

dr inż. Robert Głębocki

mgr inż. Grzegorz Świętoń

Politechnika Warszawska, Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej

WYBRANE ZAGADNIENIA Nawigacji i sterowania AUTONOMICZNYM POJAZDEM NAZIEMNYM

W artykule autorzy zaprezentowali system autonomicznej nawigacji i sterowania bezzałogowej platformy naziemnej. Całość systemu nawigacji składa się ze zintegrowanego układu INS/GPS współdziałającego z układem nawigacji wizyjnej. Autorzy zaprezentowali zastosowaną metodę nawigacji wizyjnej oraz przykładowe wyniki z badań terenowych.

SOME ASPECTS OF CONTROL AND NAVIGATION SYSTEM FOR AUTONOMOUS UGV

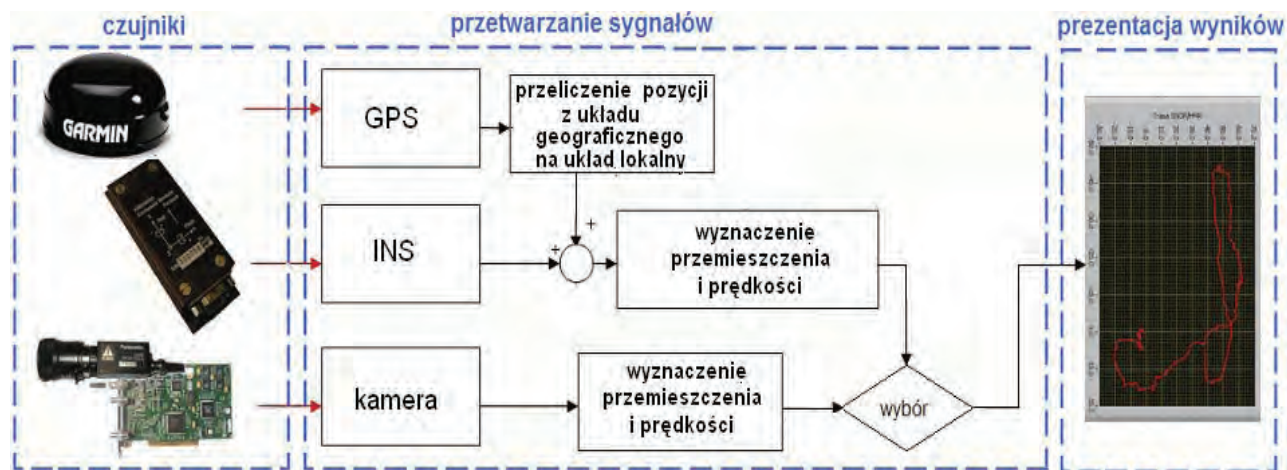
In the paper authors presents system of autonomous navigation and control for UGV. The whole navigation system is the compilation of integrated INS/GPS and visual navigation. Authors present the visual navigation method and some results from field tests of the platform.

1. WPROWADZENIE

Przedstawiane w niniejszym artykule wyniki prac są elementem większego projektu, którego celem jest opracowanie autonomicznego systemu wykrywania i niszczenia min i ładunków niemetalowych i ładunków wybuchowych. Wraz z rozwojem tzw. konfliktów asymetrycznych narasta problem unieszkodliwiania różnego rodzaju min i ładunków kombinowanych. Ponadto jako pozostałość po wojnach toczonych w różnych częściach świata mamy do czynienia z dużą ilością min, często niemetalowych. Stanowią one duże zagrożenie dla ludności cywilnej. Są istotną przeszkodą w powrocie normalnego życia społecznego-gospodarczego na tereny, na których wcześniej toczyły się konflikty zbrojne. Z tych powodów grupa badaczy z Politechniki Warszawskiej i Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów podjęła działania w celu opracowania metod wykrywania i niszczenia takich min oraz opracowania do tego celu całościowego autonomicznego mobilnego systemu. Ma on być umieszczony na mobilnej platformie z własnym napędem i układem sterowania umożliwiającym autonomiczne działanie w terenie. System wykrywania min wyposażony jest w urządzenia umożliwiające detekcję min i innych ładunków wybuchowych oraz w układy niszczenia lub neutralizacji. Problem lokalizacji min niemetalowych jest z technicznego punktu widzenia trudny, ponieważ z konwencjonalnymi metodami lokalizacji min (oparte na wykrywaczach metalu) są w tym przypadku nieprzydatne. W projekcie proponujemy rozwiązanie tego problemu kilkoma sposobami. Wstępną lokalizację min przeprowadzamy poprzez analizę ultradźwiękową lub w podczerwieni. Po wstępnym wykryciu podejrzanego obiektu lokalizację min niemetalowych przeprowadzamy metodami wykorzystującymi analizę zapachową przy użyciu systemu elektronicznego detektora zapachu – „sztucznego nosa” – specjalnie wyczulonego na detekcję związków chemicznych wzbudzanych z obudowyminy. Drugi sposób rozpoznania opiera się na możliwości wykrywania materiałów

wybuchowych min za pomocą spektroskopii mobilności jonów (IMS). Niszczenie min odbywa się za pomocą armaty bezdrutowej lub poprzez pozostawienie na miejscu ładunku niszczącego. W tym celu wykorzystane są mieszaniny termitowe.

2. SYSTEM STEROWANIA PLATFORMY MOBILNEJ



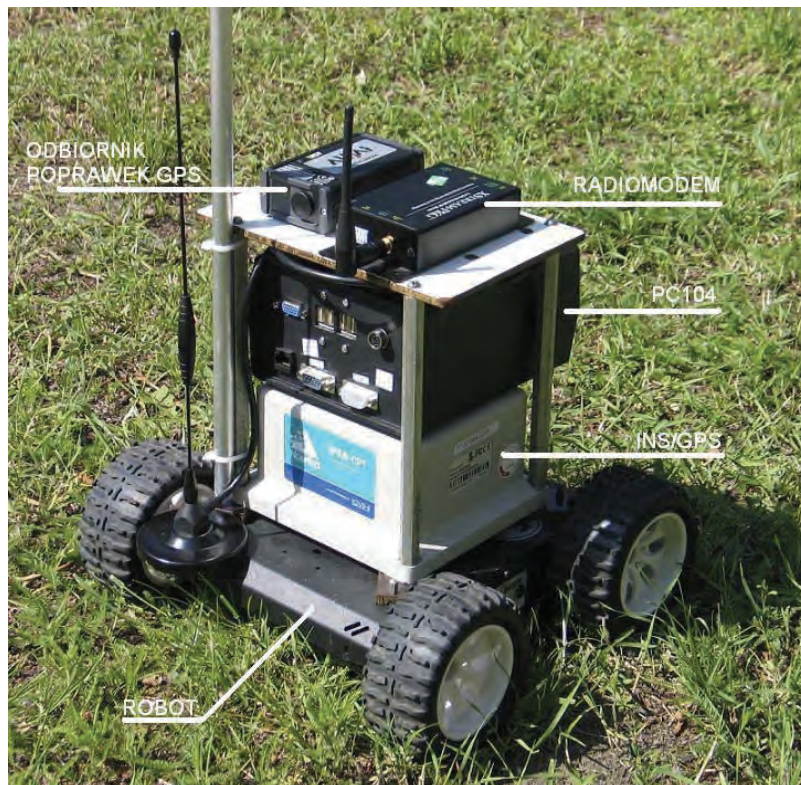
Rys.1. Ogólny schemat działania przyjętego systemu nawigacyjnego

Całość systemu wykrywania i niszczenia min jest umieszczona na mobilnej platformie. W tym celu zaadoptowano elektryczną platformę jezdnią robota pirotechnicznego IBIS. Przyjęte metody wyszukiwania i niszczenia min wymagają bardzo precyzyjnej nawigacji i sterowania. Dlatego zastosowano różne metody określania położenia pojazdu oraz jego sterowania w różnych etapach jego pracy. Ogólny schemat działania zastosowanego systemu nawigacji przedstawia rys.1. Postawiono oprócz tego na zintegrowanym systemie INS/GPS uzupełnionym systemem nawigacji wizyjnej. Wymagania takiego systemu determinują pracę układu nawigacji i sterowania platformy. W trakcie patrolowania wyznaczonego terenu (trasy) korzystamy głównie ze wskazań zintegrowanego systemu INS/GPS. Nawigacja wizyjna pełni tylko rolę wspomagającą. Jednak w trakcie podejścia do miny celem analizy zapachowej a następnie, w przypadku jej wykrycia, podczas procesu jej neutralizacji lub niszczenia dominującą rolę przejmuje nawigacja wizyjna.

Wskazany przez operatora obszar jest przeszukiwany według zadanej trajektorii ruchu pojazdu wyznaczonej za pomocą układu nawigacji satelitarnej zintegrowanej z układem nawigacji inercyjnej. Wykorzystane zostaną tutaj także układy nawigacji wizyjnej oparte na algorytmach śledzących obraz terenu, po którym pojazd się porusza. Zapewni to precyzyjne przeszukanie całości wskazanego obszaru. Obecność ewentualnych przeszkód terenowych jest wykrywana przez skanowanie terenu oraz jego obserwację w świetle widzialnym. Zadania nawigacyjne obejmują tutaj, oprócz poruszania się po przewidywanej trajektorii, również określenie położenia miny, precyzyjne wycofanie platformy na bezpieczną odległość po pozostawieniu ładunku niszczącego lub wycelowanie urządzenia niszczącego. Celem bezpiecznego wycofania platformy z obszaru zagrożenia system zapamiętuje obraz ostatnich 10 m drogi. Pozwala to na precyzyjne wycofanie się, przy wykorzystaniu nawigacji wizyjnej, po „własnych śladach” pojazdu. Generalnie nawigacja wizyjna jest wykorzystywana przez system sterowania w momentach, gdy wymagana jest jak największa precyzja ruchu platformy mobilnej.



Rys. 2. Produkowany przez PIAP pojazd IBIS w wersji zadaptowanej do potrzeb opisywanego projektu



Rys. 3. Układ nawigacji i sterowania w trakcie testów na robocie elektrycznym Mbot Explorer

Pojazdy takie stanowią cenny element sieciocentrycznego systemu zarządzania polem walki. W trakcie prac opracowywana jest nieduża gabarytowo platforma mobilna z hybrydowym układem zasilania i kołowym elektrycznym układem jezdny. Urządzenia do wykrywania i niszczenia min umieszczone będą na owej mobilnej platformie przystosowanej do autonomicznego wykonywania misji. Platforma jest budowana na bazie opracowanego przez Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów robota pirotechnicznego IBIS (rys. 2). W trakcie prac badawczych system nawigacji był testowany pierwotnie na mobilnym pojeździe elektrycznym Mobot Explorer (rys. 3).

System nawigacji wizyjnej został opisany w drugiej części artykułu. W pierwszej części skupiono się na prezentacji zagadnień związanych z nawigacją opartą na zintegrowanych układach GPS i IMU. Systemy te wykorzystywane są jedynie do nawigacji pojazdu po zadanej trajektorii. W momencie wykrycia miny główną rolę zaczyna odgrywać nawigacja wizyjna jako bardziej dokładna. Pozwala ona na precyzyjne podejście do miny, a następnie wycofanie się na bezpieczną odległość przed jej zniszczeniem.

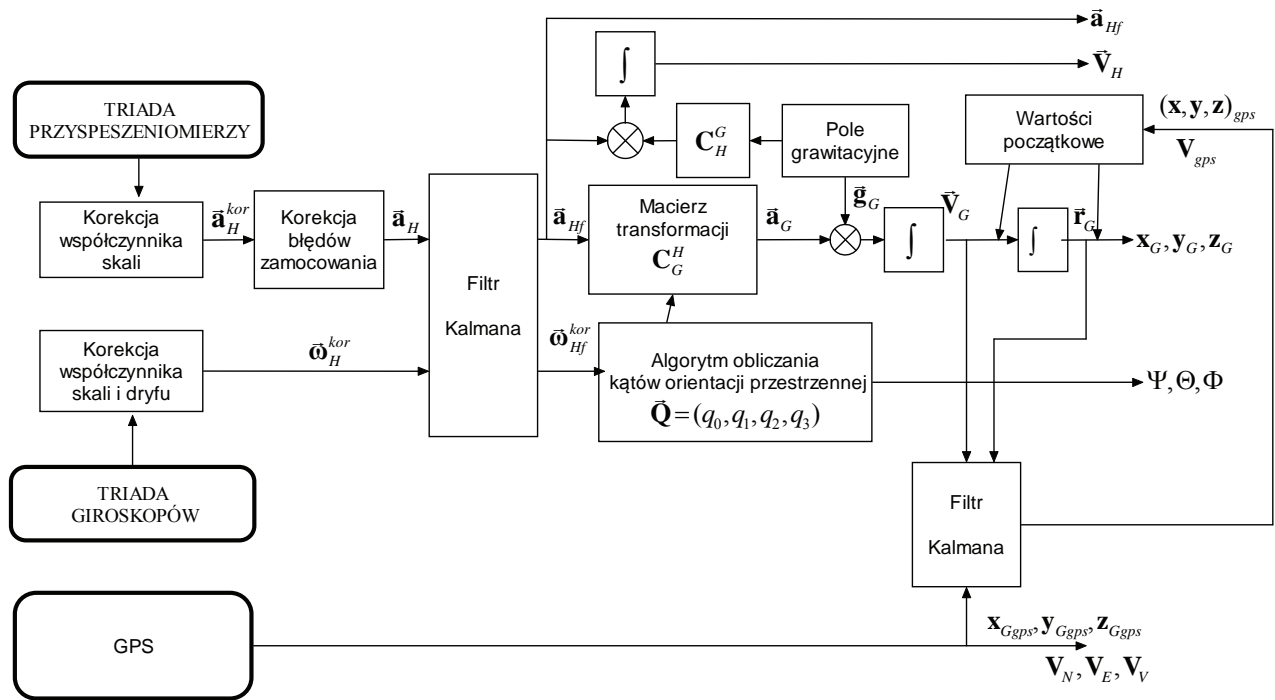
Z uwagi na fakt, iż podstawowym zadaniem badawczym projektu jest opracowanie nowatorskich metod wykrywania min niemetalicznych, w opisie strategii poszukiwania min pominięto potencjalne utrudnienia terenowe. Tym samym możliwe jest eksperymentalne sprawdzenie możliwości wykorzystania nowatorskich metod nawigacji wizualnej.

Pominięto zagadnienia poruszania się w terenie o powierzchni bardzo „nierównej”, typu rumowiska skalne, lub o dużej liczbie przeszkód terenowych, np. las. Założono, że pojazd porusza się po powierzchni poziomej, wykonując zadanie wykrywania i niszczenia min na trasie przygotowywanej dla transportu ładowego konwojów pojazdów lub grup ludzi, a więc, że pojazd porusza się wzdłuż zadanej drogi rozumianej jako droga, czy przejście, które pojazd ma za zadanie rozminować. Podsumowując, pojazd porusza się wzdłuż zadanej trasy złożonej z odcinków prostoliniowych, lub łuków o stałym promieniu, między punktami trasy wprowadzonym i przez użytkownika do pamięci systemu nawigacyjnego pojazdu. Możliwe jest także zaprogramowanie ruchu pojazdu wzdłuż równoległych, bliskich trajektorii. Jednorazowy przejazd pojazdu wystarcza do rozminowania przejścia o wymaganej przez użytkownika szerokości. Możliwe jest to do uzyskania przez umieszczenie czujnika na ruchomym ramieniu, co pozwoli na poszerzenie obserwowanego obszaru.

Po wykryciu miny dominującą rolę zaczyna odgrywać nawigacja wizyjna, która nie jest tematem tego artykułu, więc nie będę opisywał dalszych procedur jego pracy.

3. UKŁAD NAWIGACJI INS/GPS

Podstawowym elementem układu nawigacji platformy jest odbiornik systemu nawigacji satelitarnej GPS, a w przyszłości także europejskiego systemu nawigacji satelitarnej Galileo. Zadania pojazdów przeznaczonych do celów bojowych wymagają często pracy w warunkach „ciszy elektromagnetycznej”. W terenie zabudowanym sygnał z satelity systemu nawigacyjnego może być niedostępny lub obciążony dużym błędem wielotorowości, przez co dokładność określania własnej pozycji platformy może być zbyt mała, jak na potrzeby wykonywanej misji. Jako wspomagający zostanie użyty układ nawigacji inercyjnej zintegrowany z GPS. Do wspomaganie systemu nawigacji wykorzystane zostaną w projekcie także układy nawigacji oparte na algorytmach śledzących obraz terenu, po którym pojazd się porusza. W celu uzyskania odpowiedniej jakości nawigacji i sterowania platformą opracowany został układ zintegrowany, wykorzystujący wszystkie wymienione wcześniej czujniki i metody.



Rys. 4. Schemat zintegrowanego układu nawigacji INS/GPS

Użycie do nawigacji połączenia systemów inercyjnego i nawigacji satelitarnej jest rozwiązaniem od pewnego czasu już stosowanym w lotnictwie oraz w układach naprowadzania pocisków sterowanych [10, 11, 12]. Na tych doświadczeniach bazowano pierwotnie przy rozpoczęciu prac nad projektem oraz informacjach udostępnianych przez DARPA z wyników konkursów Grand Challenge. Układy oparte na nawigacji inercyjnej jak INS dają pomiar stabilny i niezależny od zakłóceń zewnętrznych. Problemem jest jednak narastający w czasie błąd wynikający z procesa całkowania wskazań przyspieszeniometrycznych i giroskopów prędkościowych stanowiących podstawę pomiaru. Z tego względu dokładny pomiar dają jedynie przez krótki czas. Z kolei system GPS daje, mimo błęd, stały błąd niezależny od czasu. Może on jednak podlegać skokowym zmianom. Mogą wówczas następować zakłócenia związane ze zmianami konstelacji obserwowanych satelitów oraz odbiciami sygnału od budynków lub innych wysokich obiektów. Taki charakter sygnałów uniemożliwiał sterowanie obiektem w sposób ciągły na podstawie jedynie sygnałów GPS.

Układ INS połączony jest z odbiornikiem GPS poprzez filtr Kalmana. Pozycja wyliczona w tym bloku wykorzystywana jest do aktualizacji wartości początkowych wykorzystywanych w całkowaniu przyspieszeń i prędkości w systemie INS. Założono, że aktualizacja pozycji w układzie inercyjnym dokonywana jest gdy błąd wyliczonej pozycji przekroczy założony próg i sygnał z GPS jest dostępny. Bardzo istotną kwestią w procesie integracji jest dobór współczynników filtra Kalmana. W tym celu przeprowadzono serię badań laboratoryjnych oraz terenowych. Dla porównania przeprowadzono również próby z już gotowym zintegrowanym odbiornikiem SPAN. Zdjęcia z tych prób przedstawia rys. 3.

4. UKŁAD NAWIGACJI WIZYJNEJ

Zastosowany układ nawigacji wizyjnej korzysta z metody gradientowej przepływu optycznego do wyznaczania przeszczenia obiektu. Wykorzystywane są dwa kolejne kadry zarejestrowane przez kamerę. Jako wynik działania układu nawigacji otrzymywane są przyrosty przeszczenia Δx , Δy pojazdu odpowiednio w kierunku osi Ox i Oy wyrażone w lokalnym układzie współrzędnych kamery.

Założenia układu nawigacji wizyjnej

Podczas projektowania układu nawigacji wizyjnej przyjęte zostały poniższe założenia:

- podczas rejestracji obrazu widoczność sceny i jej zawartości nie różni się zasadniczo pomiędzy kolejnymi kadrami
- znany jest przedział czasowy pomiędzy rejestrowanymi kadrami
- urządzenie rejestrujące obraz (kamera) jest sztywno przymocowane do pojazdu
- światło jest równomiernie rozpraszane na podłożu
- rzutowanie równoległe (bez efektu perspektywy)
- płaszczyzna pola widzenia znajduje się w stałej odległości od kamery.

4.1. Algorytm przepływu optycznego

Układ nawigacyjny wykorzystuje metodę przepływu optycznego Lucasa-Kanade należącą do grupy metod gradientowych przepływu optycznego.

Równanie przepływu optycznego dane jest wzorem:

$$I(x, y, t) = I(x + \delta x, y + \delta y, t + \delta t) \quad (1)$$

gdzie:

$I(\)$ – funkcja intensywności (jasności) piksela,

x, y – współrzędne położenia piksela w kadrze,

t – czas,

$\delta x, \delta y, \delta t$ – przyrosty odpowiednio współrzędnych położenia oraz czasu.

W metodzie tej zakłada się, że przepływ jest stały w lokalnym otoczeniu punktu. Tym samym w otoczeniu $m \times m$ ($m > 1$) prędkość przepływu V_x, V_y jest stała.

Prawa strona równania (1) może zostać przedstawiona w formie szeregu Taylora:

$$I(x + \delta x, y + \delta y, t + \delta t) = I(x, y, t) + \frac{\partial I}{\partial x} \delta x + \frac{\partial I}{\partial y} \delta y + \frac{\partial I}{\partial t} \delta t + R \quad (2)$$

gdzie: R – składowe wyższych rzędów szeregu Taylora.

Przy założeniu, że $R = 0$ i podstawieniu wzoru (2) do wzoru (1) otrzymujemy zależność:

$$\frac{\partial I}{\partial x} \delta x + \frac{\partial I}{\partial y} \delta y + \frac{\partial I}{\partial t} \delta t = 0 \quad (3)$$

Po zróżniczkowaniu po czasie równania (3) otrzymujemy:

$$\frac{\partial I}{\partial x} \frac{\delta x}{\delta t} + \frac{\partial I}{\partial y} \frac{\delta y}{\delta t} + \frac{\partial I}{\partial t} \frac{\delta t}{\delta t} = 0 \quad (4)$$

Po przekształceniu równanie (4) przyjmuje postać:

$$I_x V_x + I_y V_y = -I_t \quad (5)$$

Równanie (5) zapisane dla otoczenia $m \times m$ punktu (x, y) przyjmuje postać układu $n = m^2$ równań:

$$\begin{aligned} I_{x1} V_x + I_{y1} V_y &= -I_{t1} \\ I_{x2} V_x + I_{y2} V_y &= -I_{t2} \\ &\vdots \\ I_{xm} V_x + I_{ym} V_y &= -I_{tm} \end{aligned} \quad (6)$$

Który może zostać zapisany, w formie:

$$\begin{bmatrix} I_{x1} & I_{y1} \\ I_{x2} & I_{y2} \\ \vdots & \vdots \\ I_{xm} & I_{ym} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I_{t1} \\ -I_{t2} \\ \vdots \\ -I_{tm} \end{bmatrix} \quad (7)$$

oraz:

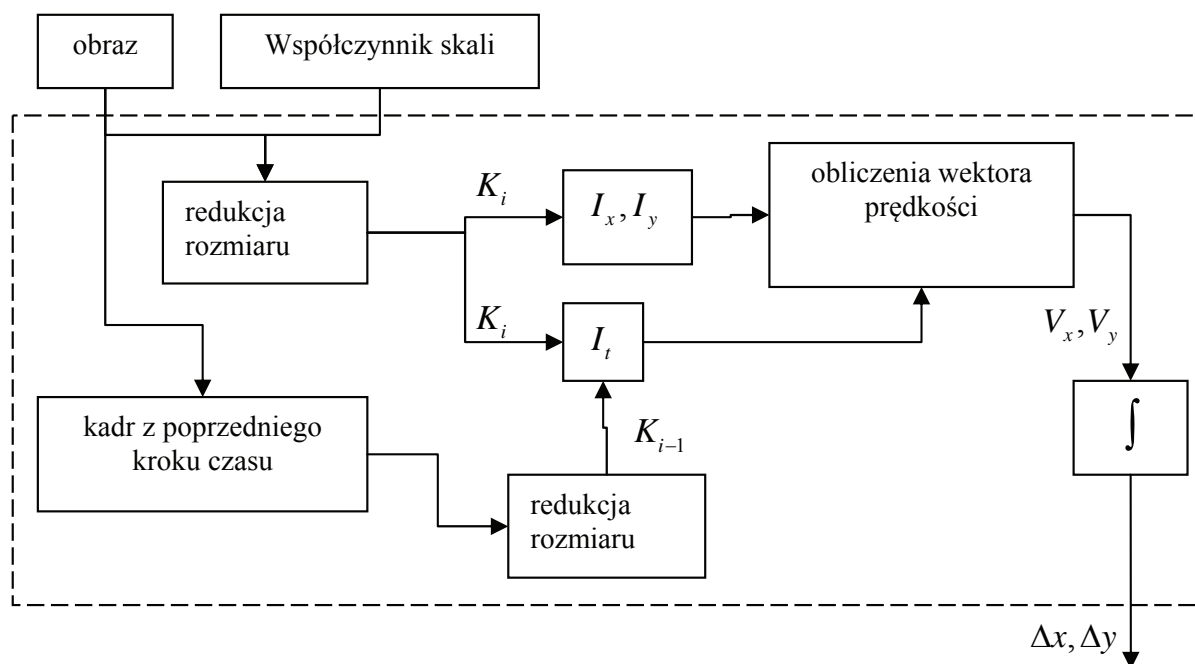
$$\mathbf{A} \vec{\mathbf{v}} = -\mathbf{b} \quad (8)$$

Prędkości V_x, V_y obliczane są z wykorzystaniem metody najmniejszych kwadratów prowadzonej do rozwiązania równania:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} \vec{\mathbf{v}} = \mathbf{A}^T (-\mathbf{b}) \quad (9)$$

4.2. Wyznaczanie przemieszczeń metodą przepływu optycznego

Schemat działania algorytmu wyznaczania przemieszczeń Δx , Δy przedstawiony jest na poniższym rysunku.



Rys. 5. Schemat algorytmu wyznaczającego przemieszczenie



Rys. 6. Badania pojazdu zbudowanego na bazie robota IBIS z systemem nawigacji wizyjnej

Przemieszczenie względne kamery wyznaczone jest na podstawie zmiany jasności pikseli pomiędzy dwoma sąsiednimi kramami. W kolejnych krokach czasu, układ powtarza sekwencję operacji. Zarejestrowany kadr jest zapamiętywany w pamięci. Następnie kadr z chwili czasu i oraz kadr z chwili czasu $i-1$ są poddawane redukcji rozmiaru. Zredukowany kadr z chwili czasu i służy jako źródło danych do obliczenia pochodnych intensywności pikseli i ich otoczenia w kierunku osi Ox, Oy . Z kolei zredukowany kadr z chwili czasu $i-1$ wraz z kadrem z chwili czasu i wykorzystywany jest do obliczenia pochodnej intensywności pikseli po czasie.

Blok obliczeń wektora prędkości rozwiązuje równanie (9), a następnie oblicza średnią wartość ze wszystkich pikseli. Ostatnim etapem jest całkowanie otrzymanych prędkości w celu uzyskania przemieszczeń $\Delta x, \Delta y$.

5. BADANIA

Układ nawigacji wykorzystuje kamerę CCD DFK 31BF03. Kamera zainstalowana jest na robocie IBIS. Oś optyczna kamery jest skierowana w kierunku podłoża, prostopadle do niego. Dane (obraz) przesyłane są do komputera z wykorzystaniem przewodu FireWire (IEEE 1394a). Na rys. 6 przedstawione jest zdjęcie zainstalowanego systemu.



Rys. 7. Wyniki uzyskane ze układu nawigacyjnego w trakcie autonomicznego przejazdu po wyznaczonej trasie

Jako konkluzję przeprowadzonych badań można stwierdzić, że połączenie systemu nawigacji wizyjnej w połączeniu ze zintegrowanym systemem INS/GPS jest pomysłem dobrym, dającym zadowalające wyniki. Chociaż wymagającym dalszego rozwoju. Przykładowe wyniki uzyskane w trakcie badań terenowych przedstawia rys. 7. Obydwa układy nawigacji uzupełniają swoje braki umożliwiając pracę pojazdowi w sytuacjach, gdy np. jest problem z prawidłowym sygnałem GPS. Wówczas rolę systemu korygującego wskazania IMU przejmuje nawigacja wizyjna. Nawigacja wizyjna oparta na metodzie przepływu optycznego bardzo dobrze uzupełnia inne systemy nawigacyjne. 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.

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

6. BIBLIOGRAFIA

1. Gader P. D., *Pattern recognition for humanitarian de-mining*, 16th International Conference on Pattern Recognition, IEEE, 2002.
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*, Wydanie 2., Marcel Dekker, Nowy York, 2002.
8. Pratt, W. K., *Digital Image Processing*, Wydanie 3., John Wiley and Sons, Nowy York, 2001.
9. Kolodko, J., Vlacic, L., *Motion Vision: Design of Compact Motion Sensing Solutions for Navigation of Autonomous Systems*, The Institution of Electrical Engineers, Londyn, 2005.
10. Klotz H., Derbak C., *GPS-aided navigation and unaided navigation on the Joint Direct*.
11. Ohlmeyer E. J., *Guidance, navigation and control without gyros: a gunlaunched munition concept*. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, Monterey California 2002.
12. Głębocki R., Żugaj M., *Control System for INS Guided Bomb*, 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit January 2009.
13. Zasuwa M., Głębocki R., Świętoń G., *Visual navigation for autonomous system for detection and neutralisation of non-metal mines*, MMAR 2009.