

Robert GŁĘBOCKI  
Janusz NARKIEWICZ

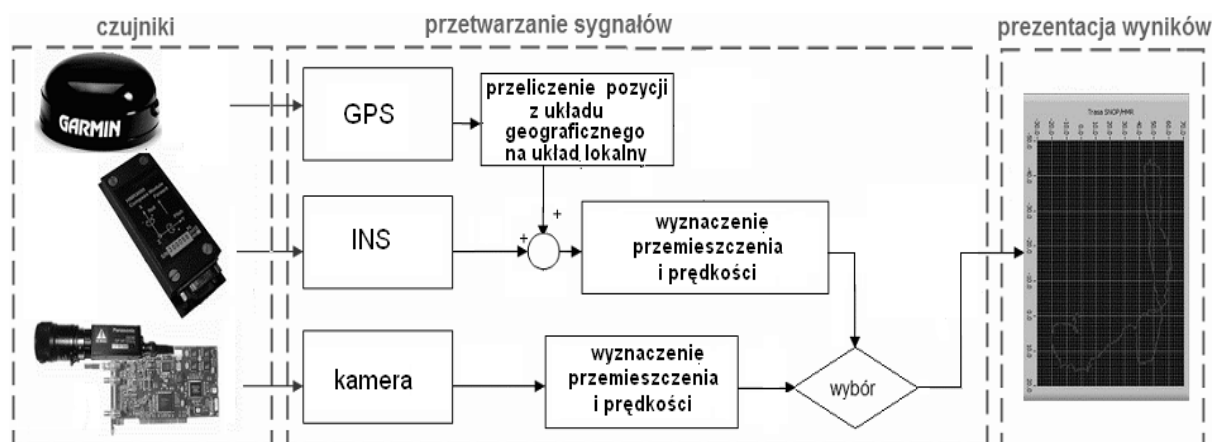
## WYBRANE ASPEKTY UKŁADU STEROWANIA POJAZDEM AUTONOMICZNYM

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono częściowe wyniki prac przeprowadzonych, przez zespół z Zakładu Automatyki i Osprzętu Lotniczego Politechniki Warszawskiej, nad układem precyzyjnej nawigacji i sterowania dla pojazdów autonomicznych przeznaczonych do samodzielnego wykrywania i niszczenia min. Podstawą systemu jest opracowany system sterowania, który opiera się na współpracy zintegrowanego układu nawigacji IMU i GPS oraz systemu nawigacji wizyjnej. Pozwoliło to na uzyskanie precyzyjnej informacji o przemieszczaniu się obiektu oraz na wzajemną kontrolę poszczególnych systemów oceniających wykonywany ruch. W pracy przedstawiono zastosowane rozwiązania tych systemów oraz niektóre wyniki z testów terenowych. Na koniec przedstawiono podsumowanie uzyskanych efektów oraz ocenę możliwości opracowanego systemu.

**Słowa kluczowe:** platformy pola walki, sterowanie autonomiczne.

### 1. WPROWADZENIE DO ZAGADNIENIA

Opisywane prace są elementem większego projektu, którego celem jest opracowanie autonomicznego systemu wykrywania i niszczenia min niemetalowych i ładunków wybuchowych. System taki ma 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 układ ich niszczenia lub neutralizacji. Problem lokalizacji min niemetalowych jest z technicznego punktu widzenia trudny, ponieważ konwencjonalne metody lokalizacji min (oparte o wykrywacze 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”. Zostaje on specjalnie wyczulony na detekcję związków chemicznych wzbudzanych z obudowy miny. Drugi sposób rozpoznania opiera się na możliwości wykrywania materiałów wybuchowych min przy pomocy spektroskopii mobilności jonów (IMS). Niszczenie min odbywa się przy użyciu armatki bezodrzutowej lub poprzez pozostawienie na minie ładunku niszczącego. W tym celu wykorzystane są mieszaniny termitowe.

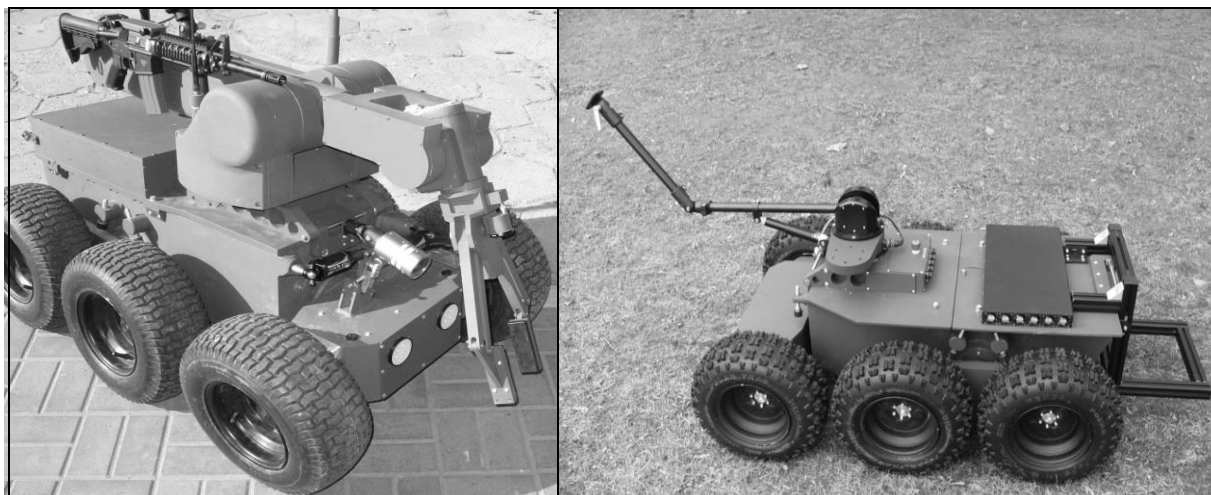


**Rys. 1. Ogólny schemat działania przyjętego systemu nawigacyjnego**

Całość systemu wykrywania i niszczenia min jest umieszczona na mobilnej platformie. W tym celu zaadaptowano elektryczną platformę jezdną 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 pracy. Ogólny schemat działania zastosowanego systemu nawigacji przedstawia rysunek 1. System ten postanowiono oprzeć na zintegrowanym układzie INS/GPS, uzupełnionym przez układ 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 przy pomocy układu nawigacji satelitarnej zintegrowanej z układem nawigacji inercjalnej. 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.

Pojazdy takie stanowią cenny element sieciocentrycznego systemu zarządzania polem walki. W trakcie prac opracowywana jest nieduża gabarytowo (waga około 300kg, długość 2m) platforma mobilna z hybrydowym układem zasilania i kołowym elektrycznym układem jezdny. Urządzenia do wykrywania i niszczenia min zamontowane 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 (rysunek 2).



**Rys. 2. Po lewej produkowany przez PIAP pojazd IBIS, po prawej jego wersja zaadoptowana, do potrzeb opisywanego projektu**

System nawigacji wizyjnej został opisany w publikacji [4]. W prezentowanej pracy skupiono się na przedstawieniu 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 obserwacyjna, jako bardziej dokładna. Pozwala ona na precyzyjne podejście do miny a następnie wycofanie się na bezpieczną odległość przed jej zniszczeniem.

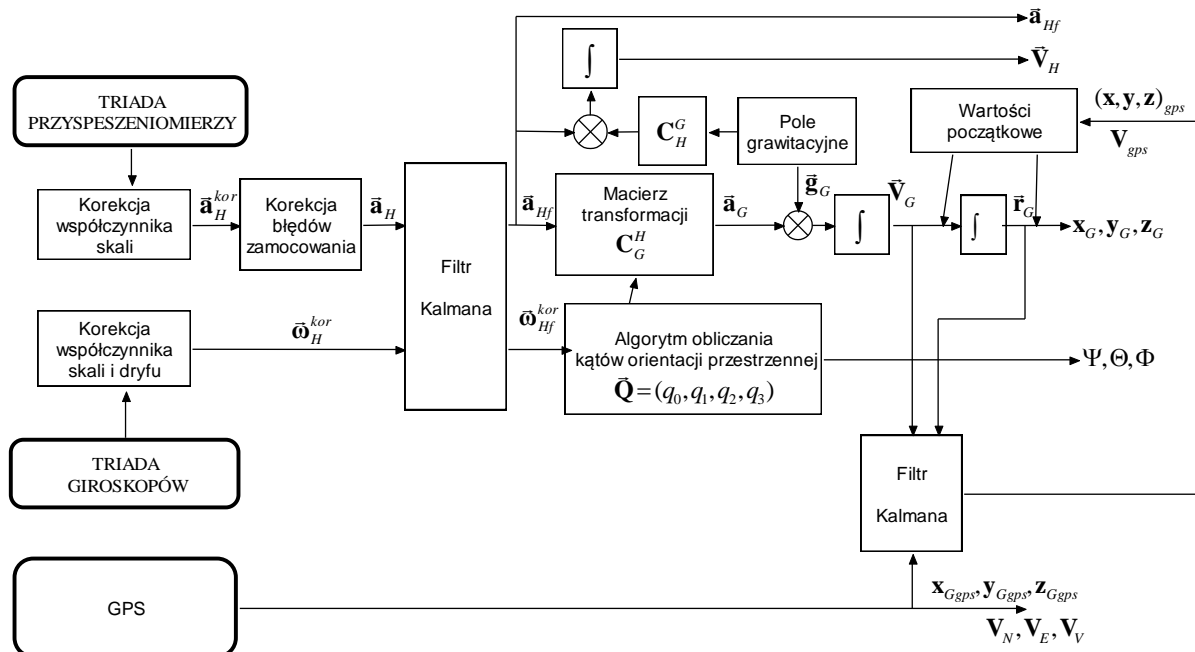
Ze względu na fakt, iż podstawowym zadaniem badawczym projektu jest opracowanie nowatorskich metod wykrywania min niemetaloowych, w opisie strategii poszukiwania min pominięto potencjalne utrudnienia terenowe. Tym samym możliwe jest eksperymentalne sprawdzenie możliwości wykorzystania nowatorskich metod 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. Wykonuje zadania wykrywania i niszczenia min na trasie przygotowywanej dla transportu lądowego konwojów pojazdów lub grup ludzi. W związku z tym 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. Przejazdy są wykonywane między punktami trasy wprowadzonymi 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. Pozwoli to na poszerzenie obserwowanego obszaru.

Po wykryciu miny dominującą rolę zaczyna odgrywać nawigacja wizyjna, której opis wykracza poza tematykę niniejszego artykułu.

## 2. 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 wspomagania 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. 3. 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 [1, 2, 3]. 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 ciągły stabilny i niezależny od zakłóceń zewnętrznych. Problemem jest jednak narastający w czasie błąd wynikający z procesu całkowania wskazań przyspieszeniometrycznych i giroskopowych prędkościowych, stanowiących podstawę pomiaru. Ze względu na to, że wartością mierzoną fizycznie są przyspieszenia liniowe i prędkości kątowe, błąd wyznaczenia pozycji narasta parabolicznie a błąd wyznaczania kursu liniowo. Dzieje się tak przy założeniu stałej wartości błędu pomiaru mierzonej wartości fizycznej (przyspieszenia lub prędkości kątowej). Z tego względu dokładny pomiar mamy jedynie przez krótki czas. Z kolei system GPS daje mniej więcej stały błąd, niezależny od czasu. Może on jednak podlegać skokowym zmianom i ma charakter dyskretny. Mogą wówczas następować

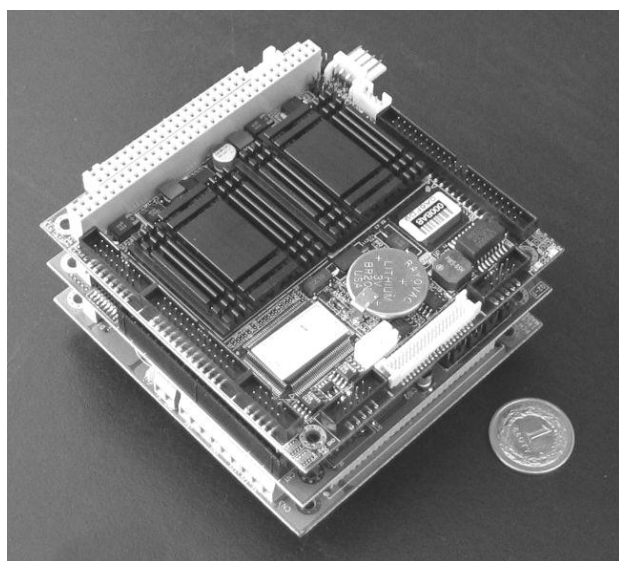
zakłócenia związane ze zmianami konstelacji obserwowanych satelitów oraz odbiciami sygnału od budynków lub innych wysokich obiektów. Taki charakter sygnałów uniemożliwił sterowanie obiektem w sposób ciągły na podstawie jedynie sygnałów GPS.

Zastosowany w naszym przypadku układ INS połączony jest z odbiornikiem GPS poprzez filtr Kalmana (rysunek 3). 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 rysunek 8.

### 3. BADANIA

W przeprowadzonych badaniach wykorzystano sprzęt posiadany przez zespół z Instytutu Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej Politechniki Warszawskiej. Jednostkę centralną stanowi komputer klasy PC-104 – rys.4. Na platformie tej zainstalowano system operacyjny Neutrino firmy QNX. System ten wybrano ze względu na stabilność działania oraz pracę w czasie rzeczywistym. Oprogramowanie poszczególnych czujników, jak również aplikacje sterujące i nawigacyjne napisano w języku C++. W dotychczas przeprowadzonych badaniach wykorzystano odbiornik GPS FlexPak firmy Novatell - rys. 5 oraz bezwładnościową jednostkę pomiarową IMU typu 3DM-GX2 firmy MicroStrain – rys.6. Komputer obsługiwany jest za pomocą konsoli operatora - rys. 7.

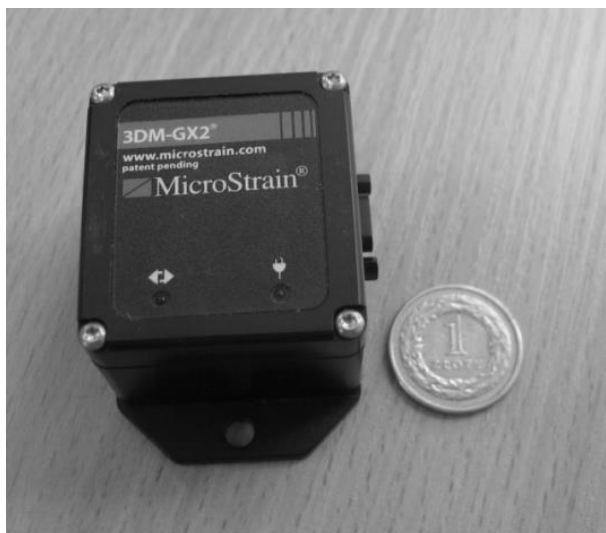
W pierwszym etapie prac przygotowano oprogramowanie rejestrujące dane z wykorzystywanych czujników oraz przeprowadzono próby laboratoryjne działania poszczególnych elementów układu. W trakcie tych prób wykonywano rejestracje stacjonarne oraz w ruchu.



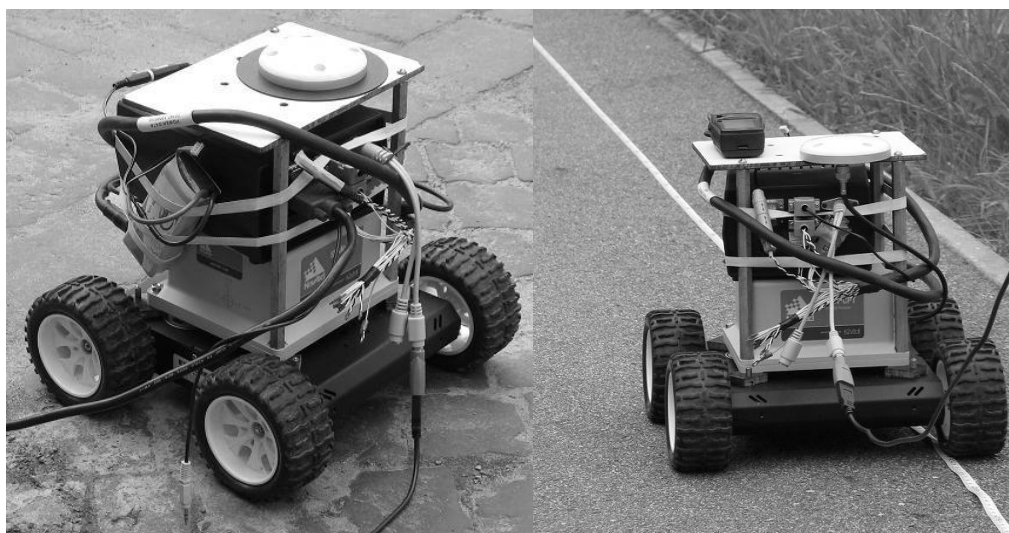
Rys. 4. Komputer klasy PC-104



Rys. 5. GPS FlexPak

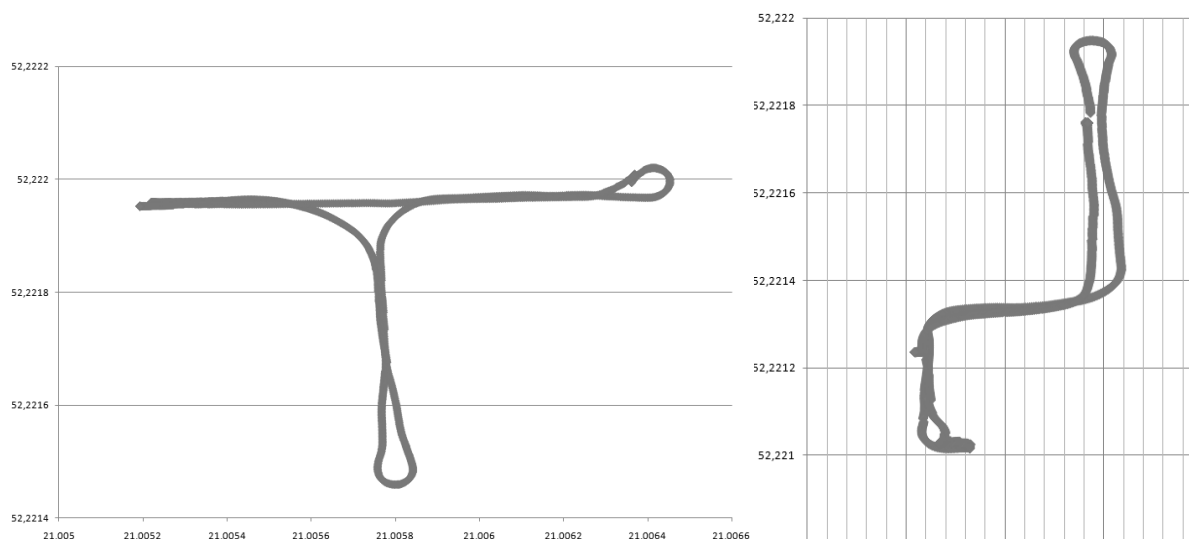
**Rys. 6. IMU 3DM-GX2****Rys. 7. Konsola operatorska**

W drugim etapie prac wykonano rejestracje w trakcie jazdy po wcześniej zmierzonej trasie. Pomiaru trasy przejazdu dokonano z użyciem dalmierzy laserowych. W trakcie prób pokonano zmierzoną trasę, tymczasowo używanym do testów układem nawigacyjnym, pojazdem elektrycznym Explorer. Znajduje się on w posiadaniu Zakładu Automatyki i Osprzętu Lotniczego Politechniki Warszawskiej. Zamontowano na nim czujnik IMU oraz odbiornik GPS. Pojazd Explorer jest znacznie mniejszy od IBIS-a, ale jego zaletą jest bardzo podobny układ wykonawczy sterowania. Zdjęcia z prób przedstawia rysunek 8.

**Rys. 8. Pojazd elektryczny wykorzystywany do badań przez Zakład Automatyki i Osprzętu Lotniczego Politechniki Warszawskiej wraz z zamontowanymi elementami systemu nawigacji**

Na podstawie uzyskanych wyników dokonano identyfikacji współczynników przeliczających pozycję otrzymaną z odbiornika GPS do układu lokalnego. W dalszych etapach pracy wykonane pomiary posłużyły również do doboru współczynników obu filtrów Kalmana występujących w zintegrowanym układzie nawigacji INS/GPS. Na rysunku 9 przedstawiono wyniki rejestracji wykonanych podczas samodzielnego przejazdu pojazdu

Explorer. Pojazd miał przejechać wyznaczoną alejką a następnie powrócić. Uzyskane wyniki wskazują, że na obecnym etapie pojazd może uzyskiwać dokładności około 0,5m.



**Rys. 9. Wyniki uzyskane ze zintegrowanego układu nawigacyjnego w trakcie przejazdu pojazdem explorer po wyznaczonej trasie**

#### 4. WNIOSKI

Z przeprowadzonych badań wynika, że sprzęt wyselekcjonowany do opracowania systemu posiada dostateczną dokładność i uzyskane wyniki mogą być podstawą do dalszych badań. Jednak bezpośrednie wyniki pozyskane jedynie z IMU lub GPS są niedostatecznej jakości dla systemu sterowania platformy. Dlatego dalsze prace muszą skupić się na opracowaniu i doskonaleniu integracji tych systemów poprzez metody filtracji Kalmana. Kolejnym obszarem wymagającym dalszego rozwoju jest model przeliczający dane pozyskiwane z IMU. Układ wymaga jeszcze przeprowadzenia szeregu prób terenowych. Jednakże z danych przedstawionych na rysunku 9 wynika, że już na obecnym etapie pojazd może przemieszczać się z dokładnością około 0,5 m.

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

#### 5. LITERATURA

- [1] KLOTZ H., DERBAK C. „GPS- aided navigation and unaided navigation on the Joint Direct Attack Munition” IEEE 1998.
- [2] OHLMEYER E. J. ; (2002) Guidance, navigation and control without gyros: a gunlaunched munition concept. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, Monterey California.
- [3] GŁĘBOCKI R, ŻUGAJ M. “Control System for INS Guided Bomb” 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit January 2009.
- [4] ZASUWA M., GŁĘBOCKI R., ŚWIĘTOŃ G.; „Visual navigation for autonomous system for detection and neutralisation of non-metal mines” Methods and Models in Automation and Robotics 2009.

## **SOME ASPECTS OF CONTROL SYSTEM FOR AUTONOMOUS GROUND VEHICLE**

**Abstract:** In the paper authors presented partial results from research program, about autonomous system for neutralisation of none metal mines. Control and navigation system was prepared by the team from Department of Automation and Aeronautical Systems Warsaw University of technology. Navigation system based on integrated inertial and GPS system and it is supported by visual navigation one. It helps us to reach more precision control on moving platform. In the paper were presented architecture of the control system and some results from field tests. At the end we made some conclusions about system work and about the results.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Jerzy ŚWIDER – Politechnika Śląska, Gliwice