „tło” (czarny). Klasyfikacja odbywa się metodą progowania. Jeżeli obliczona wartość obrazu różnicowego jest większa niż wcześniej określony próg detekcji L wtedy obiekt uważa się za wykryty. Próg wykrywania L został eksperymentalnie wybrany dla różnych scenariuszy eksperymentu. Jeśli wartość obrazu różnicowego jest poniżej progu wykrywania zakłada się, że wykrycie nie nastąpiło, a nagrany obraz jest wykorzystywany do adaptacyjnej aktualizacji obrazu referencyjnego tła.

3.3. Algorytm lokalizacyjny

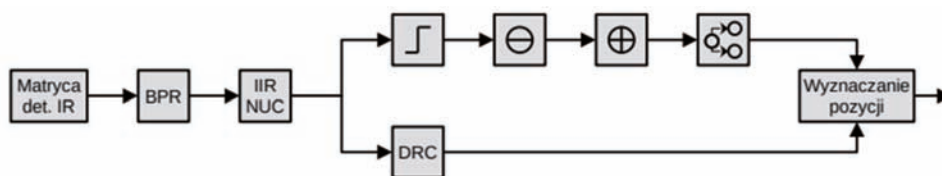
Schemat blokowy toru przetwarzania obrazu zaprezentowano na rysunku 6. Czujnik podczerwieni przedstawiony jako IR Detector jest źródłem obrazu podłączonym do modułu korekcji uszkodzonych pikseli BPR (ang. *Bad Pixel Replacement*). Następnie sygnał jest rozgałęziony na dwa tory. Pierwsza gałąź przeznaczona jest do realizacji zadania wykrywania i znakowania obiektów. Składa się z modułu binaryzacji z zadaniem progiem L

odpowiadającym ustalonej różnicy temperatury, a następnie podawany jest do modułów przetwarzania morfologicznego, tj. modułów erozji i dylatacji. Następnie sygnał trafia do modułu segmentacji (rys. 13). Druga gałąź składa się z modułu kompresji zakresu dynamicznego DRC (ang. *Dynamic Range Compression*), który przetwarza surowy sygnał promieniowania podczerwonego na obraz czytelny dla człowieka przedstawiony w odcieniach szarości, gdzie jasność obrazu jest proporcjonalna do temperatury. Obie gałęzie wyprowadzają sygnały wyjściowe do modułu lokalizacyjnego, który dokonuje syntezy informacji o wykrytych obiektach, obliczając w ten sposób kierunek kątowy do obiektu względem osi optycznej obiektywu. Moduł DRC można pominąć w przypadku pracy systemu w trybie autonomicznym, kiedy nie ma potrzeby, aby system prezentował obrazy wizualne w formacie czytelny dla człowieka.

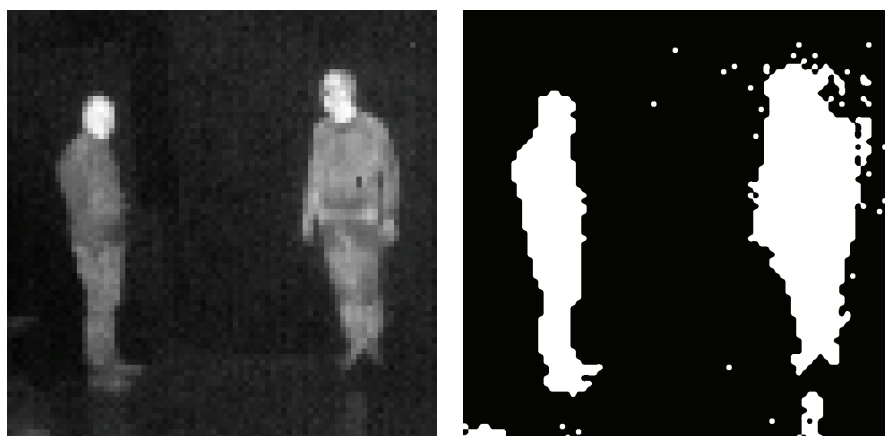
Współrzędne obiektu (x_c, y_c) zostały obliczone jako geometryczny środek ciężkości obrazu wykrytego obiektu i są one obliczane według wzorów (4):

$$x_c = \frac{\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y m_{xy} \cdot x}{\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y m_{xy}} \quad y_c = \frac{\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y m_{xy} \cdot y}{\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y m_{xy}} \quad (4)$$

gdzie m_{ij} jest masą (natężeniem) piksela o współrzędnych (i, j) . Środek masy należy obliczyć osobno dla każdego wykrytego i uprzednio wyodrębnionego w procesie segmentacji obiektu.

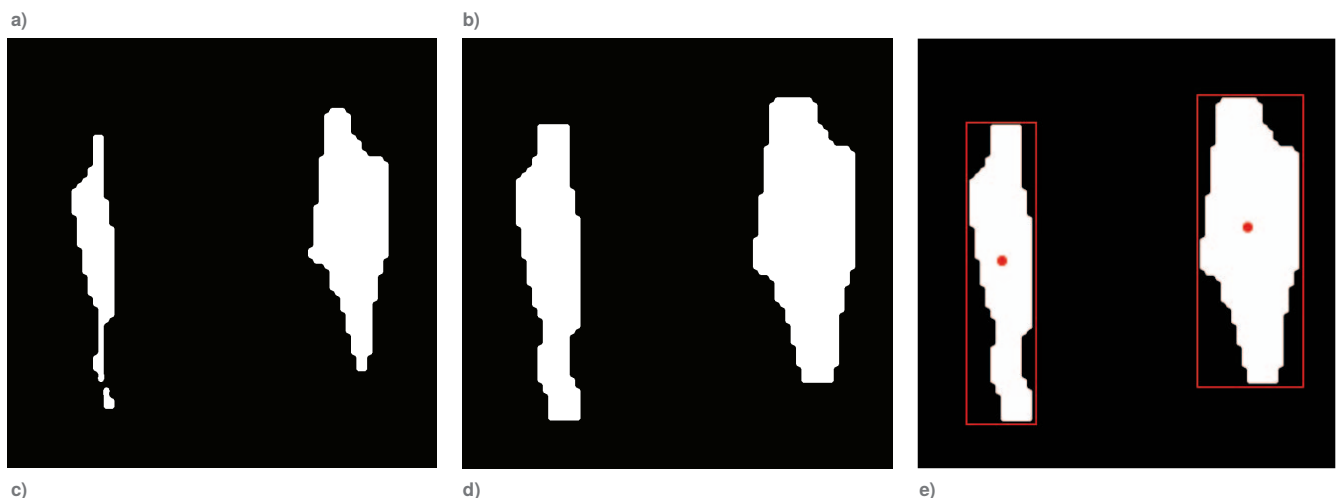


Rys. 6. Tor przetwarzania obrazu w sensorze podczerwieni
Fig. 6. Image processing train of the infrared sensor



Rys. 7. Przykładowe wyniki przetwarzania obrazu: a) obraz oryginalny, b) obraz po binaryzacji, c) obraz po erozji, d) obraz po dylatacji, e) obiekt segmentowany z zaznaczonymi środkami

Fig. 7. Example of image processing train results: a) original image, b) image after binarization, c) image after erosion, d) image after dilation, e) segmented object with their centers marked



Znając bezwzględne współrzędne czujnika i współrzędne na obrazie wykrytego obiektu, można obliczyć azymut od czujnika do wykrytego obiektu, biorąc pod uwagę kąty przesunięcia α i β od osi optycznej czujnika. Kąty α i β są obliczane według wzoru:

$$\begin{aligned}\alpha &= IFOV \cdot (x_c - X/2) \\ \beta &= IFOV \cdot (y_c - Y/2)\end{aligned}\quad (5)$$

gdzie $IFOV$ to elementarne pole widzenia zespołu matrycy detektorów i układu optycznego, a x_c i y_c to współrzędne wykrytego obiektu na płaszczyźnie obrazu. Dla każdego wykrytego obiektu można wykreślić półprostą wychodzącą z obiektywu i przecinającą wykryty obiekt. Zbiór takich promieni jest rzutowany na wspólną płaszczyznę równoległą do podłoża. Każda półprosta może przeciąć każdą inną ze zbioru. Punkty przecięcia półprostych służą do określenia lokalizacji wykrytego obiektu. Maksymalną liczbę możliwych przecięć można określić za pomocą wzoru (6):

$$D = \frac{1}{2} (\sum_{n=1}^S d_n - 1) \sum_{n=1}^S d_n \quad (6)$$

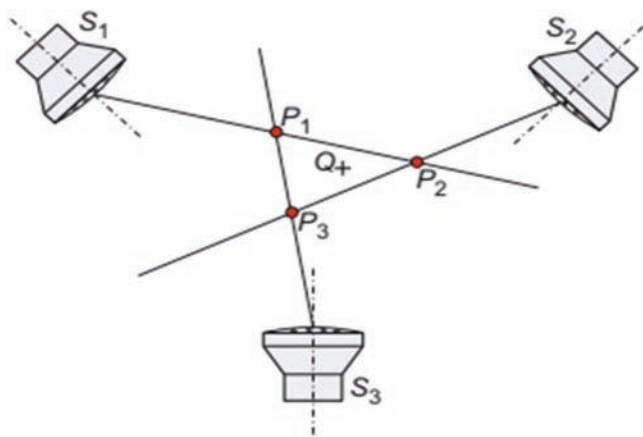
gdzie S to liczba użytych czujników, a d_n to liczba obiektów wykrytych przez n -ty czujnik.

Obliczenie dokładnego położenia obiektu na płaszczyźnie obrazu może być obciążone błędem wynikającym z rozdzielczości przestrzennej kamery termowizyjnej, dystorsji obiektywu, niepewności pomiaru azymutu czujników, geometrii obiektu itp. Błąd ten przyczynia się do niepewności wyznaczenia położenia i azymutu do obiektu, dlatego promienie utworzone przez wiele czujników odpowiadające temu samemu obiektowi nie przecinają się w dokładnie jednym punkcie (rys. 14).

Ponieważ dla każdego obiektu może istnieć wiele przecięć, lokalizacja obiektu stanowi problem optymalizacyjny. Rozwiązuje się go przez obliczenie geometrycznego punktu środkowego wszystkich przecięć między liniami od czujników do wykrytych obiektów. Tak zwana mediana geometryczna dla zbioru punktów w przestrzeni euklidesowej to punkt, dla którego sumę odległości do wszystkich punktów w zbiorze jest minimalna, co definiuje się równaniem (7). W projekcie zastosowano iteracyjny algorytm Weiszfelda do znalezienia punktu środkowego [11]. Mediana geometryczna Q jest definiowana jako punkt spełniający warunek:

$$\arg \min_{Q \in \mathbb{R}^n} \sum_{i=1}^m \|P_i - Q\|_2 \quad (7)$$

gdzie $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in})$.



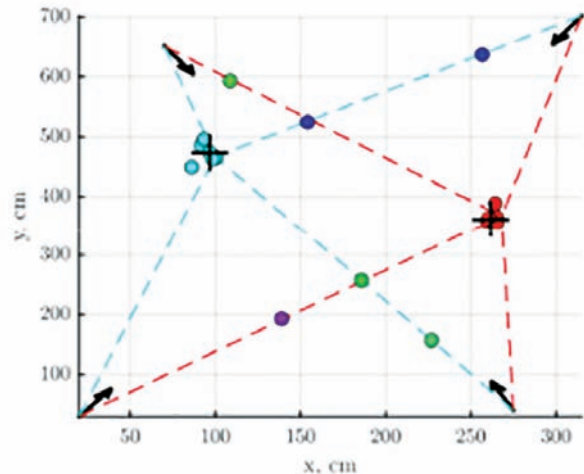
Rys. 8. Ilustracja tak zwanego problemu lokalizacji dla wybranego podzbioru czujników

Fig. 8. Illustration of exemplary results of the location problem algorithm for selected subset of sensors

Operator oznacza znalezienie takiego punktu Q , dla którego suma wszystkich odległości euklidesowych do P_i jest minimalna.

Jeżeli na obrazie znajduje się więcej niż jeden obiekt, liczba przecięć gwałtownie wzrasta. Nie zawsze jest możliwe właściwe oddzielenie obiektów tylko i wyłącznie na podstawie analizy obrazów z różnych czujników, ponieważ mogą one wyglądać zupełnie inaczej, ponieważ są przez różne czujniki oglądane z różnych stron. Wszystkie przecięcia są zatem analizowane za pomocą proponowanej metody, bez stawiania żadnego założenia przynależności danych półprostych do konkretnych obiektów. Wszystkie kombinacje przecięć półprostych są jednakowo brane pod uwagę do analizy lokalizacji obiektów. Okazuje się, że nawet w przypadku występowania większej liczby obiektów, punkty tworzą skupiska wokół rzeczywistej lokalizacji danego obiektu. Klastery są rozdzielane za pomocą procedury segmentacji realizowanej metodą psegdist z biblioteki oprogramowania MATLAB. Algorytm służy do segmentacji punktów na grupy, z uwzględnieniem zadanej minimalnej odległości euklidesowej pomiędzy punktami z różnych grup. Minimalna odległość między grupami punktowymi została ustalona eksperymentalnie na 0,35 m, co w przybliżeniu odpowiada średniej wielkości przekroju poprzecznego człowieka.

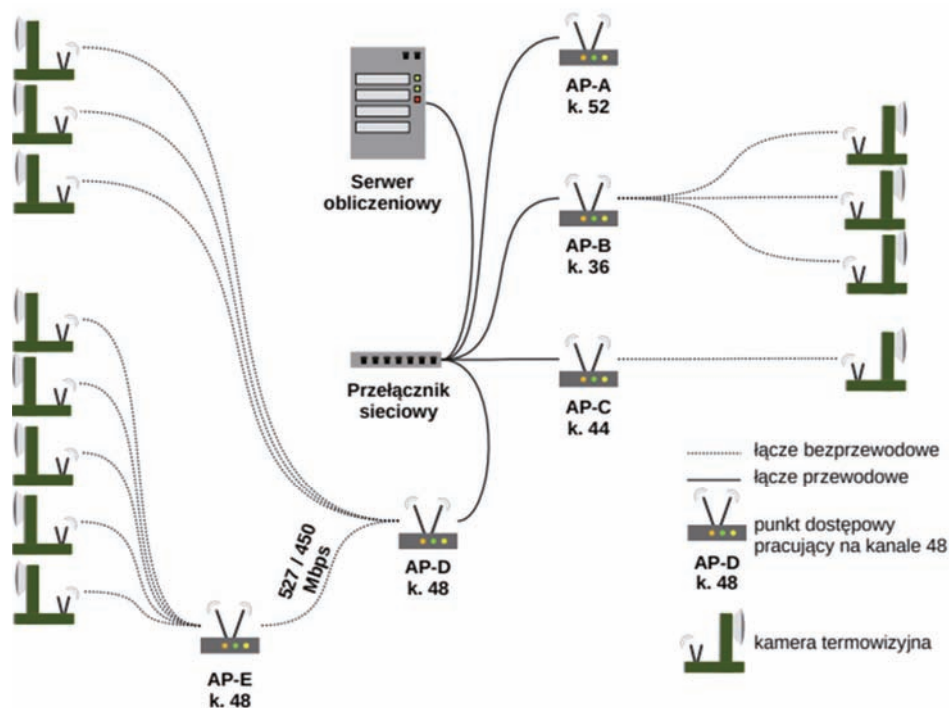
Na rysunku 9 pokazana jest przykładowa sytuacja przedstawiająca dwa obiekty wykrywane przez cztery czujniki. Istnieją dwie chmury punktów wokół rzeczywistych pozycji obiektów i pewna liczba nieprawidłowo wyznaczonych punktów generowanych przez nadmiarowe przecięcia półprostych należących do nieodpowiadających obiektów. Ogólnie, niedopasowane punkty przecięcia są rzadkie i można je łatwo odrzucić w algorytmie segmentacji.



Rys. 9. Wyniki działania algorytmu do rozwiązania problemu lokalizacji dla dwóch obiektów w polu widzenia sieci sensorowej
Fig. 9. Results of location problem algorithm for two objects in the sensor network field of view

3.4. Sieć

Każdy czujnik był wyposażony w kartę sieciową obsługującą IEEE 802.11ac Wave 1, która pracowała w trybie MIMO 2x2. Wykorzystane punkty dostępowe działały w trybie MIMO 3x3 do transmisji między punktami dostępowymi w trybie mesh oraz w trybie MIMO 2x2 podczas komunikacji z czujnikami. W przypadku kanału radiowego o szerokości 80 MHz najmniejsza możliwa prędkość transmisji danych (MCS0) w trybie MIMO 2x2 wynosi 65 Mb/s, a w trybie MIMO 3x3 97,5 Mb/s. Wartość 65 Mb/s w porównaniu do przepustowości strumienia danych pochodzącego z jednego czujnika (1) pozwala na podłączenie wielu czujników do tego samego punktu dostępowego w najgorszych warunkach propagacji sygnału. Połączenie sieciowe między czujnikami jest kluczowym elementem całego



Rys. 10. Schemat połączenia między czujnikami a punktami dostępowymi użytymi w eksperymencie
 Fig. 10. Connections between the sensors and access points used in the experiment

systemu. Każdy czujnik generuje dane, które muszą być przesyłane do urządzenia zarządzającego pamięcią masową lub bezpośrednio do serwera przetwarzającego dane. Ze względu na wymagania dotyczące połączenia czujników i odpowiednio zsynchronizowanej transmisji danych w czasie rzeczywistym, sieć musi być niezawodna, zapewniać wystarczającą przepustowość i być skalowalna dla większych obszarów działania. Niezawodność można zapewnić stosując redundantne punkty dostępowe w zasięgu każdego czujnika. Umieszczenie wielu punktów dostępowych działających w nienakładających się kanałach pozwoli również zapewnić spełnienie wymagań dotyczących przepustowości sieci. Skalowalność można zapewnić dzięki punktom dostępowym z możliwością łączenia się przewodowo i bezprzewodowo z innymi punktami dostępowymi, dzięki czemu istniejąca pierwotnie infrastruktura nie jest konieczna do działania systemu. Jedynym rozwiązaniem, które spełniło wymagania systemu, była sieć bezprzewodowa IEEE 802.11ac z zaimplementowaną niestandardową siecią typu mesh. Rozważano również wariant IEEE 802.11ax, jednak na etapie realizacji badań nie było łatwo dostępnych komercyjnych urządzeń obsługujących ten standard. Teoretycznie jednak standard ten powinien zapewniać jeszcze lepsze parametry sieci, takie jak mniejsze opóźnienia i większą przepustowość.

W przeprowadzonym eksperymencie nie zdarzyło się, aby którykolwiek węzeł sieci działał z najniższą możliwą przepustowością radiową – każde połączenie między czujnikami a punktami dostępowymi nawiązywano z przepustowością większą niż 300 Mb/s.

Sieć składała się z pięciu punktów dostępowych, z których cztery zostały umieszczone wewnątrz budynku, a jeden na zewnątrz. Jeden z punktów dostępowych umieszczonych wewnątrz budynku działał jako punkt dostępowy typu mesh (pełniąc jednocześnie rolę punktu dostępowego dla węzłów oraz bezprzewodowego klienta innego punktu dostępowego). Sieć mesh została utworzona przy użyciu komercyjnego protokołu dostarczonego przez znanego producenta urządzeń bezprzewodowych. W ten sposób zapewniono wystarczająco duży obszar działania sieci, bez konieczności stosowania infrastruktury kablo-

wej. Warto zauważyć, że każde bezprzewodowe rozszerzenie sieci (punkt dostępowy połączony z innym punktem dostępowym) zmniejsza efektywną przepustowość. Jak zaprezentowano na rysunku 10, bezprzewodowe połączenie między dwoma połączonymi punktami dostępowymi zostało ustanowione z prędkością transmisji 527 Mb/s w kierunku od AP-E do AP-D i 450 Mb/s w kierunku przeciwnym.

Ze względu na charakter danych przesyłanych z czujnika, które mają być odbierane z jak najmniejszym opóźnieniem, zdecydowano się na opracowanie autorskiego protokołu opartego na UDP. Jedna ramka obrazu generowana przez czujnik ma długość 12 800 bajtów, czyli kilka razy więcej niż typowe MTU (Maksymalna jednostka transmisji) sieci przewodowej Ethernet i bezprzewodowej IEEE 802.11. Możliwe jest zamieszczenie jednej ramki w jednym datagramie UDP, ale zostanie on pofragmentowany przez oprogramowanie realizujące warstwę protokołu IP (fragmentacja warstwy sieciowej). W takim przypadku, jeśli jakikolwiek fragment datagramu zostanie utracony, zostanie utracony cały pakiet IP. Zaprojektowano nowy protokół, który dzieli ramkę danych na części i enkapsuluje każdą z nich w oddzielnych datagramach UDP z niestandardowym nagłówkiem warstwy aplikacji zawierającym numer kolejny ramki obrazu, numer fragmentu ramki oraz liczbę wszystkich części. W ten sposób minimalizujemy procent utraconych danych, ponieważ w przypadku utraty pojedynczej ramki nadal dysponujemy fragmentem obrazu. Taka właściwość systemu jest istotna zwłaszcza w aplikacjach czasu rzeczywistego pracujących z sieciami bezprzewodowymi, szczególnie w trudnych warunkach radiowych. Przewidziano, że protokół może wykorzystywać kompresję danych LZ4, gdy sieć działa w trudnych warunkach (duże odległości, wielu klientów bezprzewodowych). Zastosowanie kompresji pozwala zaoszczędzić około 20–30 % przepustowości w zamian za większe opóźnienie transmisji.

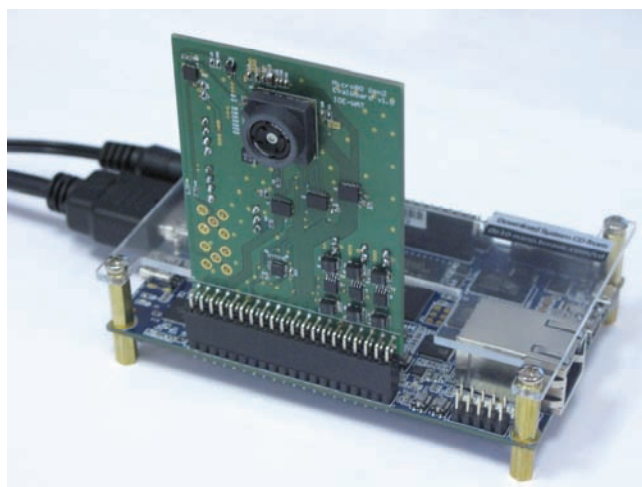
3.5. Cyfrowy moduł przetwarzania sygnału termowizyjnego

Strumień danych przetwarzanych przez system jest pozyskiwany z matrycy mikrobolometrycznej. Głównym zadaniem

modułu odczytowego FPA jest generowanie sygnałów sterujących obwodami wewnętrznymi matrycy detektorów, a także współpraca z przetwornikiem analogowo-cyfrowym [8]. Aby uzyskać wiarygodne dane z matrycy detektorów, istnieje potrzeba zaprojektowania specjalnego automatu cyfrowego, który generuje szereg sygnałów podłączonych do matrycy detektorów i wysyła je przez zewnętrzny interfejs IO. Odbywa się to za pomocą niestandardowych modułów cyfrowych opisanych w języku opisu sprzętu zrealizowanym w układzie FPGA Cyclone V SX firmy Intel Corporation. Układ FPGA odpowiada za generowanie i synchronizację zegara, obsługę sygnałów układu odczytu oraz zapewnia mechanizm DMA do przesyłania danych obrazowych do mikroprocesora (HPS) wbudowanego w strukturę FPGA.

Przetwarzanie obrazu odbywa się w HPS (ang. *Hard Processor System*) przez aplikację użytkownika działającą pod kontrolą dostosowanego systemu operacyjnego GNU/Linux (wersja 5.0). System operacyjny Linux, kompilator, sterowniki i aplikacje składające się na niestandardową dystrybucję systemu zostały opracowane przy użyciu oprogramowania Buildroot. System zbudowany przez Buildroot nie zawiera żadnego nadmiarowego oprogramowania, które nie jest wymagane przez aplikację i w ten sposób został zoptymalizowany pod kątem szybkiego uruchamiania. Niestandardowe moduły jądra odpowiadają za konfigurację matrycy podczerwieni i pozyskiwanie danych. Niestandardowe oprogramowanie aplikacyjne uruchomione w systemie jest przeznaczone do przesyłania danych przez sieć za pomocą opracowanego protokołu. Wszystkie moduły i oprogramowanie jest na tyle uniwersalne, że może współpracować z modułami termowizyjnymi o innych rozdzielczościach (np. 384×288 lub 640×480). Do bezpośredniej komunikacji między czujnikiem a systemem operacyjnym wykorzystano specjalnie zaprojektowaną magistralę i mechanizm DMA.

Zrealizowana sieć czujników stanowi zestaw 12 matryc podczerwieni podłączonych do płytki wstępnego przetwarzania obrazu opartej na układzie SoC-FPGA, wyposażonej w interfejs Wi-Fi oraz przenośne źródło zasilania. Jeden z elementów wewnętrznych czujnika pokazano na rys. 11.



Rys. 11. Czujnik termowizyjny z matrycą detektorów 80×80 i obiektywem szerokokątnym na płycie FPGA

Fig. 11. Infrared sensor proximity board connected to Terasic DE10-nano FPGA board

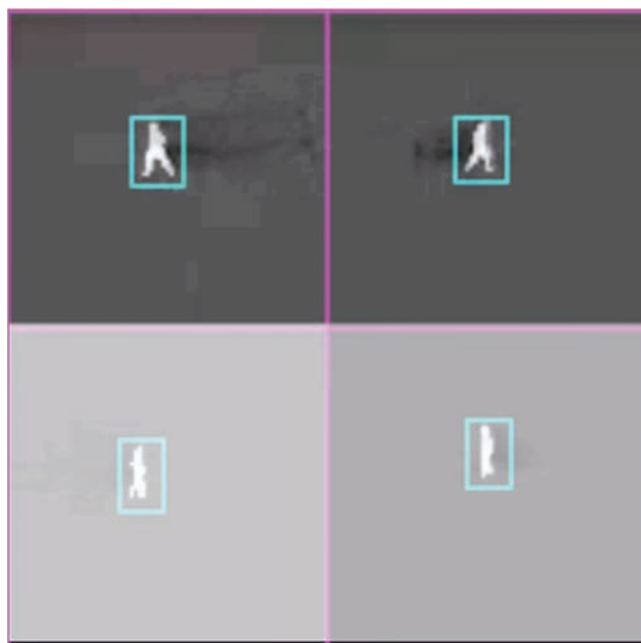
4. Pomiar dokładności systemu

W celu oszacowania dokładności systemu opracowano specjalny eksperyment. Wyznaczono referencyjny kwadratowy obszar o wymiarze krawędzi 10 m, a kamery umieszczono w każ-

dym rogu kwadratu, obiektywy kierując w stronę środka kwadratu. Ustalono liniową ścieżkę, po której poruszał się człowiek. Sekwencja trwała 13 sekund i składała się z około 400 zsynchronizowanych klatek dla każdej kamery. Przykładowe obrazy z czterech czujników w konfiguracji są pokazane na rysunku 12.

Geometrię zestawu zmierzono taśmą mierniczą z dokładnością do 1 cm. Azymut kamery został zmierzony z dokładnością 2° względem północy magnetycznej. Ponieważ pole magnetyczne w promieniu kilku metrów jest jednorodne a ponadto ważny jest tylko azymut względny między kamerami, błąd odchylenia magnetycznego można pominąć. Dokładność systemu została określona jako średnia kwadratowa odległości między wykrytą lokalizacją a ścieżką ruchu wyznaczającą linię. Ścieżka ruchu została zamodelowana analitycznie w postaci równania liniowego, co pozwoliło na pomiar błędu detekcji.

Parametry eksperymentu są zestawione w tabeli 1, a wyniki pomiarów zaprezentowane na rysunku 13. Wyróżnić ścieżkę liniową. Przy zadanych (x_n, y_n) pozycjach obiektu i dla $n \in \langle 1 \dots N \rangle$ próbek pobranych z czujnika dokładność metody P_d została obliczona jako pierwiastek średniej kwadratowej odległości między punktami lokalizacji a linią. Dokładność obliczono za pomocą równania (8).

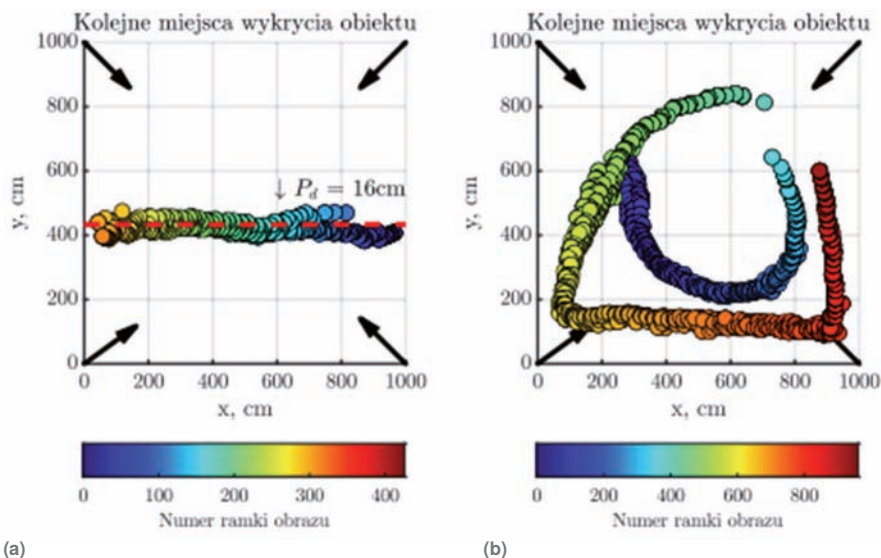


Rys. 12. Obrazy termiczne uzyskane z wielu czujników
Fig. 12. Thermal images acquired from multiple sensors

Tabela 1. Parametry eksperymentu

Table 1. Experiment conditions

Parametr	Wartość
Liczba kamer	4
Wymiary obszaru badawczego	10 m \times 10 m
Typ ścieżki	liniowa
Równanie ścieżki	$ax + by + c = 0$
Parametry równania	a = -0,022 b = -1 c = 4,33 m
Długość ścieżki	\approx 10 m
Liczba ramek obrazu	426
Częstotliwość odświeżania	30 Hz



Rys. 13. Pozyskana lokalizacja obiektu i opracowana ścieżka do: (a) pomiaru dokładności i (b) ogólnego testu pokrycia coverage

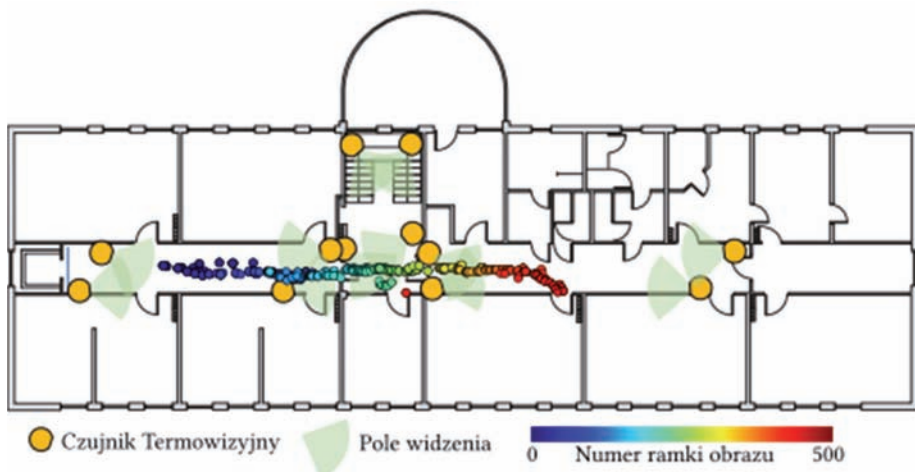
Fig. 13. Acquired object localisation and elaborated path for: (a) accuracy measurement and (b) general coverage test

$$P_d = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(\frac{|a \cdot x_n + b \cdot y_n + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}} \right)^2} \quad (8)$$

Dokładność wykrywania obiektów nieruchomych jest obliczana jako wartość RMS odległości euklidesowej między obliczoną a rzeczywistą pozycją obiektu. Obliczone położenie obiektu poruszającego się po prostej linii przedstawiono na rysunku 13a. Rzeczywiste odległości czujników od obiektu wyznaczono za pomocą taśmy pomiarowej dla obiektów nieruchomych. Dla obiektów poruszających się błąd lokalizacji obliczono jako wartość skuteczną odległości euklidesowej między pozycją detekcji a linią określającą tor ruchu. W takim scenariuszu testowym osiągnięto dokładność $P_d = 16$ cm dla metody. Jest prawie pewne, że poruszająca się osoba nie podążała idealnie wyznaczoną linią ścieżki. Z tego powodu obliczony błąd metody może być przeszacowany. Dodatkowo wykonano testy pokrycia obiektem poruszającym się po całym obserwowanym obszarze. Przykładowa ścieżka obiektu przedstawiona jest na rysunku 13b.

5. Weryfikacja systemu

Aby zweryfikować algorytm lokalizacji i wydajność sieci czujników, przygotowano specjalnie opracowany scenariusz z dwunastoma czujnikami. Cała konfiguracja znajdowała się w obszarze zabudowy o wymiarach 13 m × 40 m. Cztery czujniki zostały umieszczone w klatce schodowej i kolejne cztery dla każdego z dwóch odchodzących korytarzy. Omówiony scenariusz pomiarowy zakłada pomiar wewnątrz budynku, w którym sygnał GPS nie jest dostępny. Dlatego pozycje kamer zostały wyznaczone ręcznie za pomocą taśm mierniczych i kątomierzy i wprowadzone do algorytmu. Kamery na podczerwień zostały umieszczone i skierowane w taki sposób, aby każda osoba przechodząca przez budynek była widoczna dla co najmniej czterech kamer. W takim układzie stosunkowo łatwo było wyznaczyć trasy obiektów testowych. Celem tego testu było obliczenie drogi ludzi poruszających się wewnątrz budynku w różnych kierunkach. Umieszczenie węzłów sensorowych w układzie eksperymentalnym i jedną z przykładowych ścieżek obliczonych za pomocą systemu pokazano na rysunku 14.



Rys. 14. Schemat rozmieszczenia czujników i ich pola widzenia w układzie eksperymentalnym i przykładowa wyznaczona ścieżka ruchu obiektu

Fig. 14. Sensors' FOV and placement diagram in the experimental setup and exemplary detection path

6. Wnioski

Głównymi wyzwaniem w sieci czujników zainstalowanych wewnątrz budynków są zakłócenia elektromagnetyczne i przeszkody, które uniemożliwiają niezawodną transmisję bezprzewodową. Z punktu widzenia wydajności i niezawodności systemu termowizyjnego środowisko wewnętrzne nie jest bardzo wymagające i zapewnia stosunkowo stabilne warunki temperaturowe oraz stały sygnał tła. Jednak środowisko wewnętrzne może powodować więcej problemów z niezawodnością w części sieciowej systemu.

Korzystanie z sieci czujników wewnątrz budynków może być korzystne w zastosowaniach takich jak inteligentne budynki lub systemy bezpieczeństwa. Sieć czujników w otwartym środowisku może być atrakcyjna dla zastosowań wojskowych, ponieważ zapewnia dodatkową świadomość sytuacyjną dzięki zastosowaniu automatycznie konfigurowalnych rozproszonych sygnałów obserwacyjnych. Ponadto takie sieci czujników mogą być przydatne w zastosowaniach inteligentnych miast, zapewniając na przykład bezpieczniejsze i szybsze zarządzanie ruchem. Takie systemy podczewieni z niezawodnym wykrywaniem pieszych zapewniają jednocześnie anonimowość obserwowanym osobom, co może być atrakcyjne dla krajów dbających o prawa obywatelskie. Nasz system wykazał mniejszy średni błąd odległości 16 cm w porównaniu do około 30 cm w podejściu z czujnikiem dyskretnym [13].

Lepszą dokładność można przypisać wyższej rozdzielczości przestrzennej zastosowanego czujnika podczewieni. Zastosowana metoda segmentacji chmury punktów zapewnia względną odporność na bardziej zatłoczoną scenę, ale istnieją możliwości rozwoju systemu w kierunku zastosowania bardziej wyrafinowanych metod, takich jak filtrowanie i śledzenie cząstek, jak używane w [12] i pozwolić na osiągnięcie jeszcze lepszej wydajności systemu. Dzięki zastosowaniu np. sprzętowej akceleracji FPGA możliwe jest przeniesienie przetwarzania obrazu do węzłów (przetwarzanie on the Edge) i przesyłanie przez sieć wyłącznie informacji o detekcji i lokalizacji obiektu na obrazie, co znacznie zmniejszyłoby wymagania dotyczące przepustowości sieci. Dalszy rozwój algorytmów przetwarzania obrazów jest przedmiotem przyszłych badań. System ma potencjalne znaczne możliwości dalszego rozwoju, jednak już na obecnym etapie wykazano przydatność współpracujących sieciowo małych matryc detektorów podczewieni w systemach detekcji i śledzenia obiektów.

Podziękowania

Projekt był częściowo realizowany w ramach pracy naukowej finansowanej przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu nr DOB-2P/02/09/2018 oraz częściowo z funduszy badawczych Instytutu Optoelektroniki WAT.

Bibliografia

1. Bieszczad G., Orżanowski T., Sosnowski T., Kastek M., *Method of detectors offset correction in thermovision camera with uncooled microbolometric focal plane array*. [In:] "Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications" VI, ed. Huckridge D.A., Ebert R.R., Vol. 7481, 2009, 200–207. International Society for Optics; Photonics; SPIE. DOI: 10.1117/12.830678.
2. Dulski R., Kastek M., Bieszczad G., Trzaskawka P., Ciurapiński W., *Data Fusion Used in Multispectral System for Critical Protection*. "WIT Transactions on Information and Communication Technologies", Vol. 42, 2009, 165–172, DOI: 10.2495/DATA090171.
3. Kastek M., Dulski R., Życzkowski M., Szustakowski M., Ciurapiński W., Firmanty K., Pałka N., Bieszczad G., *Multisensor Systems for Security of Critical Infrastructures – Concept, Data Fusion, and Experimental Results*. Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, Vol. 8193, 2011, DOI: 10.1117/12.900969.
4. Krupiński M., Bieszczad G., Sosnowski T., Madura H., Gogler S., *Non-Uniformity Correction in Microbolometer Array with Temperature Influence Compensation*. "Metrology and Measurement Systems", Vol. 21, No. 4, 2014, 709–718, DOI: 10.2478/mms-2014-0050.
5. Ligienza A., Sosnowski T., Bieszczad G., Bareła J., *Optoelectronic sensor system for recognition of objects and incidents*. [In:] Radioelectronic Systems Conference 2019, Vol. 11442, 2020, 208–215, DOI: 10.1117/12.2565165.
6. Olbrycht R., Więcek B., De Mey G., *Thermal Drift Compensation Method for Microbolometer Thermal Cameras*. "Applied Optics", Vol. 51, No. 11, 2012, 1788–1794, DOI: 10.1364/AO.51.001788.
7. Siewert Sam B., Andalibi M., Bruder S., Rizer S., *Slew-to-Cue Electro-Optical and Infrared Sensor Network for Small UAS Detection, Tracking and Identification*. "AIAA Scitech 2019 Forum", DOI: 10.2514/6.2019-2264.
8. Sosnowski T., Bieszczad G., Kastek M., Madura H., *Digital image processing in high resolution infrared camera with use of programmable logic device*. [In:] Optics and Photonics for Counterterrorism and Crime Fighting VI and Optical Materials in Defence Systems Technology VII, Vol. 7838, 2010, 266–276. International Society for Optics; Photonics; SPIE. DOI: 10.1117/12.865026.
9. Sosnowski T., Bieszczad G., Madura H., *Image Processing in Thermal Cameras*. [In:] *Advanced Technologies in Practical Applications for National Security*, 2018, 35–57. Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-319-64674-9_3.
10. Szustakowski M., Ciurapiński W., Życzkowski M., Pałka N., Kastek M., Dulski R., Bieszczad G., Sosnowski T., *Multispectral System for Perimeter Protection of Stationary and Moving Objects*. "Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering", Vol. 7481, 2009, DOI: 10.1117/12.830051.
11. Weiszfeld E., *Sur Le Point Pour Lequel La Somme Des Distances de n Points Donnes Est Minimum*. "Tohoku Mathematical Journal", Vol. 43, 1937, 355–386.
12. Yang B., Wei Q., Yuan L., *Location Ambiguity Resolution and Tracking Method of Human Targets in Wireless Infrared Sensor Network*. "Infrared Physics & Technology", Vol. 96, 2019, 174–183, DOI: 10.1016/j.infrared.2018.11.011.
13. Yang B., Wei Q., Zhang M., *Multiple Human Location in a Distributed Binary Pyroelectric Infrared Sensor Network*, "Infrared Physics & Technology", Vol. 85, 2017, 216–224, DOI: 10.1016/j.infrared.2017.06.007.
14. Zuo C., Chen Q., Gu G., Sui X., Qian W., *Scene-based nonuniformity correction method using multiscale constant statistics*, "Optical Engineering", Vol. 50, No. 8, 2011, 1–12, DOI: 10.1117/1.3610978.

A Network of Miniature Thermal Imaging Sensors for Object Detection and Tracking

Abstract: This paper presents a concept and implementation of an infrared imaging sensor network for object localization and tracking. The sensor network uses multiple low-resolution (80× 80 pixels) microbolometric thermal cameras to detect, track and locate an object within the area of observation. The network uses information simultaneously acquired from multiple sensors to detect and extract additional information about object's location. The use of thermal-imaging systems responsive to objects' natural infrared radiation, makes the system resistant to external illumination and environmental conditions. At the same time, the use of infrared sensor requires application of specially designed, dedicated image processing techniques appropriate for this kind of sensor. The paper describes: image processing techniques, means of object localization, accuracy measurements, comparison to other known solutions and final conclusions.

Keywords: thermal imaging, tracking, image analysis, image processing, sensor network, detection

dr inż. Grzegorz Bieszczad

grzegorz.bieszczad@wat.edu.pl
ORCID: 0000-0001-8048-2609

Ukończył w 2008 r. Wojskową Akademię Techniczną na Wydziale Elektroniki. Stopień doktora otrzymał w 2012 r. Obecnie zajmuje się zagadnieniami związanymi z projektowaniem systemów cyfrowych, programowaniem mikroprocesorów i układów FPGA związanych z cyfrowym przetwarzaniem obrazu, w tym obrazów termicznych.



dr inż. Tomasz Sosnowski

tsosnowski@wat.edu.pl
ORCID: 0000-0003-4082-8366

Absolwent Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej (1993). Tytuł doktora nauk technicznych uzyskał w 2003 r. Zajmuje się problematyką związaną z projektowaniem i programowaniem systemów cyfrowych, cyfrową analizą sygnału, analizą obrazu termograficznego, a także zastosowaniem układów mikroprocesorowych i programowalnych w technice podczzerwieni.



dr inż. Krzysztof Sawicki

krzysztof.sawicki@wat.edu.pl
ORCID: 0000-0002-1368-3854

Ukończył Wydział Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej w 2009 r.; rozprawa doktorska z tematyki steganografii w sieciach bezprzewodowych obroniona w WAT w 2019 r.; jego zainteresowania skupiają się na sieciach bezprzewodowych, bezpieczeństwie teleinformatycznym, steganografii i systemach wbudowanych.



dr inż. Sławomir Gogler

slawomir.gogler@wat.edu.pl
ORCID: 0000-0002-3002-6362

Ukończył Politechnikę Warszawską w 2011 r. na Wydziale Mechatroniki. W 2020 r. uzyskał tytuł doktora nauk technicznych w Wojskowej Akademii Technicznej. Zajmuje się zagadnieniami konstrukcji układów optycznych oraz modelowaniem matematyczno-fizycznym.



mgr inż. Andrzej Ligienza

andrzej.ligienza@wat.edu.pl
ORCID: 0000-0002-5789-8531

Tytuł inżyniera otrzymał w 2014 r. po ukończeniu kierunku mechatronika ze specjalizacją inżynierii systemów mechatronicznych. Tytuł magistra otrzymał w 2016 r. po ukończeniu kierunku optoelektronika ze specjalizacją inżynierii systemów optoelektronicznych. W 2018 r. objął stanowisko starszego inżyniera w Zakładzie Techniki Podczzerwieni i Termowizji Instytutu Optoelektroniki WAT.



Mariusz Mścichowski

mariusz.mscichowski@student.wat.edu.pl
ORCID: 0000-0002-0079-1960

Student Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej. Jego zawodowe zainteresowania skupiają się na cyfrowych pomiarowych układach elektronicznych oraz szybkim prototypowaniu FDM.

