

dr inż. Robert GŁĘBOCKI  
dr inż. Maciej ZASUWA  
mgr inż. Marcin ŻUGAJ  
dr hab. Inż. Ryszard VOGT  
Politechnika Warszawska  
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa  
Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej

## **SYSTEM IDENTYFIKACJI I ROZPOZNAWANIA CELÓW DLA MOŹDZIERZOWEGO POCISKU STEROWANEGO**

*W referacie przedstawiono niektóre rozwiązania konstrukcyjne dotyczące głowicy pomiarowej możliwej do zastosowania w beznapedowych pociskach sterowanych. Opisano konstrukcję głowicy śledzącej, uzyskiwane dane pomiarowe oraz sposób dalszego przetwarzania uzyskanych obrazów. Przedstawiono algorytmy przetwarzania uzyskanych obrazów. W algorytmach tych wykorzystano między innymi sztuczne sieci neuronowe. Opisywane wyniki badań uzyskano w trakcie prac nad systemami sterowania pociskami mózdzierzowymi i bombami lotniczymi.*

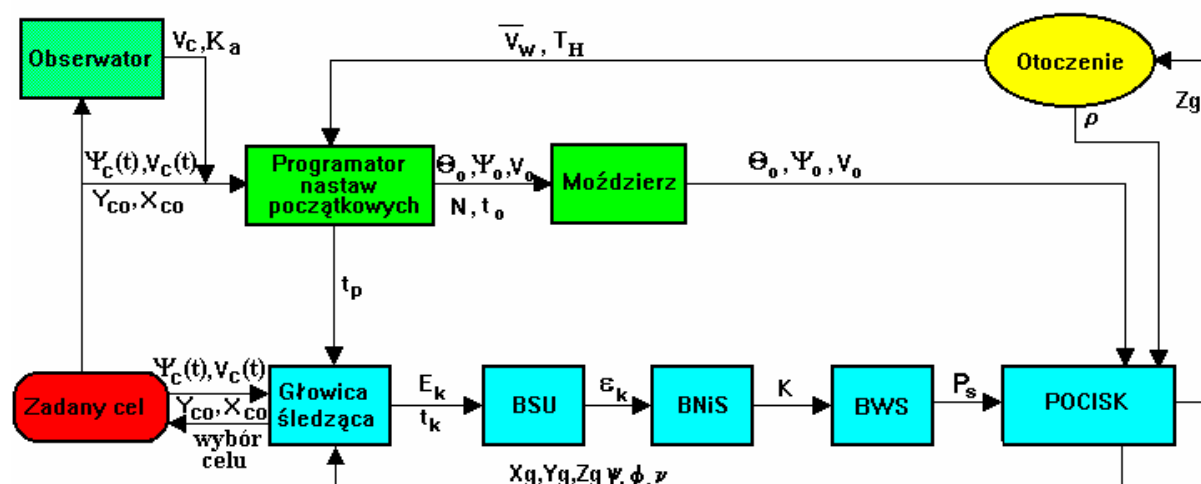
### **1. Wprowadzenie do zagadnienia**

Przedstawiane wyniki badań są rezultatem prac nad sterowanymi pociskami beznapedowymi (pociski mózdzierzowe oraz bombay lotnicze) i ich układami sterowania. Obiekty tego typu początkowo lecą lotem niesterowanym. Wyszukują cele i naprowadzają się na nie dopiero w trakcie ostatniej, stromotorowej fazy opadania. Po odnalezieniu celu autonomicznie naprowadzają się do niego korzystając z danych uzyskanych z zamontowanej na nich głowicy pomiarowej działającej zazwyczaj w zakresie podczerwieni lub światła widzialnego. Uzyskane obrazy są porównywane z zaprogramowanymi przed lotem wzorcami atakowanych celów. W proponowanym przez nas rozwiązaniu za porównanie uzyskanych z głowicy pomiarowej (śledzącej) obrazów, z zapisanymi w pamięci wzorcami odpowiada układ rozpoznawania celów oparty na sieciach neuronowych. W rozważaniach tych nie analizowano zjawisk fizycznych, które wykorzystano do odbioru i przetwarzania sygnałów w detektorze. Ich celem są końcowe efekty działania głowicy śledzącej, a przede wszystkim ustalenie związków między położeniem pocisku i celu, a sygnałami uchybu uzyskiwanymi na "wyjściu" detektora oraz sposobami takiego przetwarzania tych sygnałów, które umożliwiają sterowanie. W przedstawianym referacie skupiono się na zagadnieniu przetworzenia uzyskanych z głowicy śledzącej obrazów do postaci, która pozwala na porównywanie ich zapisanymi w pamięci pocisku wzorcami poprzez układ oparty na sztucznych sieciach neuronowych.

## 2. System samonaprowadzania pocisku

Znane systemy naprowadzania są zazwyczaj rozbudowane i złożone. Dotyczy to szczególnie głowic śledzących, które działają najczęściej jako układy dwuwymiarowe z elementami ruchomymi. Ponadto wszystkie znane rozwiązania systemów naprowadzania, obok układów detekcyjnych, mają giroskopowe układy odniesienia (stinger, strzała, strix itp.).

Koncepcja badanego jednokanałowego naprowadzania jest oryginalna i dotąd nie przebadana. Dotyczy to w szczególności struktury Bloku Sygnału Uchybu (BSU), Bloku Nawigacji i Sterowania (BNiS) oraz Bloku Wykonawczego Sterowania (BWS).



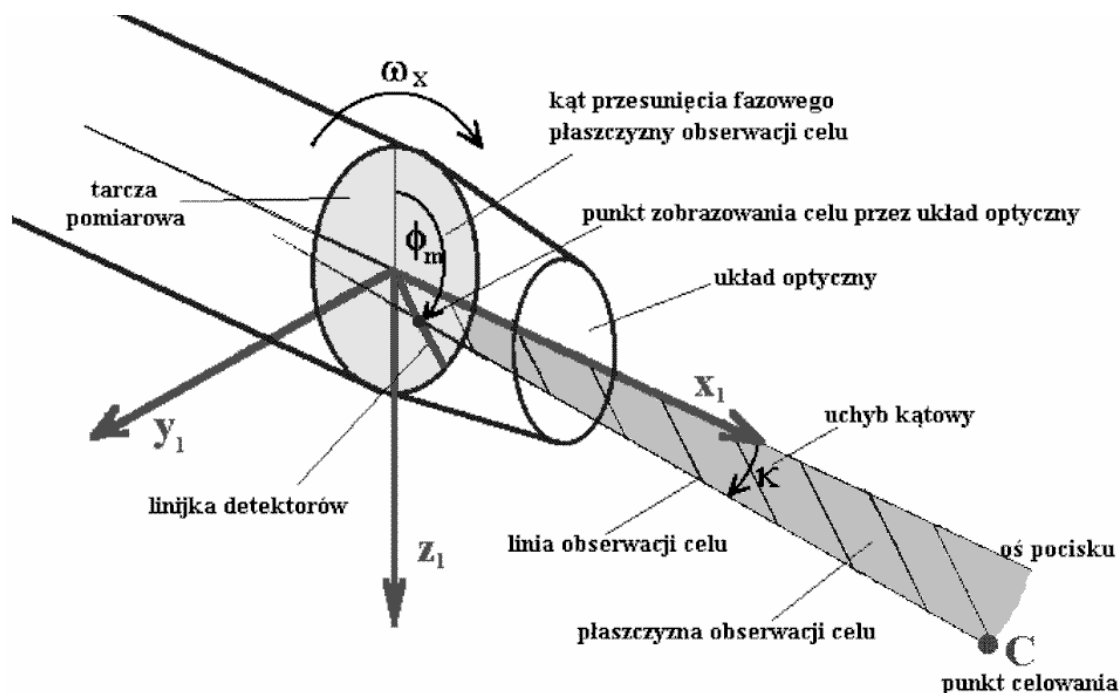
Rysunek. 1. Schemat blokowy systemu naprowadzania pocisku do celu.

System naprowadzania, będący przedmiotem opisu, nie posiada giroskopowego układu odniesienia. Cały proces naprowadzania, realizowany w systemie, jest prowadzony w układzie współrzędnych związanych z wirującym pociskiem. Upraszcza to znacznie aparaturę sterującą ale jednocześnie komplikuje logikę przetwarzania sygnałów oraz dynamikę sterowanego ruchu obiektu.

Ogólny schemat blokowy systemu, opisujący podstawowe jego funkcje przedstawia rysunek 1. Podstawowymi właściwościami tego systemu są:

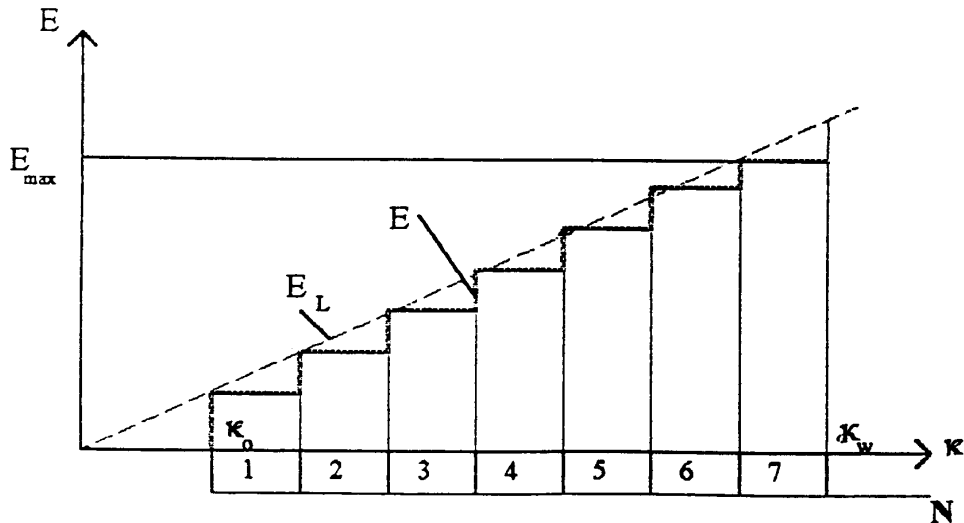
- Głowica Śledząca z liniowym jednowymiarowym detektorem mozaikowym związanym z wirującym pociskiem, umożliwia on nieciągły (raz na jeden obrót pocisku) pomiar kąta odchylenia linii obserwacji celu;
- Blok Sygnału Uchybu przetwarzający impulsowy sygnał uchybu  $E$  na sygnał ciągły  $\varepsilon$ , w bloku tym dokonujemy również filtracji i prognozowania;
- Blok Nawigacji i Sterowania inicjuje proces sterowania oraz ocenia wzajemne położenie pocisku i celu w następstwie czego generuje sygnał sterujący  $K$ ;
- Blok Wykonawczy Sterowania składa się z zespołu jednorazowych silników korekcyjnych rozmieszczonych promieniście wokół środka ciężkości pocisku.

### 3. Głowica śledząca



Rysunek 2. Zasada działania układu pomiarowego Głowicy Śledzącej ( $\kappa$  - uchyb kątowy, E - impulsowy sygnał uchybu,  $\phi_m$  - kąt przechylenia płaszczyzny pomiaru celu).

Do pomiaru położenia celu wykorzystuje się jednowymiarowy - liniowy detektor nieruchomo związany z wirującym pociskiem (rysunek 2). W związku z tym pomiar położenia celu względem pocisku odbywa się we współrzędnych biegunowych. Ponieważ detektor umieszczony jest promieniowo na tarczy pomiarowej wirującej z obiektem, sygnał E o kątowym uchybie względem osi pocisku otrzymuje się w chwilach, w których detektor znajduje się w płaszczyźnie pomiaru celu przechylonej o kąt  $\phi_m$ . Głowica obracając się wraz z pociskiem skanuje obszar wyszukiwania celów raz na obrót. Czyli pełny obraz obszaru poszukiwań otrzymujemy po każdym pełnym obrocie pocisku. Ponieważ głowica śledząca jest związana na stałe z pociskiem częstość skanowania jest związana z prędkością wirowania pocisku. Tak, więc sygnał uchybu E ma charakter ciągu impulsów pojawiających się z częstością równą częstości obrotów pocisku wokół osi wzdłużnej  $x_1$ . Ze względu na segmentową budowę detektora wartość impulsowego sygnału uchybu E zmienia się skokowo z kątem uchybu  $\kappa$  (rysunek 3.).



Rysunek 3. Charakterystyka amplitudy impulsowego sygnału uchybu.

$E_L$  - proporcjonalny sygnał uchybu,

$E$  - skokowy sygnał uchybu,  $\kappa_0$  - strefa nieczułości głowicy

$N$  - numer elementu,  $\kappa_w$  - maksymalny kąt widzenia głowicy

Ruch obrotowy pocisku wymuszony jest przez przekoszenie układu stabilizatorów znajdującego się w tylnej jego części. W takim układzie prędkość wirowania obiektu a więc i związanej z nim sztywno głowicy śledzącej zależy od prędkości jego lotu. Można z dokładnością wystarczającą na potrzeby niniejszych rozważań przyjąć, że zależność ta ma charakter liniowy.

Sterowanie odbywa się w ostatniej fazie lotu podczas opadania. W trakcie opadania obiekt zwiększa prędkość lotu na skutek działania przyspieszenia ziemskiego. Zależność między prędkości obrotowej od prędkości lotu obiektu powoduje, że rośnie również prędkość obrotowa. Pociąga to za sobą również wzrost częstości skanowania pola widzenia głowicy śledzącej.

Liniowy jednowymiarowy detektor koordynatora umieszczony jest na jednym promieniu tarczy pomiarowej. Składa się on z od kilkunastu do kilkuset segmentów (elementów fotoczułych). Tarcza pomiarowa z liniowym detektorem związana jest z pociskiem w taki sposób, że jej oś pokrywa się z osią  $x_1$  pocisku. W związku z tym tarcza pomiarowa leży w płaszczyźnie pocisku  $S, y_1, z_1$ . Założono, że liniowy detektor skierowany jest zgodnie z osią  $z_1$ . Tak skonstruowany detektor pozwala tylko na jednokrotny, podczas pełnego obrotu pocisku, pomiar wypadkowego kąta odchylenia linii obserwacji celu od osi pocisku ( $x_1$ ) w momencie, w którym detektor liniowy znajdzie się w płaszczyźnie określanej jako płaszczyzna obserwacji celu.

Płaszczyznę obserwacji celu tworzy linia obserwacji celu i oś pocisku. W pozostałym zakresie kąta obrotu pocisku i tarczy pomiarowej sygnał uchybu  $E$  jest równy zero.

Sygnał uchybu  $E$  odbierany jest, więc jako impuls o amplitudzie odpowiadającej wypadkowemu kątowi  $\kappa$  w momencie, w którym kąt obrotu pocisku  $\phi$  równy jest przechyleniu  $\phi_m$  płaszczyzny obserwacji celu (rysunek 2.). Wypadkowy uchyb kątowy celu, opisuje kąt odchylenia linii obserwacji celu względem osi symetrii pocisku  $x_1$ .

Liniowy jednowymiarowy detektor (rysunek 2.) Skanuje obserwowany obszar, raz na każdy obrót, zarówno w odniesieniu do układu związanego z wirującym pociskiem, jak również względem układu ziemskiego. W tym drugim przypadku niezbędne jest jednak zainstalowanie giroskopowego układu odniesienia.

## 4. Metody porównywania obrazów

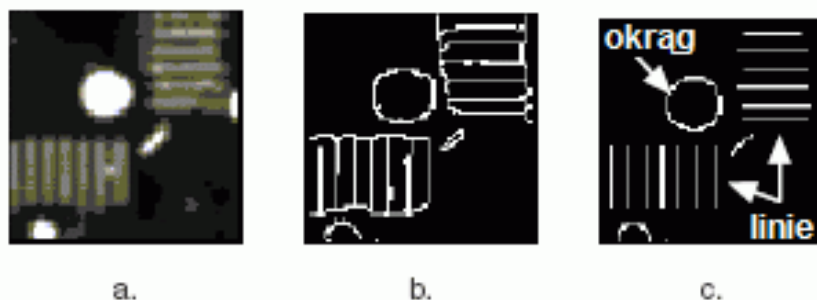
Porównywanie obrazów polega na ustaleniu relacji zgodności dwu zbiorów informacji opisujących obrazy cyfrowe [2], [4] lub ich części. Podstawowe problemy pojawiające się w zadaniach porównywania obrazów, to [2]:

- Możliwość pojawienia się rozwiązań niejednoznacznych,
- Nakłady obliczeniowe wymagane na realizację algorytmu, co może utrudniać działanie układu w czasie rzeczywistym.

Najważniejszym kryterium klasyfikacji algorytmów porównywania obrazów jest podział na metody analityczne i metody neuronowe. Dalsze rozważania w tym rozdziale będą dotyczyły metod analitycznych. Najogólniejszy podział metod analitycznych dotyczy wybranej do analizy jednostki podstawowej obrazu. Jednostkami podstawowymi mogą być grupy pikseli (algorytmy obszarowe) lub obiekty charakterystyczne, takie jak: linie, okręgi bądź bardziej skomplikowane struktury (algorytmy obiektowe).

W algorytmach obszarowych wynikiem porównania obrazów jest współczynnik dopasowania lub macierz współczynników dopasowania w przypadku algorytmów poszukiwania wzorca w kadrze. Sposoby wyznaczenia współczynnika są różne w zależności od stosowanego algorytmu. Najczęściej stosowane algorytmy, to metody odległości (Euklidesa, Minkowskiego, Camberra, Czebyszewa) [3] lub metody korelacyjne [3,6].

W algorytmach obiektowych porównywane są ilość, charakter i typ cech charakterystycznych. Najczęściej stosowane są proste formy geometryczne (linie, okręgi, grupy przylegających pikseli o tej samej lub zbliżonej barwie). Ekstrakcja linii i okręgów dokonywana może być m.in. przez zastosowanie transformaty Hough'a [1]. Niezbędną operacją przygotowawczą do zastosowania tej transformaty jest detekcja krawędzi. Możliwe jest zastosowanie wielu filtrów detekcji krawędzi (Sobela, Robertsa). Rysunek 4. przedstawia ekstrakcję cech charakterystycznych z krokiem pośrednim – detekcją krawędzi.



Rysunek 4. Ekstrakcja cech charakterystycznych:  
a) kadr, b) detekcja krawędzi, c) ekstrakcja elementów charakterystycznych.

W przypadku bardziej skomplikowanych cech stosowana jest transformata Fouriera i porównywane są widma obrazów. Zaletą tej metody jest niezmienniczość transformaty względem typowych przekształceń obrazu wejściowego (przesunięcie, zmiana skali, obrót) [5].

Jeśli wartość parametru wykracza poza pewną, wyznaczoną doświadczalnie wartość progową, uznaje się porównywane obrazy za zgodne.

W przypadku algorytmów FBM kryterium podobieństwa jest definiowane przez funkcję, która jest opisem wybranych własności geometrycznych porównywanych struktur. W celu wyboru podobnych obrazów oblicza się ekstremum tej funkcji. Wybór algorytmu porównywania obrazów jest zadaniem trudnym. Właściwie wybrany i skonfigurowany algorytm to taki, dla którego właściwie dobrano kombinację różnych założeń oraz taki, który wymaga minimum interwencji użytkownika – człowieka.

## 5. Przetwarzanie obrazu

Celem opisywanego w bieżącym rozdziale etapu badań było sprowadzenie obrazu 256 bitowego, wykonanego w podczerwieni do postaci uproszczonej. Pod pojęciem postać uproszczona obrazu rozumie się tutaj obraz binarny (jedno bitowy) z wyraźnie zarysowanymi konturami obiektu (w tym przypadku czołgu), co umożliwiłoby w dalszym etapie rozpoznanie obiektu przez odpowiednio skonfigurowaną sieć neuronową.

Pierwszym etapem przetwarzania jest redukcja obrazów wejściowych do postaci jedno bitowej. Operacja ta wykonywana jest poprzez progowanie obrazu, co wyraża się następującą zależnością:

$$(1) \quad \hat{f}_1(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{dla } f_0(x, y) < A \\ 1 & \text{dla } f_0(x, y) \geq A \end{cases}$$

gdzie:  $M \times N$  – rozmiary obrazu,  $A$  – przyjęty próg,  $A = \max_{(x,y)} f_0(x, y)$ .

Opisany wyżej etap jest etapem wspólnym dla dwóch kierunków dalszego postępowania. W zamiarze autorów było zastosowanie dwóch postaci obrazów wejściowych do sieci neuronowej: krawędzi obiektu oraz wypełnionego obszaru odpowiadającego krawędziom (grupy pikseli).

### 5.1. Detekcja krawędzi obiektu

Detekcja krawędzi polega na poszukiwaniu lokalnych nieciągłości jasności lub kolorów pikseli. Wystąpienie takich nieciągłości stanowi kryterium występowania granic obiektów znajdujących się w kadrze. Detekcja krawędzi jest procesem odwrotnym do filtracji dolnoprzepustowej stosowanej do wygładzania obrazu.

W bieżącym projekcie stosowano metodę detekcji krawędzi Sobela. W metodzie tej obliczane są dwie składowe gradientu jasności (najczęściej w kierunkach ortogonalnych, wzdłuż osi  $x$  i  $y$  układu współrzędnych obrazu) jako:

$$(2) \quad G_{SobelX} = (g_2 + 2g_5 + g_8) - (g_0 + 2g_3 + g_6)$$

$$(3) \quad G_{SobelY} = (g_6 + 2g_7 + g_8) - (g_0 + 2g_1 + g_2)$$

$$(4) \quad g(x, y) = \sqrt{G_{SobelX}^2 + G_{SobelY}^2}$$

gdzie  $g(x, y)$  oznacza jasność piksela w rozpatrywanym punkcie o współrzędnych  $(x, y)$ , a  $g_i$ , to jasności sąsiednich pikseli oznaczonych zgodnie ze schematem przedstawionym na Rysunek..

0	1	2
3	4 (x,y)	5
6	7	8

Rysunek.5. Oznaczenie sąsiednich pikseli w metodzie Sobela.

## 5.2. Grupowanie pikseli

W celu zidentyfikowania obszaru obrazu należącego do jednego obiektu dokonano segmentacji obrazu. Wykorzystano algorytm identyfikujący piksele obrazu binarnego połączone w grupy o zadanej liczbie pikseli [**Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.**]. Przykładowo, dla obrazu zapisanego w postaci macierzy pod postacią przedstawioną na rysunku 6. w wyniku działania algorytmu otrzymuje się macierz, w której każda z wyodrębnionych grup pikseli oznaczona jest kolejną liczbą naturalną (rysunek 7.).

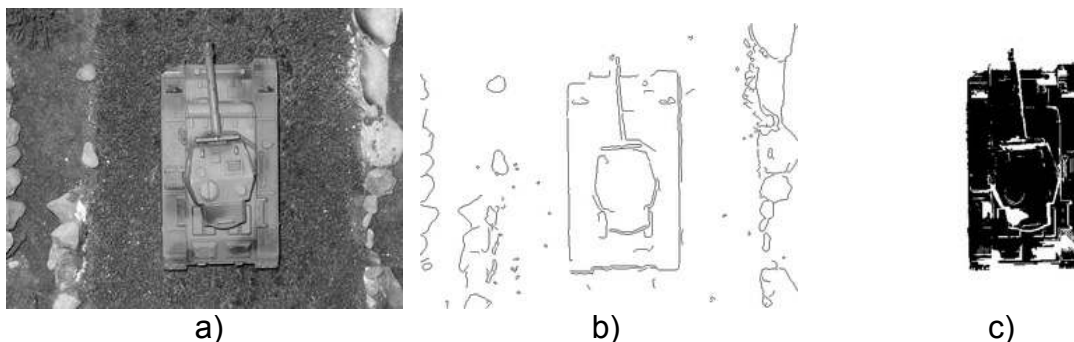
1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	0	1	1	0	0
1	1	1	0	1	1	0	0
1	1	1	0	0	0	1	0
1	1	1	0	0	0	1	0
1	1	1	0	0	0	1	0
1	1	1	0	0	1	1	0
1	1	1	0	0	0	0	0

Rysunek.6. Obraz binarny przed grupowaniem pikseli.

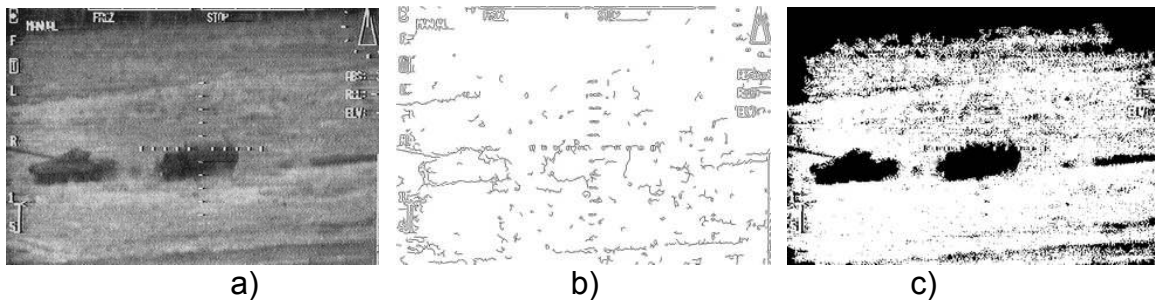
1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	0	2	2	0	0
1	1	1	0	2	2	0	0
1	1	1	0	0	0	3	0
1	1	1	0	0	0	3	0
1	1	1	0	0	0	3	0
1	1	1	0	0	3	3	0
1	1	1	0	0	0	0	0

Rysunek.7. Macierz przedstawiająca pogrupowane piksele.

W wyniku przeprowadzonych prób otrzymano wypełnione kontury obiektów (czołgów) znajdujących się na obrazach w podczerwieni. Kontury te stanowią materiał wejściowy do przetwarzania z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji. Przykłady obrazów poddanych przetwarzaniu opisanemu w bieżącym rozdziale przedstawiają doświadczenia na fotografii modelu wykonanej w zakresie światła widzialnego: rysunek 8., doświadczenia na fotografii czołgu i pojazdu opancerzonego wykonanej w zakresie podczerwieni: rysunek 9.



Rysunek.8. Przetwarzanie obrazu modelu: a) obraz wejściowy, b) kontury, c) wyłuskane obiekty.



Rysunek. 9. Przetwarzanie obrazu rzeczywistego pojazdu: a) obraz wejściowy, b) kontury, c) wyłuskane obiekty.

Poszukiwanie czołgu (lub innego obiektu) w kadrze przeprowadzono porównując poszczególne grupy pikseli ze wzorcami zapisanymi w pamięci systemu. Zadanie to w bieżącym projekcie było realizowane za pomocą sieci neuronowych.

*Badania prowadzono w ramach grantu MNil Nr OT00A02826*

## Literatura

1. Gonzalez, R. C., Richard, E., Steven L., "Digital Image Processing Using MATLAB", Upper Saddle River, NJ Pearson Prentice-Hall, 2004.
2. Heipke, Ch., "Overview of Image Matching Techniques", Technische Universitat Munchen, Monachium 1996.
3. Stateczny, A., "Nawigacja porównawcza", Gdańskie Towarzystwo Naukowe, Gdańsk 2001.
4. Tadeusiewicz, R., Flasiński, M., "Rozpoznawanie obrazów", PWN, Warszawa 1991.
5. Wójcik, J., Niedziela, T., Rakowska, J., "Metoda automatycznej identyfikacji obrazów defektów w płaszczyźnie dyfrakcyjnej", Prace naukowe ITWL, Zeszyt 14, s. 161-176, Warszawa 2002.
6. Zasuwa M., Narkiewicz J., "Przegląd algorytmów porównania ze wzorcem w nawigacji obserwacyjno – porównawczej", Mechanika, Zeszyt nr 56 – Awionika, Publikacje Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2001.
7. R. Vogt, R. Głębocki, „Problemy badawcze i techniczne związane z projektowaniem systemów sterowania lotem małokalibrowych pocisków inteligentnych” IV Konferencja Awioniki Polańczyk 2004.