

**WSPARCIE FOTOGRAMETRYCZNE
DLA SYSTEMÓW NAWIGACYJNYCH PLATFORM MOBILNYCH**

**PHOTOGRAMMETRIC SUPPORT
FOR MOBILE PLATFORMS' NAVIGATION SYSTEMS**

Paweł Burdziakowski

Marynarka Wojenna RP, 3. Flotylla Okrętów, 13. Dywizjon Trałowców

SŁOWA KLUCZOWE: nawigacja, system, fotogrametria, stereowizja, autonomiczny, mobilny

STRESZCZENIE: Obszary niedostępne dla sygnału GPS oraz nie posiadające numerycznych modeli terenu, są również niedostępne dla autonomicznych bezzałogowych obiektów. Głównym zadaniem systemu nawigacyjnego wykorzystującego metody fotogrametryczne jest udostępnienie przestrzeni ograniczonych, czyli takich w których na skutek zmian wywołanych czynnikami zewnętrznymi poprawne i bezpieczne poruszanie się autonomicznych pojazdów było niemożliwe. Proponowany, w niniejszym artykule system nawigacyjny, bazujący na metodach fotogrametrycznych zainspirowany jest działaniem ludzkiego wzroku, oraz szerokim spektrum możliwości jaki daje ten zmysł.

1. WSTĘP

Działanie systemu nawigacji satelitarnej (GPS) ograniczone jest do miejsc, w których antena systemu odbiera sygnał nadawany przez satelity. Działanie tego systemu w praktyce ogranicza się do przestrzeni otwartych. System nie funkcjonuje wewnątrz budynków, a w terenach silnie zurbanizowanych obserwuje się poważne ograniczenia pracy systemu. Istotnym problemem nawigacji opartej o systemy satelitarne jest również posiadanie dokładnej informacji o środowisku przedstawionej np. w postaci mapy cyfrowej. Wymaga to posiadania cyfrowego modelu interesującego nas środowiska, który w przypadku klęsk żywiołowych często się dezaktualizuje. Obiekt poruszający się w określonym środowisku, właściwie zależy od dokładności i dostępności sygnału systemu satelitarnego oraz dostępności i aktualności informacji przestrzennej o środowisku. Obszary niedostępne dla sygnału GPS oraz nie posiadające numerycznych modeli terenu, są również niedostępne dla autonomicznych pojazdów bezzałogowych. Głównym zadaniem systemu nawigacyjnego wykorzystującego metody fotogrametryczne jest udostępnienie przestrzeni ograniczonych, dla pojazdów autonomicznych, przestrzeni w których na skutek zmian wywołanych czynnikami zewnętrznymi poprawne i bezpieczne poruszanie się maszyn było niemożliwe. Przykładem zmian wywołanych czynnikami zewnętrznymi, jest seria wypadków jądrowych w elektrowni atomowej Fukushima I w Japonii (Fot. 1.), do których doszło w 2011 roku w wyniku trzęsienia ziemi u wybrzeży Honsiu.



Fot. 1. Fukushima I, katastrofa reaktora

(źródło: <http://totallycoolpix.com/2011/04/inside-the-fukushima-nuclear-plant/>)

Ponieważ pojazd bezzałogowy skazany jest na działanie autonomiczne, zatem musi być wyposażony w system, który umożliwi mu pozyskiwanie informacji o otaczającym go środowisku. Szczególną uwagę należy zwrócić na metody określania pozycji pojazdu i bezpiecznego realizowania przez niego wytyczonego zadania nawet w przypadku braku informacji z systemów radionawigacyjnych oraz braku wiarygodnej informacji z systemów informacji przestrzennej (zmiana ukształtowania terenu jako wynik klęsk żywiołowych).

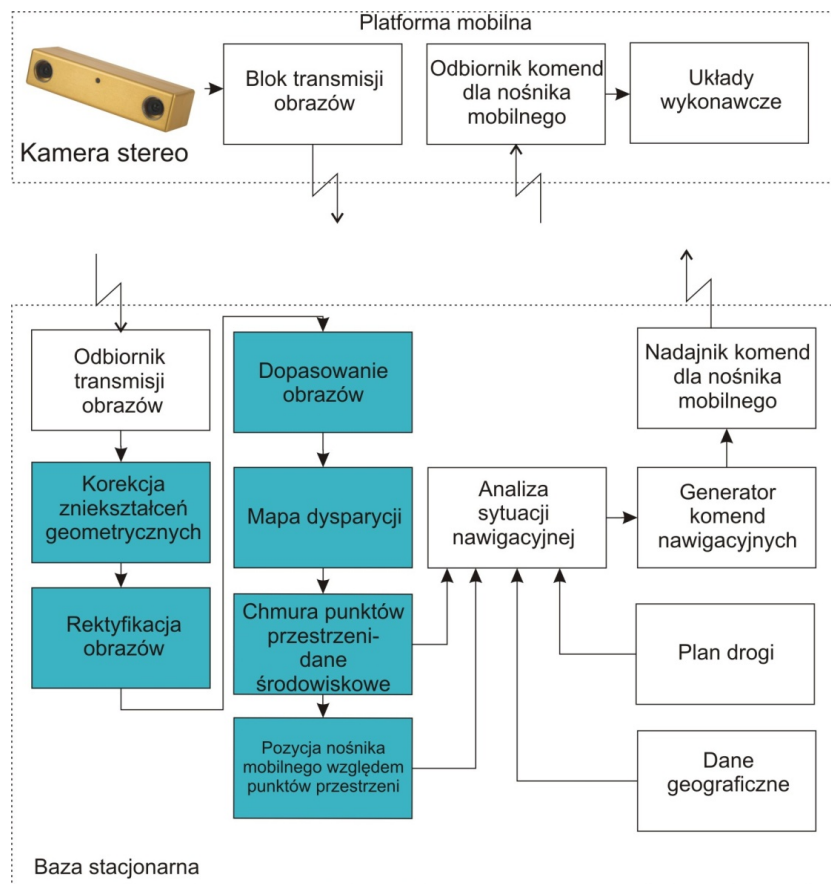
System nawigacyjny bazujący na metodach fotogrametrycznych zainspirowany działaniem ludzkiego wzroku, oraz szerokim spektrum możliwości jaki daje ten zmysł, jest dobrym uzupełnieniem zapewniającym niezależność platformie bezzałogowej.

2. FOTOGRAMETRYCZNY SYSTEM NAWIGACYJNY

System nawigacyjny wykorzystujący metody fotogrametryczne ma na celu przede wszystkim wspierać autonomiczne platformy mobilne. Przez autonomiczne platformy mobilne rozumie się różnego typu bezzałogowe: aparaty latające, pojazdy lądowe, pojazdy nawodne oraz roboty, zdolne do autonomicznego bądź zdalnie sterowanego przemieszczania się i przenoszenia ładunków, w określonym dla danego typu platformy środowisku. Autonomiczne i bezpieczne przemieszczanie się platformy mobilnej uzależnione jest przede wszystkim od posiadanych danych przestrzennych i aktualnych danych środowiskowych. Dane przestrzenne w postaci cyfrowego modelu środowiska służą mobilnej platformie, jako dane wejściowe, do przeprowadzenia analizy sytuacji nawigacyjnej i obliczenia zadanego zadania nawigacyjnego. Bezpieczne wykonanie zadania nawigacyj-

nego wymagać będzie jednak uwzględnienia aktualnych danych środowiskowych, które mogą się zmieniać w sposób dynamiczny. Aktualny stan środowiska może znacznie różnić się od wejściowych danych, jak wspomniano wcześniej np. po trzęsieniu ziemi czy też innych klęskach żywiołowych.

System nawigacyjny wykorzystujący metody fotogrametryczne wyposażony w kamery w układzie stereoskopowym w paśmie światła widzialnego, zbiera aktualne dane środowiskowe, buduje aktualną mapę danego środowiska w którym porusza się platforma mobilna, określa położenie platformy względem innych obiektów w środowisku. Umiejscowienie takiego systemu w systemie nawigacyjnym platformy mobilnej umieszczono na schemacie blokowym (Rys. 1). Poszczególne bloki funkcjonalne oznaczono na schemacie blokowym kolorem niebieskim.



Rys. 1. System nawigacyjny wykorzystujący metody fotogrametryczne
(źródło: opracowanie własne)

Kamera stereowizyjna, czyli układ dwóch kamer, o równolegle ustawionych osiach optycznych jest bezpośrednio odpowiedzialny za sensoryczne zbieranie danych środowiskowych w paśmie światła widzialnego.

Korekcja zniekształceń geometrycznych oraz rektyfikacja jest wstępnym etapem przetwarzania obrazów. Procedura kalibracji określa parametry niezbędne do przeprowadzenia korekcji geometrycznej oraz rektyfikacji gromadzonych przez pojazd obrazów środowiska w którym się porusza.

2.1. Obróbka i przetwarzanie obrazów stereoskopowych

Rektyfikacja jest to przekształcenie obrazów stereoskopowych w taki sposób, aby odpowiadające sobie linie epipolarnie w obu obrazach stały się współliniowe oraz równoległe do poziomych linii skanowania obrazów (Cyganek, 2002).

Linia epipolarna dla danego punktu $p_R(p_L)$ z obrazu kamery prawej (lewej) jest linia będąca obrazem w kamerze lewej (prawej) prostej wychodzącej z ogniska $c_R(c_L)$ kamery prawej (lewej) i przechodzącej przez $p_R(p_L)$ (Rzeszotarski *et al.*, 2006).

W rozwiązaniach praktycznych stereoskopowych układów kamer, linie epipolarnie są nierównoległe, czyli układ kamer jest niekanoniczny.

W prezentowanych badaniach wykorzystano obrazy stereoskopowe zaczerpnięte z sieci Internet (Bielawski, 2010) pochodzące z innych eksperymentów dotyczących stereowizji. Wykorzystane zdjęcia wykonane zostały układem stereograficznym zbudowanym z dwóch cyfrowych aparatów fotograficznych SONY W-40, umieszczonych na ramie, oraz zsynchronizowanych mechanicznie przy pomocy wężyków spustowych. W celu analizy zdjęć opracowano skrypt w środowisku Matlab, który jest oryginalnym wkładem autorów.

2.2. Przekształcenie transformujące

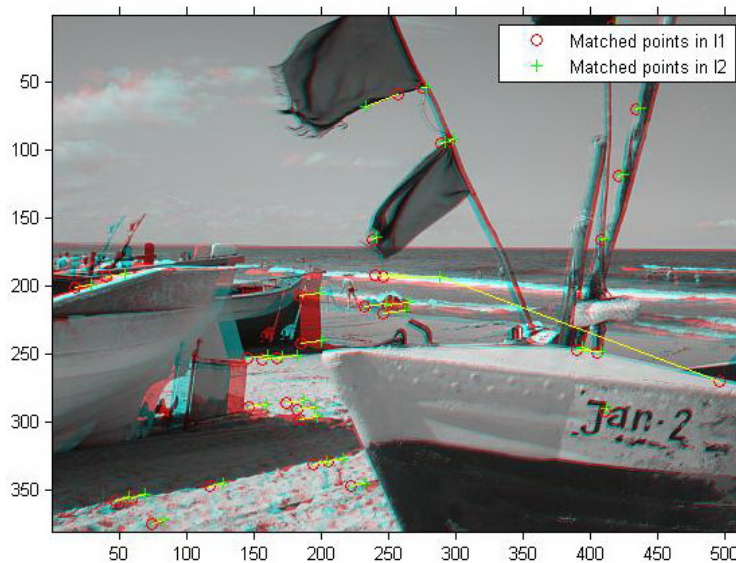
Rektyfikacja obrazów sprowadza się do znalezienia przekształcenia transformującego, czyli macierzy przekształcenia T_1 dla obrazu lewego i macierzy T_2 , dla obrazu prawego, po którym linie epipolarnie będą równoległe dla obu obrazów.

W opisywanym przykładzie, określenie macierzy przekształcenia, rozpoczęto od odnalezienia regionów obrazu gdzie najszybciej będzie można odnaleźć punkty korespondujące obrazu lewego i prawego reprezentujących ten sam punkt w przestrzeni, z wykorzystaniem detektora narożników *Hariss'a* (Chris Harris, 1988) (Rys. 2).



Rys. 2. Obraz lewy i prawy środowiska testowego z oznaczonymi narożnikami wykrytymi metodą Harissa (źródło: opracowanie własne)

Wokół odszukanych narożników, w obszarze 9×9 punktów, w obu obrazach, wykorzystując metodę korelacji wzajemnej (*ang. cross correlation*) kierując się podobieństwem kształtu, wyszukano punkty homologiczne dla lewego i prawego obrazu. Punkty homologiczne obrazu lewego oznaczono czerwonym okręgiem, prawego zielnym krzyżykiem, wynik reprezentuje obraz na Rys. 3, jednocześnie wyświetlone na sobie. Taki sposób wyświetlania uwidacznia różnicę między tym co widzi oko kamery w różnych pozycjach.

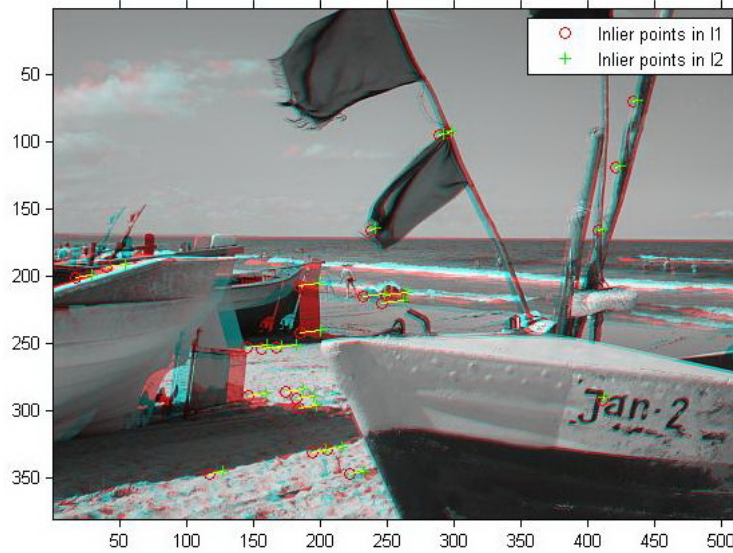


Rys. 3. Punkty homologiczne obrazów lewego i prawego (wynik obarczony błędami grubymi) (źródło: opracowanie własne)

Wynik wyszukiwania punktów homologicznych obarczony jest błędem pomiaru, który wynika z rozdzielczości obrazu oraz wyrazistości cech. Pozycja punktu charakterystycznego obarczona jest błędem pomiaru, o rozkładzie normalnym. Błędy pomiaru, na tym etapie badań, nie mają dużego wpływu na tworzenie macierzy transformacji, toteż nie będą uwzględniane w dalszym toku rozważań.

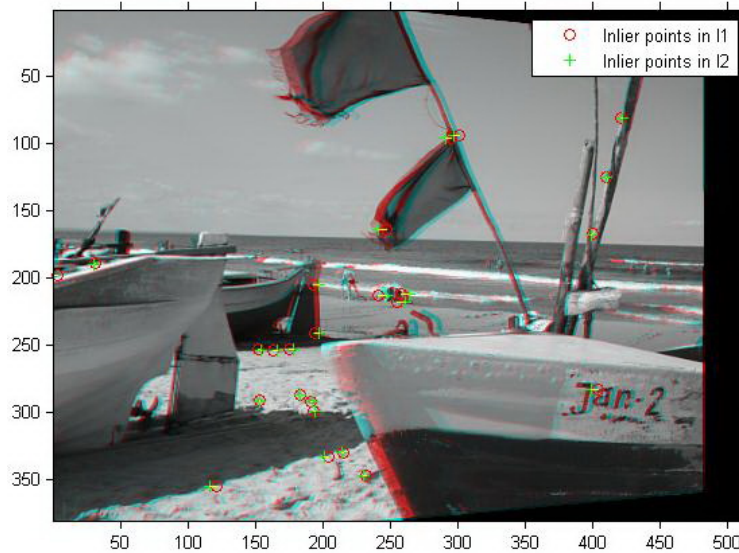
Błędy grube (Rys. 3), które powstają w wyniku błędnej identyfikacji punktów homologicznych, mają duży wpływ na macierz transformacji. Błędna klasyfikacja punktów korespondujących wynika z podobieństwa punktów, według zadanej miary podobieństwa, w tym przypadku kształtu.

Eliminacja błędów grubych, ze względu na duży wpływ na macierz transformacji, jest niezbędna. Wykorzystując algorytm *RANSAC* (Bolles, 1981) (*z ang. random sample consensus*), wyeliminowano punkty nie leżące na tych samych liniach epolarnych, dopasowanych błędnie jako punkty homologiczne. Wynik działania algorytmu *RANSAC* na punkty badanych obrazów prezentuje Rys. 4.

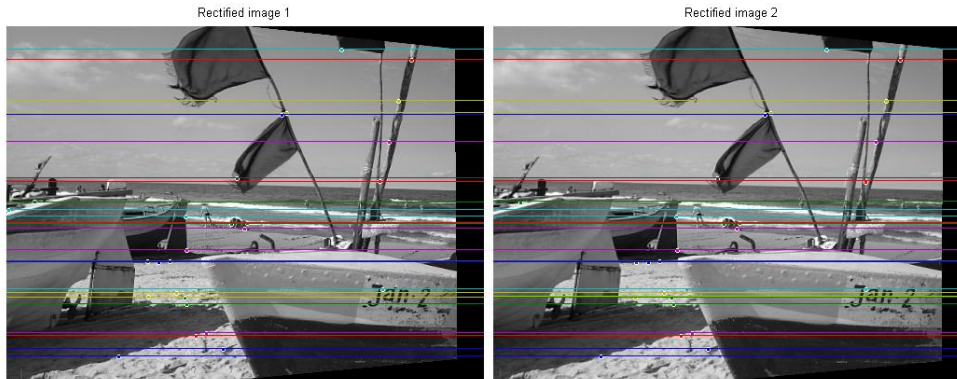


Rys. 4. Eliminacja niekorespondujących punktów algorytmem RANSAC – wynik działania (źródło: opracowanie własne)

Wykorzystując transformację projekcyjną, dzięki której zachowuje się prostolinowość, ale nie równoległość, przekształcono analizowane obrazy, co prezentuje Rys. 5. Kolejny rysunek (Rys. 6) przedstawia obrazy rozdzielone z naniesionymi liniami, łączącymi punkty korespondujące obu obrazów. Linie są równoległe i leżą w tych samych rzędach dla danej pary punktów, co potwierdza poprawność wykonanej transformacji.



Rys. 5. Obrazy poddane transformacji projekcyjnej (źródło: opracowanie własne)



Rys. 6. Linie epipolarne dla stereopary (źródło: opracowanie własne)

2.3 Mapowanie głębi obrazu

Mapa głębi obrazu, określa odległość każdego punktu obrazu od oka kamery. Pozycja punktu obrazu, wyznaczona z pozycji punktu rejestrowanego obrazu oraz jego odległość od oka obserwatora, wyznaczona z mapy głębi obrazu, pozwoli wyznaczyć pozycję obserwatora względem obiektów widzianych okiem kamery. Wyznaczona pozycja obserwatora względem innych obiektów otoczenia pozwala przede wszystkim na jego orientację w przestrzeni, bez wykorzystania informacji o otoczeniu np. w postaci mapy. Jako otoczenie rozumie się, wszystkie obiekty znajdujące się w przestrzeni dookoła obiektu nawigującego. W ten sposób obserwator (pojazd bezzałogowy) jest niezależny od informacji o otoczeniu, ponieważ jest w stanie autonomicznie zbudować i wygenerować mapę otoczenia na własne potrzeby. Dodatkowo, wygenerowana mapa otoczenia jest dynamiczna, co oznacza, że wszelkie zmiany mogą być rejestrowane przez system w czasie zbliżonym do rzeczywistego.

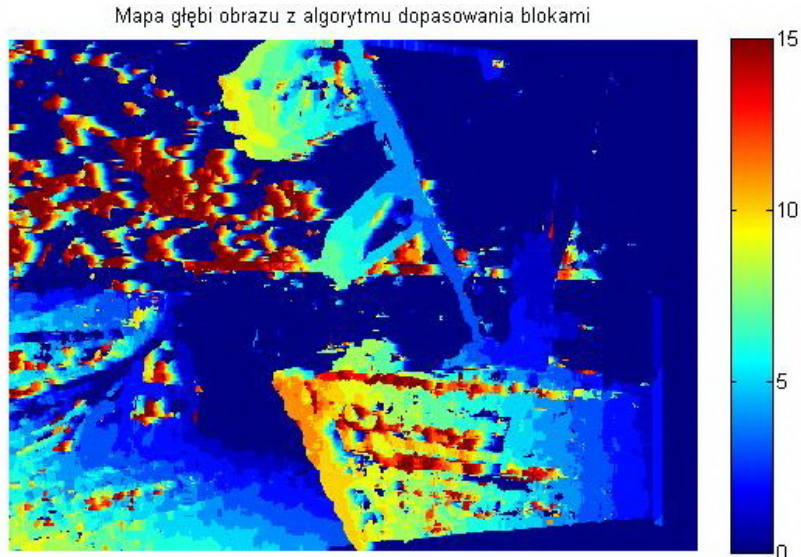
2.4. Metody dopasowujące obszarami

Metody dopasowujące obszarami, nazywane również blokowymi lub korelacyjnymi, polegają na korelowaniu wybranych obszarów obrazu, zgodnie z przyjętym kryterium korelacyjnym (Cyganek, 2002). Jako kryterium korelacyjne w analizowanym przykładzie przyjęto miarę *SAD* (Cyganek, 2002), miarę tą przyjęto w wyniku przeglądu literatury przedmiotu, z którego wynika, iż jest ona najszybsza obliczeniowo i daje najdokładniejszą mapę dysparycji (1):

$$\sum_{(i,j) \in U} |I_1(x+i, y+j) - I_2(x+d_x+i, y+d_y+j)|, \quad (1)$$

gdzie $I_k(x, y)$ jest wartością intensywności, k -tego obrazu, w punkcie o współrzędnych lokalnych (x, y) , indeksy i oraz j należą do zbioru liczb całkowitych, d_x oraz d_y są wartościami dysparycji, zbiór U jest zbiorem par liczb całkowitych wyznaczających otoczenie pewnego punktu o współrzędnych lokalnych (x, y) obrazu (Cyganek, 2002).

Dobra jakość mapy dysparycji oraz przede wszystkim szybkość działania będą ważnymi cechami jakie należy brać pod uwagę w systemie nawigacyjnym. Wynik działania algorytmu dopasowania obszarami, bloku o wymiarach 7×7 punktów prezentuje Rys. 7.



Rys. 7. Mapa głębi obrazu – dopasowanie obszarami (źródło: opracowanie własne)

Do oznaczenia odległości od obserwatora, przyjęto 15-sto stopniową skalę odległości. Skala czerwieni znajduje się blisko obserwatora, niebieski dalej, obszary „zakłóceń” w głębi obrazu, pojawiają się szczególnie w rejonach obrazu gdzie nie ma mocnych cech w bloku dopasowania. Powoduje to powstanie niejednoznaczności przy dopasowaniu w zadanym obszarze. Na obrazie obszary zakłóceń pojawiają się w rejonie sfotografowanego nieba.

2.5. Chmura punktów – mapa przestrzeni

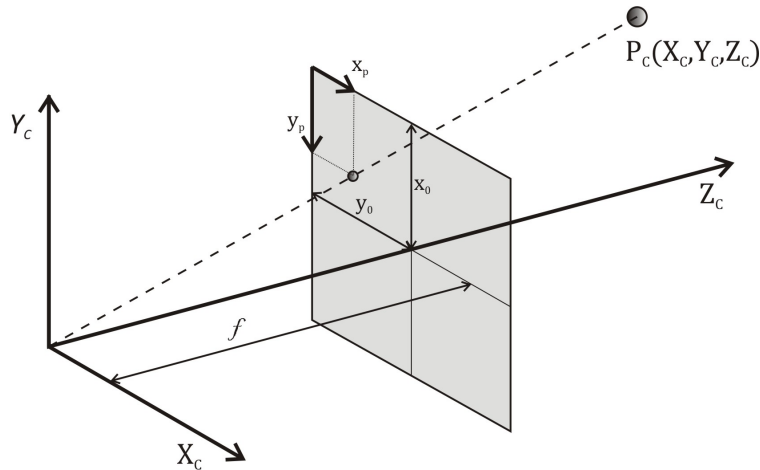
Znając mapę głębi obrazu oraz parametry wewnętrzne kamery możliwe jest rzutowanie punktów obrazu na przestrzenny układ współrzędnych (x, y, z) (Hartley Zisserman, 2003) (Trucco Verri, 1998). Parametry wewnętrzne kamery można określić przy pomocy narzędzia MATLAB Camera Calibration Toolbox[®] (Bouguet, 2008). Narzędzie określa parametry wewnętrzne kamery które przedstawia w postaci macierzy (Rzeszotarski *et al.*, 2006):

$$K = \begin{bmatrix} f_x & \gamma & x_0 \\ 0 & f_y & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

gdzie:

- f_x, f_y – ogniskowa kamery wyrażona w liczbie punktów obrazu (pikseli),
- x_0, y_0 – współrzędne punktu głównego, czyli punktu przecięcia prostej prostopadłej do płaszczyzny obrazu przechodzącej przez ognisko kamery z płaszczyzną obrazu (Rys. 8),

- γ – współczynnik określający kąt między osiami x i y czujnika kamery, dla większości współczesnych matryc kamer cyfrowych współczynnik będzie wynosić $\gamma = 0$, czyli osie x i y kamer będą idealnie prostopadłe.



Rys. 8. Układ współrzędnych pojedynczej kamery, zaznaczone wybrane parametry wewnętrzne kamery

Związek między współrzędnymi punktu obrazu (x_p, y_p) , a punktem w przestrzeni (X_C, Y_C, Z_C) opisuje zależność:

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{bmatrix} = K \times \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix}. \quad (3)$$

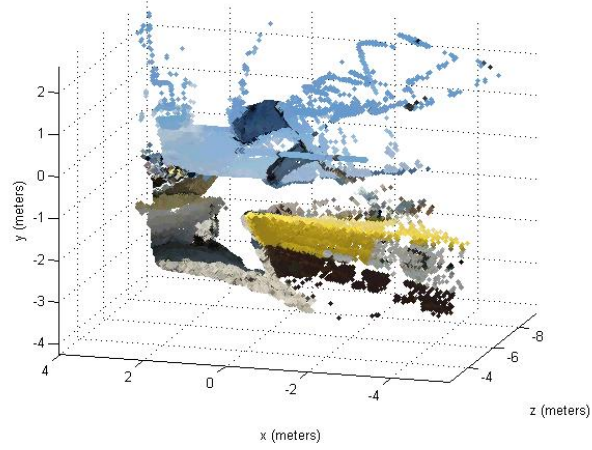
Dzięki znajomości parametrów wewnętrznych kamery można przypisać każdy punkt obrazu, punktowi umieszczonemu na płaszczyźnie w przestrzeni, która została zarejestrowana przez tą kamerę. Odległość punktu od oka kamery określić można z pomiarów dysparycji, pomiędzy dwoma obrazami stereo (Bouguet, 2008):

$$Z_C = f \times \frac{1+B}{D}, \quad (4)$$

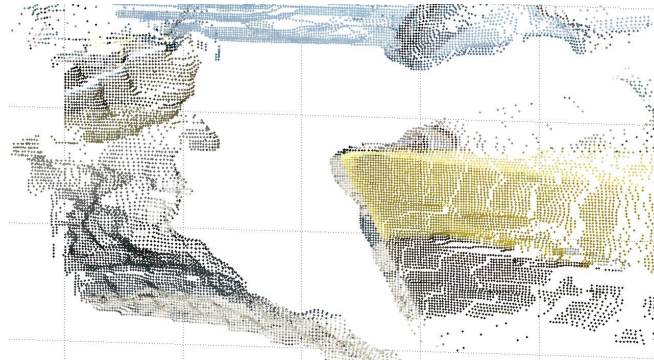
gdzie:

- f – ogniskowa kamery, wyrażona w pikselach,
- B – odległość pomiędzy osiami optycznymi kamer, tzw. baza,
- D – wartość dysparycji (różnica pomiędzy współrzędnymi punktu zarejestrowanego przez kamerę lewą i prawą).

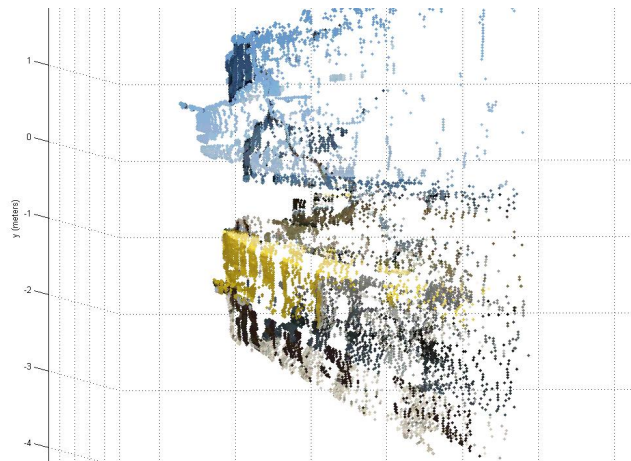
Wyniki obliczeń w postaci chmury punktów umieszczonych w układzie współrzędnych przedstawiono na Rys. 9, Rys. 10 oraz Rys. 11.



Rys. 9. Chmura punktów – przestrzenna mapa środowiska



Rys. 10. Chmura punktów – zbliżenie



Rys. 11. Chmura punktów – tworzy przestrzeń

3. PODSUMOWANIE

Współczesne systemy nawigacyjne pojazdów bezzałogowych do orientacji obiektu w terenie wykorzystują głównie posiadaną informację geograficzną przedstawioną przez mapy elektroniczne. Brak tejże mapy eliminuje te systemy z użycia, lub poważnie ogranicza bezpieczne przemieszczanie się w danym środowisku.

Poruszanie się platform mobilnych wymusza stosowanie nowoczesnych i niezawodnych systemów nawigacji dla tego typu urządzeń. Problem ten nabiera szczególnego znaczenia gdy mamy do czynienia z zastosowaniami militarnymi, czy też innymi, których charakter wymaga poruszania się w środowisku, gdzie robot zdany jest tylko i wyłącznie na własne sensory (przykład – usuwanie skutków wycieku z reaktora w jednej z siłowni jądrowych w Japonii). Inspekcja reaktora siłowni jądrowej Fukushima zrealizowana była za pomocą bezzałogowych aparatów latających (Honig, 2011). Wykorzystano do tego celu m.in. bezzałogowe aparaty latające typu *T-Hawk*. Pojazd wykonujący tego typu zadania nie może być uzależniony od jednego systemu nawigacyjnego, ponieważ jego niezawodność jest wówczas bardzo mała. Powinien on być autonomiczny pod względem pozyskiwania informacji o swoim położeniu. Zatem wyposażenie pojazdu bezzałogowego w system umożliwiający mu orientowanie się w środowisku w którym się znajduje jest bardzo ważnym wymogiem operacyjnym. System stereowizyjny oparty na metodach fotogrametrycznych dawałby autonomiczność, niezależność oraz niezawodność pojazdowi bezzałogowemu.



Fot. 2. Bezzałogowy aparat latający typu T-Hawk, wykorzystany do inspekcji reaktora Fukushima I (Honig, 2011)

System nawigacyjny pojazdu nie powinien bazować na informacji o środowisku (z ang. *map less navigaton*), jako informacji wejściowej. Tworzenie mapy środowiska odbywa się na podstawie własnych danych sensorycznych w czasie rzeczywistym lub zbliżonym do rzeczywistego.

Ze wstępnych wyników przeprowadzonych eksperymentów numerycznych można stwierdzić, że obliczenie pozycji obiektu nawigującego względem środowiska otaczającego obiekt jest możliwe przy pomocy układu kamer w systemie stereowizyjnym. Zastosowane algorytmy oraz wyniki jakie uzyskano to potwierdzają. Szybkość obliczeń zaimplementowanych algorytmów w środowisku Matlab jest niska, obliczenie mapy dysparycji dla

zastosowanych obrazów zajmuje kilkanaście sekund, co wynika wprost z zastosowanego środowiska. Środowisko Matlab zostało wybrane na tym etapie prac, ze względu na łatwość obsługi oraz bogatą bazę bibliotek programistycznych. W opracowaniu (Rzeszotarski *et al.*, 2006) autorzy przy zastosowaniu podobnych algorytmów osiągnęli szybkość obliczeń mapy dysparycji około 7 klatek/sekundę, przy implementacji w środowisku Borland C++, z zastosowaniem bibliotek OpenCV, bez stosowania instrukcji assemblerowych. Z wstępnych testów zastosowania bibliotek MRPT (MRPT, 2011) (z ang. *Mobile Robot Programming Toolkit*) w środowisku programistycznym MiniGW (C++) (MinGW GNU, 2011) osiągnięto bardzo szybkie czasy obliczeń poszczególnych etapów działania algorytmu, co pozwala sądzić że osiągnięte czasy będą zbliżone do rzeczywistego.

4. LITERATURA

- Bielawski T., 2010. *Fotomplastikon*. <http://www.fotomplastikon.pl>
- Bolles M. A., 1981. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. *Communications of the ACM*.
- Bouguet J. Y. 2008. *California Institute of Technology*. (Computational Vision at the California Institute of Technology®) Camera Calibration Toolbox for Matlab. http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/
- Chris Harris M. S., 1988. A combined corner and edge detector. *Plessey Research Roke Manor*.
- Cyganek B., 2002. *Komputerowe przetwarzanie obrazów cyfrowych*. Warszawa, EXIT.
- Hartley H., Zisserman, A., 2003. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge: Cambridge University Press 2000.
- Honig Z., 2011. *T-Hawk UAV enters Fukushima danger zone, returns with video*. <http://www.engadget.com/2011/04/21/t-hawk-uav-enters-fukushima-danger-zone-returns-with-video/>
- MinGW GNU, 2011. *Minimalist GNU for Windows*. <http://www.mingw.org/>
- MRPT, 2011. *Mobile Robot Programming Toolkit*. <http://www.mrpt.org>
- Rzeszotarski D., Strumiłło P., Pełczynski P., Wiecek B., Lorenc A., 2006. System obrazowania stereoskopowego sekwencji scen trójwymiarowych. <http://www.eletel.p.lodz.pl/programy/sv/publikacje/pdf/12.pdf>
- Trucco E., Verri A., 1998. *Introductory Techniques for 3-D Computer Vision*. Upper Saddle River: Prentice Hall.

PHOTOGRAMMETRIC SUPPORT FOR MOBILE PLATFORMS' NAVIGATION SYSTEMS

KEY WORDS: navigation, system, photogrammetry, stereovision, autonomous, mobile

SUMMARY: An areas unavailable for GPS signal, without digital terrain model, are unavailable for autonomous unmanned vehicles too. The main aim for navigation system making use of photogrammetric methods is to make accessible limited areas, where safe and accurate autonomous unmanned vehicles moving is impossible, due to the external changes within particular area. Proposed navigation system, based on photogrammetric methods is inspired by human vision, and its wide scope.

mgr inż. Paweł Burdziakowski
e-mail: pawelburdziakowski@gmail.com, telefon: 609-466-621