

dr inż. Robert Głębocki
 dr inż. Maciej Zasuwa
 mgr inż. Grzegorz Świętoń
 Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej Politechniki Warszawskiej

NAWIGACJA WIZYJNA DLA AUTONOMICZNEGO POJAZDU LĄDOWEGO

Artykuł przedstawia propozycję zastosowania prostego algorytmu porównywania wzorców dla autonomicznej platformy ruchomej przeznaczonej do wykrywania i niszczenia min lądowych. Głównym urządzeniem wykorzystywanym do akwizycji obrazu jest camera z matrycą CCD. Do przetwarzania obrazu wykorzystana została metoda Scene Matching Area Correlation (SMAC) oparta na algorytmie korelacji wzajemnej. System został przetestowany zarówno w symulacji, jak również podczas prób na pojeździe lądowym. Sprawność algorytmu przetwarzania sygnału podczas testów potwierdziła przydatność opracowanej metody do określania położenia oraz prędkości pojazdu lądowego. System nawigacji wizyjnej oparty na prostym algorytmie przetwarzania obrazu może być zastosowany na pojazdach ruchomych autonomicznie lub jako jeden z komponentów zintegrowanego systemu nawigacyjnego.

VISUAL NAVIGATION FOR AUTONOMOUS LAND VEHICLE

An idea of visual navigation system with a simple pattern matching algorithm for autonomous mobile platform for land mines detection and destruction was proposed. A CCD camera is the system's main sensor for image acquisition. A Scene Matching Area Correlation (SMAC) method based on a cross correlation technique is implemented for image processing. The system was tested both in off-line simulations and on-board of a land vehicle. The efficiency of the signal processing algorithm during the field tests confirmed efficiency of the methods developed for determination of vehicle position and velocity. A visual navigation system based on simple image processing techniques may be applied on board mobile vehicles in an autonomous way or as a component of integrated navigation system.

1. WSTĘP

Artykuł przedstawia jedno z pierwszych przybliżeń systemu nawigacji wizyjnej dla autonomicznego pojazdu lądowego projektowanego w ramach projektu badawczego dotyczącego autonomicznego systemu detekcji i neutralizacji min niemetalowych oraz materiałów wybuchowych. Sprzęt wykorzystywany w projekcie może być zakwalifikowany do trzech głównych grup: platformy mobilnej wraz z układami napędowym i sterującym, wyposażenie do wykrywania min i innych materiałów wybuchowych oraz systemu nawigacyjnego.

Projektowany system ma za zadanie operować w środowisku zewnętrznym całkowicie autonomicznie. Sprzęt dotyczący wykrywania min i materiałów wybuchowych jest przeznaczony do ich wykrywania a następnie niszczenia bądź podjęcia odpowiednich działań w celu całkowitego ich unieszkodliwienia. Zagadnienie wykrywania min niemetalowych jest zagadnieniem trudnym od strony technicznej. Konwencjonalne metody wykrywania min (oparte o wykrywacze metalu) są nieprzydatne w tym przypadku [1]. W projekcie

proponowane są dwa rozwiązania dla postawionego problemu. Pierwsze rozwiązanie oparte jest o wykrywacz zapachów zwany również „sztucznym nosem”. Jest on przeznaczony zwłaszcza do wykrywania związków chemicznych emitowanych przez obudowy min. Wykorzystanie wykrywacza zapachów jest nowym oraz oryginalnym podejściem do rozwiązania problemu, jakim jest wykrywanie plastikowych min. Druga metoda oparta jest o możliwość wykrywania materiałów wybuchowych poprzez wykorzystanie spektrometrii ruchliwości jonów (*ion mobility spectroscopy*, IMS). Jest ona niezbędna do badań nad wpływem warstwy ziemnej na możliwość wykrywania różnych rodzajów materiałów wybuchowych. W momencie, gdy mina zostaje wykryta i oznaczona – zostaje zniszczona [2]. Niszczenie min jest realizowane poprzez użycie działka pirotechnicznego lub poprzez detonację małego ładunku wybuchowego na minie).

W trakcie projektu budowana jest autonomiczna platforma mobilna. Platforma jest wyposażona w hybrydowy system napędowy. Wyposażenie do detekcji i niszczenia min jest zainstalowane na platformie. Każda platforma wykorzystywana w operacji wykrywania min otrzymuje obszar do zbadania. Platforma porusza się po wyznaczonym do zbadania obszarze wykorzystując do nawigacji zintegrowany system INS/GPS.

Dokładność zintegrowanego systemu nawigacji GPS/INS nie jest wystarczająca do precyzyjnego podejścia do miny w trakcie fazy detekcji i niszczenia miny. Po wstępnym rozpoznaniu terenu lub detekcji min w podczerwieni, platforma musi precyzyjnie (z dokładnością do 0,3 m) zbliżyć się do miny i użyć „sztucznego nosa” lub układu IMS do końcowej lokalizacji położenia miny. Po zakończeniu fazy detekcji zadaniem systemu nawigacyjnego jest: precyzyjnie wycofać się na bezpieczną odległość po tej samej trajektorii, jak w trakcie zbliżenia. Wycofanie następuje po uprzednim pozostawieniu ładunku detonującego lub materiału na celu użycie działka pirotechnicznego. W celu wsparcia zintegrowanego systemu INS/GPS został wybrany system nawigacji wizyjnej oparty o algorytmy śledzące. Poza odpowiednio dokładną nawigacją w sąsiedztwie miny, system nawigacji wizyjnej wzbogaci system o możliwość detekcji przeszkód w terenie. W tym celu dokonywane jest skanowanie przestrzeni w zakresie widma promieniowania widzialnego oraz podczerwonego.

Niniejszy artykuł skupia się na metodach wizyjnych zastosowanych w przedstawionym powyżej systemie.

2. WPROWADZENIE DO METOD Nawigacji WIZYJNEJ

W ciągu ostatnich dziesięcioleci pozycjonowanie, obserwacja oraz nawigacja zostały zdominowane przez metody nawigacji satelitarnej. Systemy nawigacji satelitarnej są wspierane poprzez systemy naziemne DGPS oraz satelitarne jak np. WAAS, EGNOS, pozwalające nie tylko na wyższą dokładność wyznaczania położenia, prędkości oraz czasu, ale również na zwiększenie dostępności oraz integralności sygnałów [3][4].

Główna wada niepozwalająca na używanie systemów nawigacji satelitarnej, jako jedynych systemów nawigacji, wywodzi się z wykorzystania fal radiowych do przesyłania informacji, która tym samym może zostać (celowo lub przypadkowo) zakłócona. Jest to jedna z głównych przyczyn rozwoju zintegrowanych systemów nawigacyjnych opartych na kilku czujnikach. Różnice w działaniu, metodach, sprzęcie, oprogramowaniu [5] w przetwarzaniu sygnałów są wykorzystywane w zintegrowanych systemach do zwiększenia niezawodności oraz integralności.

Nawigacja wizyjna to najstarsza metoda wykorzystywana ka żdego dnia przez ludzi do określania położenia, w której po łożenie różnych obiektów jest okre ślane poprzez percepcję oka. Po pojawieniu si ę niedrogich komputerów do przetwarzania sygna łów oraz kamer do akwizycji obrazu stało si ę czymś naturalnym wykorzystanie ich, jako czujników w systemach nawigacyjnych. Metody i algorytm y opracowane na potrzeby detekcji obrazu m ożą być zastosowane również w innych zakresach fal elektrom agnetycznych (radiowych, podczerwonych, mikrofalowych i in.). Lokalne param etry nawigacyjne m ożą zostać wyznaczone poprzez wykorzystanie technik przetwarzania obrazu [6][7][8], czyli porównanie informacji z czujników z danymi przechowywanymi w pamięci [9].

Zaletami nawigacji wizyjnej s ą autonomiczność oraz potencjalnie wysoka dok ładność. System wizyjny nie wysy ła żadnych sygnałów, dzięki czemu może mieć wiele ró żnych zastosowań zarówno w rozwi ązaniach cywilnych jak i m ilitarnych. Wadą systemów wizyjnych jest spadek ich wydajności w przypadku zmiennych warunków oświetleniowych.

Metody przetwarzania obrazu znalaz ły swoje zastosowanie w nawigacji l ądowej, morskiej oraz lotniczej. Zastosowanie metod wizyjnych w nawigacji l ądowej pozwoliło na zwiększenie bezpieczeństwa i wygody poprzez wsparcie operatora dodatkow ą informacją. Metody przetwarzania obrazu znajduj ą swoje zastosowanie również w robotyce do wyznaczania pozycji wewnątrz jak i na zewnątrz pomieszczeń. Urządzenia do akwizycji obrazu m ożą być umieszczone zarówno na robocie jak również poza nim.

W nawigacji wizyjnej wykorzystywane s ą zarówno analityczne m etody przetwarzania sygnałów oraz metody oparte na sztucznej inteligencji.

Metody analityczne m ają silne podstawy m atematyczne pozwalające na uwierzytelnienie zbieżności oraz dokładności wykonywanych operacji, lecz s ą jednocześnie bardzo wrażliwe na zakłócenia sygnału. W praktyce skuteczność rozwiązania może być ograniczona. Istnieje kilka problemów, które powinny zosta ć rozwiązane w celu uzyskania wydajnego procesu przetwarzania obrazu: m ożliwość niejednoznacznych rozwi ązań, oraz du że obciążenie obliczeniowe.

Zastosowanie metod opartych o sztucz n ą inteligencję może skrócić czas obliczeń w porównaniu do m etod analitycznych. Najwi ęszą wadą metod sztucznej inteligencji jest charakter "czarnej skrzynki" oraz konieczność wcześniejszego treningu.

W artykule zastosowane zosta ło następujące nazewnictwo. Scena rozum iana jest jako obszar działania systemu nawigacyjnego. Scena jest rejestrowana w form ie sekwencji obrazów. Obraz jest wynikiem rejestracji sceny przez kamerę w wybranym momencie czasu. Zawartość obrazu nazywana jest kadrem. Wzorzec oznacza rozpoznawalną część obrazu. Zazwyczaj jest to wybrany obiekt sceny. Podczas przetwarzania obrazu wzorzec jest poszukiwany w dwóch lub więcej kolejnych kadrach. Wzorzec może być zarejestrowany przed inicjalizacja systemu nawigacyjnego. Porównanie wzorca (obrazu) oznacza ocen ę poziomu zgodności pomiędzy danymi aktualnie otrzymanymi i danymi przechowywanymi w pamięci.

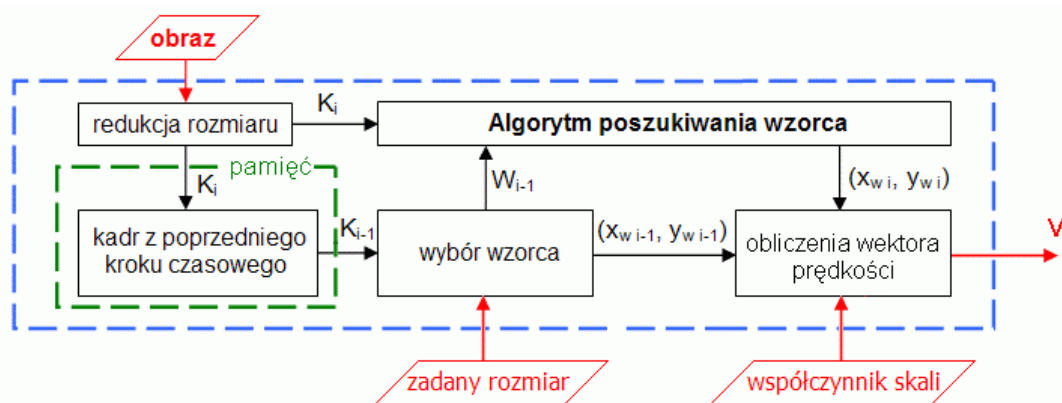
3. KONCEPCJA SYSTEMU NAWIGACJI WIZYJNEJ

W projekcie tym wykorzystywana jest analityczna metoda porównywania wzorców. Przyjęte zostały następujące założenia: wykorzystywane jest takie sam o lub zbli żone pasmo fal elektromagnetycznych podczas rejestracji obrazów zawieraj ących charakterystyczne wzorce w obu przypadkach: do przechowywania wzorca w pam ięci oraz podczas pracy system u; podczas rejestracji obrazu widoczno ść sceny i jej zawarto ści nie ró żni si ę zasadniczo

między kolejnymi obrazami; wybrane wzorce w kolejnych obrazach nie ulegają zmianie, nie są przezroczyste oraz nie zmieniają swojego położenia względem pozostałych obiektów sceny; przed inicjalizacją systemu znany jest rozmiar obrazu, przybliżony rozmiar wzorca oraz prawdopodobieństwo nakładania się wzorów w dwóch kolejnych obrazach.

Założenia te pozwalają na rozpoznanie wzorca po przeskanowaniu kadru. Zastosowana w tym projekcie metoda porównywania obrazów składa się z trzech faz: rejestracji obrazu i przetwarzania wstępnego (wykrywanie krawędzi), rozpoznawania wzorców oraz porównywania wzorców. W wyniku zastosowania kamery znany jest przedział czasowy. Poza tym, przemieszczenie pojazdu oraz jego prędkość mogą być obliczone przy założeniu, że przedział czasowy jest stały oraz urządzenie rejestrujące obraz jest sztywno przymocowane do pojazdu.

Schemat blokowy procedury wyznaczania przemieszczenia i prędkości jest przedstawiony na rys. 1.



Rys. 1. Schemat algorytmu wyznaczającego przemieszczenie i prędkość

Prędkość pojazdu obliczana jest z wykorzystaniem rozbieżności pozycji wybranego wzorca w dwóch kolejnych kadrach.

W jednym kroku czasu wykonywane są dwie operacje: rozpoznawanie wzorca w klatce obrazu zarejestrowanej w aktualnym kroku czasu oraz wybór wzorca przeznaczonego do rozpoznania w klatce obrazu rejestrowanej w następnym kroku czasu.

Obliczenia położenia wybranego wzorca dokonywane są w lokalnym kartezjańskim układzie współrzędnych Oxy kadru. Początek układu współrzędnych znajduje się w lewym górnym rogu kadru. Oś współrzędnych skierowane są równoległe do osi symetrii kadru.

Współrzędne wybranego wzorca w_{i-1} (x_{wi-1}, y_{wi-1}) w kadrze K_{i-1} zarejestrowane w $i-1$ chwili czasu są przechowywane w pamięci systemu. Ten sam wzorec jest poszukiwany w kadrze K_i . Wzorec w_{i-1} oraz kadr K_i stanowią dane wejściowe dla algorytmu porównywania wzorca. Szczegóły algorytmu porównywania są przedstawione w dalszej części dokumentu.

Przemieszczenia pojazdu w dwóch prostopadłych kierunkach są obliczane z wykorzystaniem współrzędnych wzorca (x_{wi-1}, y_{wi-1}) w t_{i-1} chwili czasu oraz współrzędnych (x_{wi}, y_{wi}) w t_i chwili czasu (w pikselach na sekundę) wg wzoru:

$$\Delta I_x = x_{wi} - x_{wi-1} \quad (1)$$

$$\Delta I_y = y_{wi} - y_{wi-1} \quad (2)$$

Przemieszczenia (1) oraz (2) wykorzystywane są do obliczenia prędkości kamery. W związku z możliwością deformacji obrazu (występującej zazwyczaj w procesie rejestracji obrazu) dwa składniki prędkości w kierunkach prostopadłych są obliczane oddzielnie:

$$V_x = \frac{\Delta I_x C_x}{\Delta t} \quad (3)$$

$$V_y = \frac{\Delta I_y C_y}{\Delta t} \quad (4)$$

gdzie: Δt - przyrost czasu, C_x , C_y - współczynniki skali, opisujące relacje pomiędzy przemieszczeniem kadru (w pikselach) a przemieszczeniem kamery (w metrach). Współczynniki skali pozwalają na skorygowanie zniekształcenia kadru przez układ optyczny kamery. Metoda wyznaczania wartości współczynników C_x i C_y opisana jest w rozdziale Testy Systemu.

Równania (3) i (4) przedstawiają prostą liniową zależność pomiędzy przemieszczeniem i prędkością pojazdu. Zależność ta jest w rzeczywistości nieliniowa. Przybliżenie liniowe wynika z faktu, że wzorzec jest dwuwymiarowy oraz równoodległy od kamery w kolejnych chwilach czasu.

Całkowite przemieszczenie pojazdu oraz jego prędkość są wyznaczane zgodnie ze wzorem:

$$\Delta r = \sqrt{(\Delta I_x C_x)^2 + (\Delta I_y C_y)^2} \quad (5)$$

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad (6)$$

Przemieszczenie obiektu w lokalnym układzie współrzędnych jest obliczane w bloku transformacji współrzędnych przemieszczenia korzystając z obliczonego przemieszczenia kamery oraz kursu (otrzymanego z innych urządzeń nawigacyjnych: INS, GPS lub kompas):

$$\Delta X = \Delta r \sin(\Psi) \quad (7)$$

$$\Delta Y = \Delta r \cos(\Psi) \quad (8)$$

Następnie pozycja pojazdu jest obliczana poprzez dodanie przemieszczenia do współrzędnych położenia, które zostały obliczone w poprzedniej chwili czasu:

$$X = X_0 + \Delta X \quad (9)$$

$$Y = Y_0 + \Delta Y \quad (10)$$

Współrzędne położenia X_0 i Y_0 są pobierane z wcześniejszych obliczeń systemu wizyjnego wykonanych w poprzedniej chwili czasu. Jeżeli jest dostępne inne źródło współrzędnych położenia, współrzędne X_0 i Y_0 mogą być pobierane z tego źródła.

4. ALGORYTMY PRZETWARZANIA OBRAZU

Algorytm porównywania wzorców jest zazwyczaj algorytmem bardzo czasochłonnym i musi być uważnie wybrany w przypadku systemów czasu rzeczywistego. W celu skrócenia czasu obliczeń wykorzystywane są różne metody przetwarzania wstępnego obrazu. Rozmiary kadru oraz wzorca mogą zostać zmienione, a proces porównywania może zostać przeprowadzony dla zmienionych rozmiarów. Proces ten nazywany jest porównywaniem piramidalnym

(pyramidal matching). Po wyznaczeniu przybliżonego położenia wzorca w kadrze, dokładne położenie jest obliczane w kadrze o rzeczywistym rozmiarze.

Inną metodą wstępnego przetwarzania obrazu jest wykrywanie krawędzi i/lub analiza geometryczna kadrów. W niektórych przypadkach te metody są bardziej wydajne w porównywaniu obrazów reprezentowanych w formie binarnych danych. W analizie geometrycznej proste figury geometryczne (np. okręgi i linie) są porównywane do krawędzi wzorca w fazie przybliżonego porównywania obrazów.

Selekcja algorytmów rejestracji obrazu, przetwarzania wstępnego oraz porównywania wzorców dla systemów nawigacji jest trudna i jest kwestią kompromisu. Zastosowanie metod zaawansowanych numerycznie zwiększa szansę na obliczenie dokładnego rozwiązania. Jednak takie podejście może wydłużyć czas obliczeń, który jest jednym z najważniejszych współczynników w systemach czasu rzeczywistego. Sposobem na uniknięcie nadmiernego czasu obliczeń jest wykorzystanie prostych algorytmów, które mogą się charakteryzować zmniejszoną dokładnością.

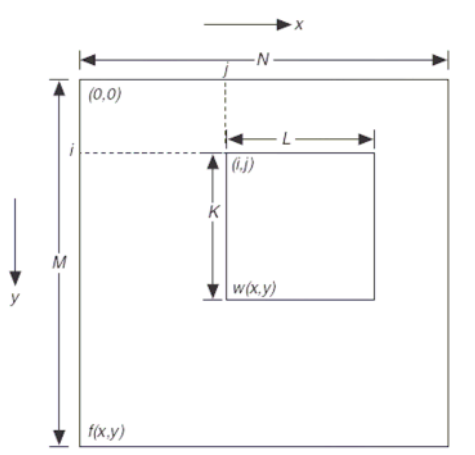
Na potrzeby systemu nawigacji w projekcie wybrany został algorytm korelacji wzajemnej w związku ze zdolnością do efektywnego porównywania obrazów przy jednoczesnym względnie niskim czasie obliczeń.

Zadaniem algorytmu porównywania wzorca jest identyfikacja położenia wzorca w klatce obrazu. Zazwyczaj algorytm porównujący maksymalizuje lub minimalizuje jeden z wybranych parametrów (wskaźników). Algorytm porównywania wzorca jest podstawową częścią systemu nawigacji wizyjnej, wpływając na jego dokładność oraz wydajność.

Obliczenie współczynnika korelacji wzajemnej jest najprostszym algorytmem do porównywania dwóch obrazów o takim samym rozmiarze. Zostało to zastosowane w trakcie tych badań w związku z wymogami dla systemu czasu rzeczywistego. Współczynnik korelacji wzajemnej jest obliczany zgodnie ze wzorem:

$$\rho = \frac{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (g_1(x, y) - \mu_1)(g_2(x, y) - \mu_2)}{\sqrt{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (g_1(x, y) - \mu_1)^2 \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (g_2(x, y) - \mu_2)^2}} \quad (11)$$

gdzie: $g_i(x, y)$ - jasność piksela o współrzędnych (x, y) w kadrze i , x, y - współrzędne piksela, M, N - rozmiar kadru w pikselach.



Rys. 2. Procedura korelacji wzajemnej

Prostokąt o rozmiarze $M \times N$ (w pikselach) tworzy kadr (Rys. 2), w którym wzorec ($K \times L$) jest poszukiwany. Najbardziej pasujące wzorce są otrzymywane w momencie, gdy współczynnik korelacji wzajemnej $\rho(i, j)$ przyjmuje najwyższą wartość. Wartość współczynnika opisuje najlepsze dopasowanie obrazów. W wartości współrzędnych (i, j) przyjmują wartości: $i = 0, 1, 2, \dots, M - K$; $j = 0, 1, 2, \dots, N - L$.

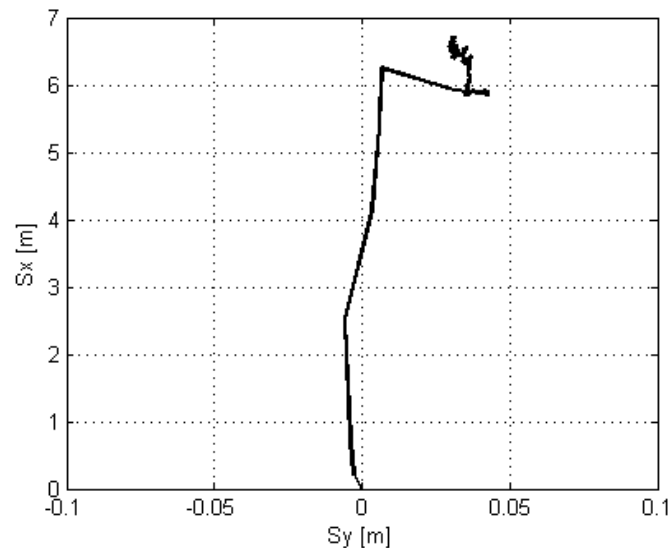
Obliczenia współczynnika korelacji wzajemnej mogą zostać rozszerzone na przypadek obrazów o różnych rozmiarach (duży kadr i relatywnie mały wzorec) poprzez transformację wzoru (11):

$$\rho = \frac{\sum_{x=0}^{L-1} \sum_{y=0}^{K-1} (g_1(x, y) - \mu_1)(g_2(x+i, y+j) - \mu_2(i, j))}{\sqrt{\sum_{x=0}^{L-1} \sum_{y=0}^{K-1} (g_1(x, y) - \mu_1)^2 \sum_{x=0}^{L-1} \sum_{y=0}^{K-1} (g_2(x+i, y+j) - \mu_2(i, j))^2}} \quad (12)$$

5. TESTY SYSTEMU

System nawigacji opisany wcześniej został złożony oraz przetestowany na polu żdzie czterokołowym wyposażonym w kamerę CCD (The Imaging Source DFK 31BF03), obiektyw ze zmienną ogniskową (Computar H6Z0812), komputer (notebook z procesorem Pentium 4 3200 MHz), urządzenia zasilające. Dane z kamery były rejestrowane z częstotliwością 20 Hz.

Celem testu systemu było określenie wydajności systemu nawigacji wizyjnej: sprzętu oraz oprogramowania. System został poddany w pierwszej kolejności kalibracji a następnie zostały przeprowadzone testy pomiaru prędkości oraz położenia.



Rys. 3. Droga przebyta przez pojazd

Na Rys. 3. zamieszczony został wynik jednego z testów przeprowadzonych dla systemu nawigacji wizyjnej. Pojazd miał za zadanie przejechanie odległości 6 m w linii prostej.

Na podstawie wyników testów można stwierdzić, że system ma satysfakcjonującą dokładność dla wielu zastosowań. Wysoka wydajność jest rezultatem odpowiednio dobranego

i dostosowanego algorytmu porównywania wzorców. Na tej podstawie można z kolei stwierdzić, że system nawigacyjny może być zastosowany, jako system wspomagający (a nawet w szczególnych przypadkach – zastępujący) system GPS na autonomicznych pojazdach.

Prace wykonano w ramach grantu MNiSW nr Nr 0006/R/T00/2008 „Autonomiczny system wykrywania i niszczenia min niemetaliowych”.

6. LITERATURA

- [1] Gader P. D. Pattern recognition for humanitarian de-mining, 16th International Conference on Pattern Recognition 2002 IEEE
- [2] Bhuyan A., Nath B., Antipersonnel mine detection and classification using GPR image. 18th International Conference on Pattern Recognition 2006 IEEE
- [3] El-Rabbany, A., Introduction to GPS: the Global Positioning System., Artech House, Boston 2002.
- [4] Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Collins, J., Global Positioning System: Theory and Practice., Springer-Verlag, Wiedeń 2001.
- [5] Kayton, M., Fried, W. R., Avionics Navigation Systems., John Wiley, Nowy York 1997.
- [6] Bose, T., Chen, M., Meyer, F., G., Digital Signal and Image Processing, John Wiley & Sons, Hoboken 2004.
- [7] Bow, S., Pattern Recognition and Image Preprocessing, 2nd ed., Marcel Dekker, Nowy York 2002.
- [8] Pratt, W. K., Digital Image Processing, 3rd ed., John Wiley and Sons, Nowy York 2001.
- [9] Stateczny, A., Nawigacja porównawcza, Gdańskie Towarzystwo Naukowe, Gdańsk, 2001.