

CYFROWY SYSTEM POMIAROWY DO WYZNACZANIA POZYCJI OBIEKTÓW WEWNĄTRZ POMIESZCZEŃ

Streszczenie

W artykule omówiony został cyfrowy system pomiarowy umożliwiający wyznaczenie pozycji obiektów względem modułu pomiarowego. Zaprojektowano i wykonano dwa rodzaje modułów pomiarowych w zależności od zastosowanego czujnika, przy zachowaniu niezmiennych parametrów modułu komputerowego. W module komputerowym zaimplementowano algorytm wyznaczania pozycji obiektów na podstawie analizy chmury punktów, czyli danych współrzędnościowych w postaci zbioru punktów odebranych z modułu pomiarowego. Opracowany system dedykowany jest dla bezzałogowych statków powietrznych (BSP) i stanowi główny element projektowanego w Zakładzie Awioniki i Uzbrojenia Lotniczego, Wojskowej Akademii Technicznej, systemu antykolizyjno-nawigacyjnego.

WSTĘP

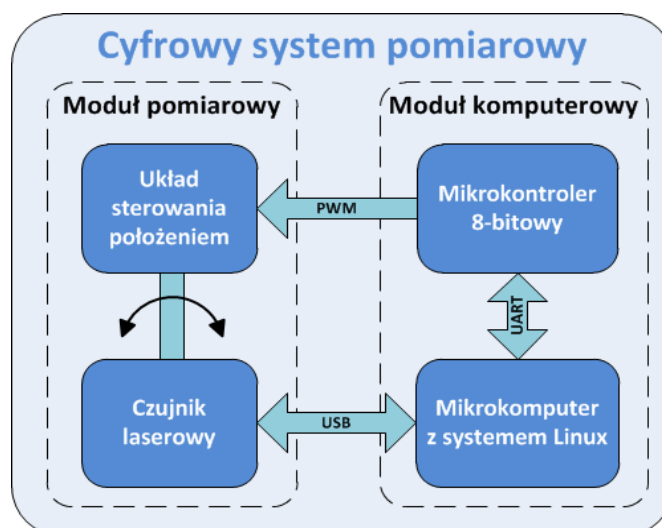
Bezzałogowe statki powietrzne (BSP) oraz naziemne roboty mobilne mogą poruszać się autonomicznie jeżeli zostaną wyposażone w system unikania kolizji z przeszkodami. W przypadku naziemnych robotów mobilnych najprostszym rozwiązaniem jest zastosowanie czujników krańcowych pracujących na zasadzie zderzaka. W chwili dotknięcia przeszkody informacja przekazywana jest do systemu sterowania, który zmienia kierunek ruchu. Z kolei kontakt BSP z jakąkolwiek przeszkodą skutkuje najczęściej jego uszkodzeniem lub zniszczeniem. Dlatego w takich obiektach stosuje się głównie czujniki działające w zakresie ultradźwiękowym [1] lub podczerwieni [7], przede wszystkim ze względu na ich niski koszt. Pozwalają one na pomiar odległości do najbliższego obiektu jednak nie są w stanie precyzyjnie określić namiaru na ten obiekt ponieważ emitują szeroką wiązkę pomiarową. Montaż wielu takich czujników w taki sposób, aby ich obszary pomiarowe pokrywały się, a następnie uruchamianie ich sekwencyjnie, pozwala na zwiększenie dokładności wyznaczenia namiarów [8]. Innym, znacznie bardziej precyzyjnym rozwiązaniem jest zastosowanie kamery i algorytmów analizy obrazu [9]. Taki system umożliwia otrzymanie w czasie rzeczywistym podglądu z kamery obszaru przed BSP z naniesioną informacją, w których miejscach znajdują się najbliższe obiekty. Jeszcze większą dokładność wyznaczenia położenia uzyskuje się stosując czujniki laserowe, dzięki którym możliwe jest otrzymanie trójwymiarowej chmury punktów reprezentującej przestrzeń pomiarową. W systemach wykorzystujących takie czujniki namiar do każdego punktu pomiarowego można wyznaczyć z dokładnością nieprzekraczającą 0,25 stopnia. Głównie z tego powodu wykorzystano czujniki laserowe w opracowanym cyfrowym systemie pomiarowym do wyznaczania pozycji wewnątrz pomieszczeń, który stanowi element systemu antykolizyjno-nawigacyjnego dla bezzałogowych statków powietrznych projektowanego w Zakładzie Awioniki i Uzbrojenia Lotniczego Wojskowej Akademii Technicznej.

1. ARCHITEKTURA SYSTEMU POMIAROWEGO

Opracowany cyfrowy system pomiarowy, którego architekturę przedstawiono na rysunku 1, dedykowany jest dla bezzałogowych statków powietrznych, jednakże z powodzeniem może być zastosowany również dla robotów naziemnych. Składa się on z dwóch

modułów: pomiarowego i komputerowego, komunikujących się za pomocą cyfrowego interfejsu USB oraz sygnału PWM.

Najistotniejszym elementem pierwszego modułu jest czujnik, który determinuje jaki rodzaj układu sterowania położeniem zostanie zastosowany w module pomiarowym oraz jakie programy obsługowe zostaną zaimplementowane w module komputerowym. Moduł komputerowy składa się z systemu mikroprocesorowego z mikrokontrolerem ośmiobitowym, którego zadaniem jest sterowanie i kontrola położenia czujnika za pomocą sygnału PWM oraz mikrokomputera z trzydziestodwubitowym procesorem z rdzeniem ARM pracującego pod kontrolą systemu operacyjnego Linux. Mikrokomputer komunikuje się z czujnikiem poprzez interfejs USB, natomiast z mikrokontrolerem przez UART. Podczas projektowania systemu pomiarowego analizowano i testowano zastosowanie różnych typów miniaturowych komputerów i ostatecznie wybrano podzespoły, które pozwoliły na opracowanie uniwersalnego modułu komputerowego dla projektowanego systemu, w którym jedynie modyfikuje się programy obsługowe w przypadku zmiany modułu pomiarowego. Wybrano mikrokomputer Odroid-U3, do którego dołączono, w formie modułu rozszerzającego, system mikroprocesorowy z mikrokontrolerem ATmega328P. Mikrokomputer ma możliwość połączenia z głównym komputerem pokładowym lub komputerem nawigacyjnym za pomocą jednego z dostępnych interfejsów np. USB, Ethernet.



Rys. 1. Schemat cyfrowego systemu pomiarowego.

Opracowany cyfrowy system pomiarowy jest głównym elementem projektowanego systemu antykolizyjno-nawigacyjnego, dlatego też istotna jest jego modułowość, uniwersalność i kompatybilność z pozostałymi komponentami. Uniwersalność i kompatybilność zapewnione zostały poprzez wybór tego samego systemu operacyjnego dla każdego podsystemu w projekcie oraz zastosowanie mikrokomputera o wielu różnorodnych interfejsach. Dzięki budowie modułowej możliwe jest, przede wszystkim, przygotowanie i przetestowanie różnych konfiguracji modułów pomiarowych oraz ich szybka wymiana w przypadku uszkodzenia lub pojawienia się na rynku rozwiązań o lepszych parametrach.

2. RODZAJE MODUŁÓW POMIAROWYCH

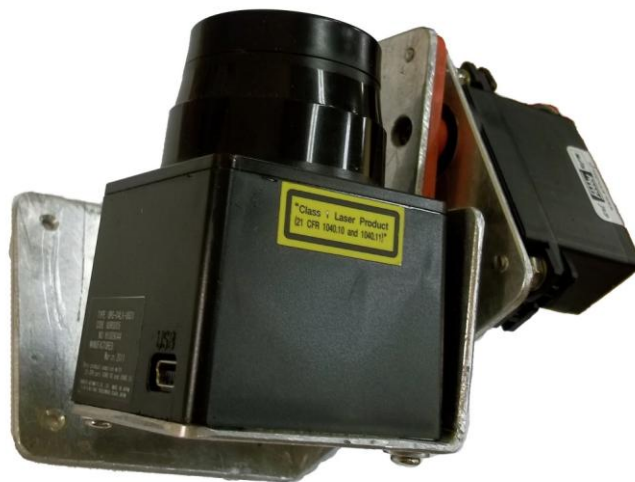
Opracowano i przetestowano dwa rodzaje modułów pomiarowych. W pierwszym zastosowano laserowy skaner przestrzeni (ang. laser range finder), który umożliwia wykonywanie pomiarów w jednej płaszczyźnie. W celu otrzymania trójwymiarowej chmury punktów wykorzystano układ wykonawczy z serwomechanizmem zmieniający położenie czujnika [5,6]. Drugi rodzaj modułu pomiarowego składa się z czujnika matrycowego światła strukturyzowanego (ang. structured light sensor) obracanego za pomocą silnika elektrycznego. Takie rozwiązanie pozwala na otrzymanie trójwymiarowej chmury punktów obrazującej obiekt w obszarze półsfery wokół systemu pomiarowego [3]. Obydwa czujniki komunikują się za pomocą interfejsu USB, natomiast sterowanie ich położeniem odbywa się za pomocą sygnału PWM.

2.1. Moduł pomiarowy z laserowym skanerem przestrzeni

Na rysunku 2 pokazano moduł pomiarowy z laserowym skanerem przestrzeni firmy Hokuyo typu URG-04LX-UG1. Czujnik ten umożliwia pomiar odległości do 5m, dla kąta 240 stopni w płaszczyźnie skanowania. Czujnik umieszczono w łożu wykonanym ze stopu aluminium, poruszającym przy pomocy serwomechanizmu. Ze względu na ograniczenie pola widzenia czujnika przez łożo zawężono je do 120 stopni. Wprowadzenie w ruch czujnika pozwoliło na uzyskanie trójwymiarowej chmury punktów.

Moduł pomiarowy został zaprojektowany w taki sposób, że wykorzystując te same elementy mechaniczne, a zmieniając jedynie położenie czujnika i oprogramowanie mikrokontrolera realizowana jest jedna z dwóch opracowanych metod skanowania przestrzeni. Pierwsza metoda, przedstawiona na rysunku 3a, określona została jako liniowa. Polega na wprowadzeniu czujnika w ruch w kierunku

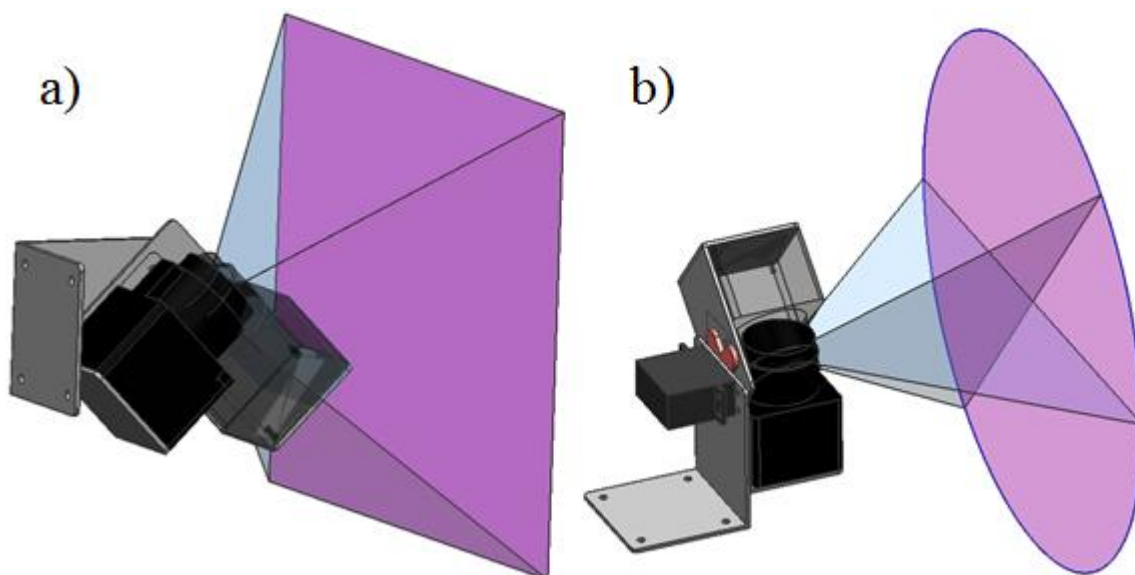
ortogonalnym do płaszczyzny skanowania. W tym przypadku obszar skanowany przez urządzenie określa przestrzeń w postaci ostrosłupa czworokątnego o kącie wierzchołkowym równym 120 stopni. W drugiej metodzie skanowania, zaprezentowanej na rysunku 3b, czujnik obracany jest wokół osi skierowanej równolegle do osi podłużnej obiektu. Metoda ta określona została jako obrotowa, gdyż w skutek obrotu płaszczyzny skanowania punkty pomiarowe układają się w postaci koncentrycznych okręgów, a skanowany obszar określa przestrzeń w kształcie stożka o kącie rozwarcia równym 120 stopni. Pomimo że przestrzeń obejmowana przez czujnik w metodzie liniowej jest o około 21,5% większa niż w metodzie obrotowej, z przeprowadzonych badań i analizy otrzymanych wyników wynika, że zdecydowanie lepszymi parametrami charakteryzuje się metoda obrotowa [4].



Rys. 2. Moduł pomiarowy z laserowym skanerem przestrzeni [5].

2.2. Moduł pomiarowy z czujnikiem światła strukturyzowanego

Na rysunku 4 zaprezentowano moduł pomiarowy z czujnikiem światła strukturyzowanego. Czujnik ten pozwala na otrzymanie obrazu głębi dla obszaru ograniczonego w poziomie kątem 58 stopni, a w pionie 45 stopni. W obrazie głębi każdy piksel zawiera informacje o odległości pomiędzy czujnikiem a wykrytym obiektem. Zaimplementowany algorytm zamienia dane z czujnika do postaci chmury punktów, aby format danych z obu modułów był jednakowy. Poprzez wprowadzenie czujnika w ruch obrotowy za pomocą silnika



Rys. 3. Porównanie zasady działania (a) liniowej i (b) obrotowej metody skanowania [4].

prądu stałego, uzyskano trójwymiarową chmurę punktów w obszarze półsfery wokół modułu pomiarowego. Aby sterować prędkością obrotową silnika i synchronizować ją z pomiarami wykonano enkoder optyczny połączony z obrotową podstawą czujnika. W podstawie znajduje się 120 równo rozmieszczonych nacięć, które są zliczane przez dwie bramki optyczne. Przesunięcie między bramkami pozwala na dwukrotne zwiększenie dokładności określania położenia kąтового czujnika. Ponadto, trzecia bramka optyczna wykrywa tylko jedno z nacięć, aby oznaczyć położenie początkowe [3].

Przyjęte rozwiązanie pozwoliło na dokładne sterowanie prędkością obrotową w obu kierunkach oraz synchronizację pomiarów z położeniem, jednakże brak możliwości ustawienia zadanego położenia, ilość dodatkowych czujników oraz złożoność algorytmu sterowania zadecydowały o zmianie silnika prądu stałego na silnik krokowy. Obecnie prowadzone są prace nad integracją nowego, mniejszego i lżejszego czujnika światła strukturyzowanego z silnikiem krokowym.



Rys. 4. Moduł pomiarowy z czujnikiem światła strukturyzowanego [3].

3. ALGORYTM WYZNACZANIA POZYCJI OBIEKTÓW

Niezależnie od zastosowanego modułu pomiarowego dane w postaci trójwymiarowej chmury punktów przekazywane są do zaimplementowanego algorytmu wyznaczania pozycji obiektów. Program napisano w języku C++ wykorzystując otwarte biblioteki PCL dedykowane do przetwarzania danych w postaci chmur punktów. Początkowo, na potrzeby systemu antykolizyjnego, opracowano algorytm, w którym wyznaczano krawędzie obiektów oraz odpowiadające im krawędzie cienia i poprzez ich połączenie tworzone były bryły określające obszary niebezpieczne [2]. Przeprowadzone liczne testy pokazały, że algorytm ten sprawdza się jedynie w pomieszczeniach o regularnych kształtach, przy niewielkiej ilości przeszkód. Z tego powodu opracowano nowy algorytm, który pozwala na wyznaczenie i oznaczenie przeszkód w postaci płaszczyzn lub sfer, co obrazuje rysunek 6.

Pierwszym etapem wyznaczania pozycji obiektów jest zredukowanie ilości punktów pomiarowych bez utraty istotnych informacji dotyczących wielkości i rozmieszczenia obiektów w przestrzeni. Cel

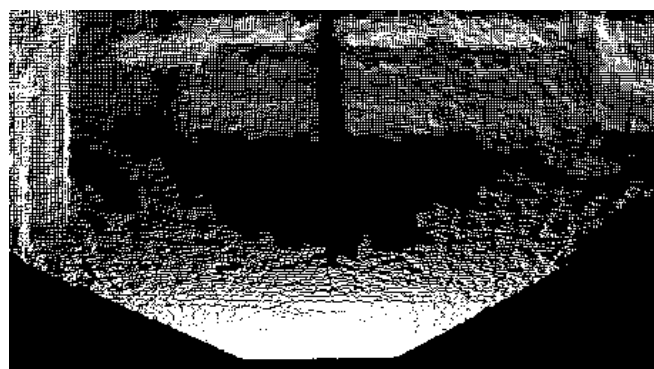
ten osiągnięto za pomocą filtrowania danych z wykorzystaniem dwóch metod usuwania elementów odstających (ang. outlier) oraz uśredniania siatką wokseli (ang. Voxel grid). Dzięki temu ilość analizowanych przez algorytm punktów ulega stukrotnemu zmniejszeniu, co przekłada się na skrócenie czasu przetwarzania danych.

Drugim etapem jest wyznaczenie współrzędnych obiektów. Przedmioty wykonywane przez człowieka charakteryzują się tym, że w większości przypadków zawierają wzajemnie prostopadłe boki. Dlatego też, algorytm grupuje punkty w klastry w zależności od wzajemnego ich położenia oraz zwrotów wektorów normalnych do powierzchni opisanej na kilku sąsiadujących punktach. Następnie dla każdego klastra wyznaczane jest równanie płaszczyzny oraz wyszukiwane są punkty skrajne, leżące na płaszczyźnie, stanowiące wierzchołki obiektu. Jeżeli dla danego klastra nie można wyznaczyć równania płaszczyzny, wówczas wyznaczane jest równanie sfery otaczającej wszystkie punkty w klastrze. W ten sposób oblicza się pozycje obiektów na podstawie odebranych danych pomiarowych, które następnie są przekazywane do głównego komputera pokładowego lub komputera nawigacyjnego.

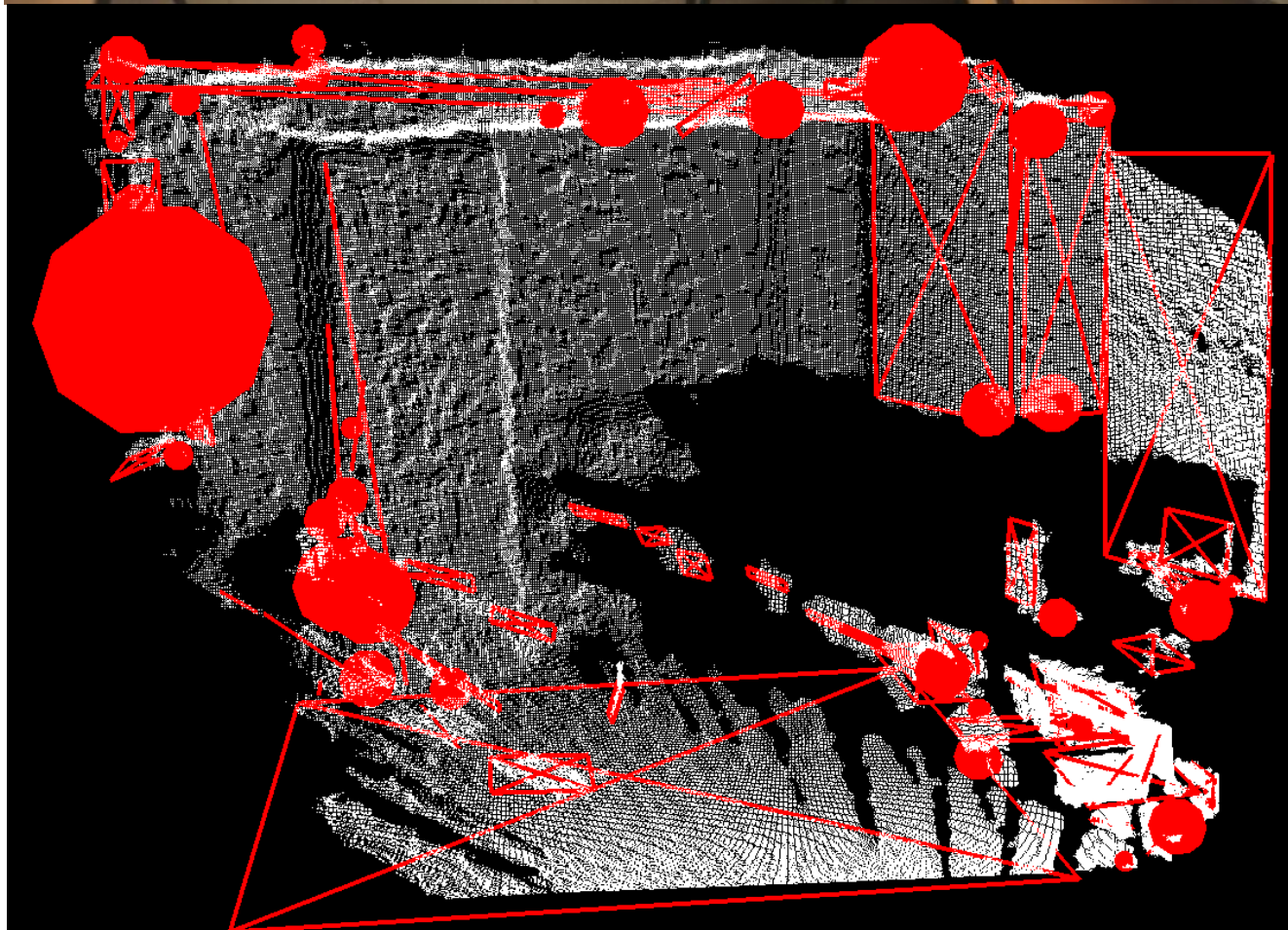
3.1. Badania laboratoryjne algorytmu

Badania prowadzone w warunkach laboratoryjnych podzielono na statyczne i dynamiczne. Testy statyczne przeprowadzono z nieruchomym modułem pomiarowym umieszczonym w różnych miejscach. Celem tych badań było określenie precyzji i dokładności pomiaru odległości do różnych przedmiotów oraz wpływu prędkości obrotowej na jakość danych. W trakcie testów dynamicznych, moduł pomiarowy był przemieszczany względem przeszkód. Dla przejrzystości rysunków przy omawianiu wyników badań laboratoryjnych zamieszczono na nich wyłącznie odebrane chmury punktów bez zaznaczonych współrzędnych wykrytych obiektów.

Najistotniejsze wnioski z badań statycznych pod kątem modyfikacji algorytmu wyznaczania pozycji obiektów dało sprawdzenie wykrywalności cienkiej, błyszczącej przeszkody. Testowaną przeszkodą był walcowy, gładki i błyszczący pręt o średnicy 3 cm. W odległości 1,5 m od czujnika został on w pełni wykryty. Jednakże, już w odległości 2 m obraz pręta zniknął w chmurze punktów, natomiast nadal pozostaje widoczny jego cień, co obrazuje rysunek 5. Cień pręta wykryto nawet w odległości powyżej zakresu działania czujnika określonego przez producenta. Badanie to pokazało konieczność wprowadzenia w algorytmie wykrywania obiektów dodatkowej funkcji weryfikacji braku sygnału pomiarowego dla grupy punktów w celu ustalenia, czy wynika to z przekroczenia zakresu pomiarowego czy obecności obiektu rozpraszającego lub pochłaniającego wiązkę pomiarową. Obecnie prowadzone są badania mające na celu zaimplementowanie tej funkcjonalności w algorytmie.



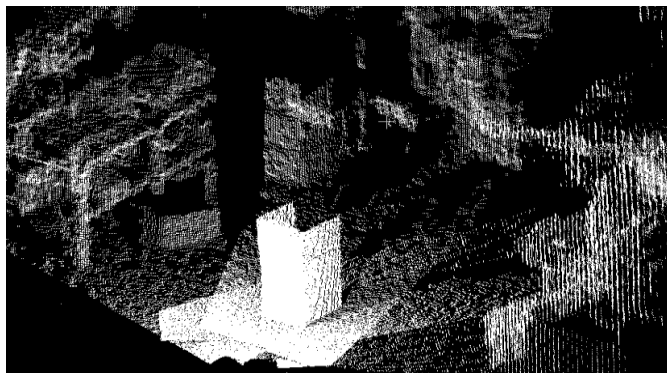
Rys. 5. Błyszczący pręt umieszczony 2m od modułu pomiarowego



Rys. 6. Wizualizacja chmury punktów wraz z zaznaczonymi pozycjami wykrytych obiektów.

Badania dynamiczne prowadzone były z wykorzystaniem platformy poruszającej się w kierunku przeszkody oraz prostopadle do przeszkody. Pierwsze badanie miało na celu określenie prędkości ruchu, która pozwala na wykrycie obiektów na tyle szybko, aby umożliwić reakcję algorytmu unikania kolizji. Okazało się, że zdolność modułu do wykrywania obiektów zależała nie tylko od prędkości, lecz również od początkowej odległości od czujnika i wielkości obiektu. Gdy platforma z modułem pomiarowym znajdowała się początkowo w odległości mieszczącej się w zakresie pomiarowym modułu, obiekt był wykrywany wcześniej niż wtedy, gdy początkowo znajdował się dalej od czujnika. Większość obiektów lub ich cienie zostały wykryte przed odległością 3 m od czujnika, gdy poruszał się on z prędkością nie przekraczającą 3 m/s.

Drugim testem dynamicznym było mijanie statycznej przeszkody, szarego prostopadłościanu, przez platformę z systemem pomiarowym. Badanie to zostało przeprowadzone, aby pokazać w jaki sposób obraz otoczenia można budować również za przeszkodami, gdy kolejne pomiary są wykonywane z różnych perspektyw. Na rysunku 7 pokazano trójwymiarowy obraz przeszkody zbudowany poprzez skanowanie obiektu z kilku stron.



Rys. 7. Trójwymiarowy obraz przeszkody zbudowany podczas badań dynamicznych.

PODSUMOWANIE

Zaprezentowany cyfrowy system pomiarowy jest rozwiązaniem modułowym, co pozwala na szybkie wprowadzanie modyfikacji, rozbudowy oraz unowocześniania urządzenia. Stanowi podstawową część projektowanego systemu antykolizyjno-nawigacyjnego, który jest obecnie na etapie badań laboratoryjnych. Podczas badań laboratoryjnych modułowość wielokrotnie pozwoliła na skrócenie czasu pomiędzy kolejnymi testami, w których konieczne były zmiany czujnika. Przeprowadzone badania opracowanego algorytmu pokazały, że przyjęte rozwiązanie nadaje się do zastosowania w systemie wykrywania przeszkód, unikania kolizji oraz nawigacji.

Opracowany system jest dedykowany dla bezzałogowych statków powietrznych, ale z powodzeniem może być wykorzystany również w mobilnych robotach naziemnych, ponieważ przed próbami w locie prowadzone są zawsze testy weryfikacyjne z wykorzystaniem robotów kołowych.

BIBLIOGRAFIA

1. Bharathraj S., Razeen Ridhawan U., Aasish U., Cyril Anthony A., Collision Avoidance System of An UAV, IJAIEM Vol. 4, Iss. 2, 2015, s. 20-28.
2. Brzozowski B., Wykrywanie przeszkód wewnątrz pomieszczenia na trajektorii lotu BSP, Pomiary Automatyka Robotyka, PAR 4/2014, s. 88-93.
3. Brzozowski B., Kordowski P., Rochala Z., Wojtowicz K., Distance measurement technique in hemispherical area for indoor

Vertical Take-Off and Landing Unmanned Aerial Vehicle" Proceedings of IEEE International Workshop on Metrology for Aerospace, 2014, s. 62-67

4. Brzozowski B., Kordowski P., Rochala Z., Wojtowicz K., Metody skanowania przestrzeni w systemie antykolizyjnym BSP, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej 288 (t.XXX), Mechanika 85 (4/13), 2013, s. 397-403.
5. Brzozowski B., Kordowski P., Rochala Z., Wojtowicz K. Project of a miniature 3D LIDAR for VTOL UAVs, Pomiary, Automatyka i Robotyka PAR 2/2013, Warszawa 2013, 68-71.
6. Brzozowski B., Kordowski P., Rochala Z., Wojtowicz K. System antykolizyjny z wizualizacją otoczenia dla BSP, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej 288 (t.XXX), Mechanika 85 (4/13), 2013, s. 405-411.
7. Chigulla L.K., Building Algorithm of Obstacle Detection and Avoidance System for Wheeled Mobile Robot, Global Journal of Researches in Engineering Electrical and Electronics Engineering, Vol. 12, Iss. 11., 2012, s. 10-14.
8. Engel J., Sturm J., Cremers D., Camera-based navigation of a low-cost quadcopter, 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, s. 2815-2821.
9. Gageik N., Benz P., Montenegro S., Obstacle Detection and Collision Avoidance for a UAV with Complementary Low-Cost Sensors, IEEE Access Vol. 3, 2015, s. 599-609.

DIGITAL MEASUREMENT SYSTEM FOR OBTAINING THE POSITION OF OBJECTS INDOORS

Abstract

A digital measurement system for obtaining the position of objects relative to the measuring module is described. Two types of measurement modules were designed and manufactured, with the same computer module and different sensors applied. In the computer module the algorithm determining the position of objects on the basis of point clouds received from the measuring module was implemented. The developed system is dedicated to unmanned aerial vehicle (UAV) and is the main component of an anti-collision and navigation system designed in Avionics and Air Armament Department at Military University of Technology.

Autorzy:

mgr inż. **Bartosz Brzozowski** – Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechatroniki i Lotnictwa, Instytut Techniki Lotniczej, Zakład Awioniki i Uzbrojenia Lotniczego, bartosz.brzozowski@wat.edu.pl

dr inż. **Zdzisław Rochala** – Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechatroniki i Lotnictwa, Instytut Techniki Lotniczej, Zakład Awioniki i Uzbrojenia Lotniczego, zdzislaw.rochala@wat.edu.pl

dr inż. **Konrad Wojtowicz** – Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechatroniki i Lotnictwa, Instytut Techniki Lotniczej, Zakład Awioniki i Uzbrojenia Lotniczego, Konrad.wojtowicz@wat.edu.pl