

Marek PISZCZEK, Krzysztof RUTYNA

WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA, INSTYTUT OPTOELEKTRONIKI, UL. KALISKIEGO 2, 00-908 WARSZAWA
WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA, INSTYTUT OPTOELEKTRONIKI, UL. KALISKIEGO 2, 00-908 WARSZAWA

Potencjał informacyjny obrazów pozyskiwanych z bezpilotowej platformy latającej

Dr inż. Marek PISZCZEK

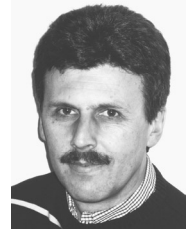
Jest absolwentem Wojskowej Akademii Technicznej (w 1995 r. ukończył studia na Wydziale Elektroniki). Od 2003 r. jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym Instytutu Optoelektroniki WAT. Jego zainteresowania naukowe obejmują między innymi problemy z zakresu inżynierii informacji obrazowej. Do ważniejszych zagadnień, którymi się zajmuje należą opracowania dotyczące adaptacji techniki obrazowej do celów pomiarowych.



e-mail: mpiszczek@wat.edu.pl

Dr inż. Krzysztof RUTYNA

Ukończył studia na Wydziale Elektroniki w 1984 r. Jest pracownikiem naukowym Instytutu Optoelektroniki WAT. Jego zainteresowania zawodowe koncentrują się wokół zagadnień z zakresu diagnostyki bardzo szybkich procesów w warunkach silnych obciążeń dynamicznych.



e-mail: krutyna@wat.edu.pl

Streszczenie

W referacie przedstawiono ogólną charakterystykę obrazów pozyskiwanych z aerofotogrametrycznych platform, w tym również systemów wizyjnych stanowiących wyposażenie Bezpilotowego Statku Powietrznego - BSP. Artykuł zawiera także podstawowe informacje o zastosowanej platformie latającej oraz testowanych modułach obrazowych. Opracowanie zawiera także charakterystykę akwizycji danych obrazowych metodą rzutu środkowego oraz sposób rektyfikacji (obrazów pochodzących z mikroBSP) metodami: parametryczną i nieparametryczną. Zamieszczone wyniki testów dotyczyły oceny stabilności lotu, możliwości integracji zdjęć z fotomapą oraz opracowania fotoszkiców. Przedstawiono również wyniki analiz wpływu oszacowań parametrów orientacji wewnętrznej i zewnętrznej na dokładność wyznaczania pozycji terenowej.

Słowa kluczowe: fotogrametria, cyfrowe przetwarzanie obrazów, bezpilotowe statki powietrzne

Information potential of image data obtained from Unmanned Aerial Vehicle

Abstract

This paper presents general characteristic of images acquired from aerophotogrammetric platforms like visual systems of Unmanned Aerial Vehicles (UAV). Basic information about the flying platform and image modules are also presented. Characteristic of acquisition of image by means of a central projection method and a procedure of rectification (parametric and non-parametric) of UAV-images are shown. Results of our tests relate to estimation of flying stabilization, possibility of integration with photomap and possibility of photodraft creating. Analysis of influence of estimated orientation (internal and external) parameters on a field position precision is also evaluated.

Keywords: photogrammetry, digital image processing, Unmanned Aerial Vehicle

1. Wprowadzenie

Cechą charakterystyczną współczesnych konfliktów zbrojnych, rozwoju sytuacji kryzysowych jest dynamicznie zmieniająca się sytuacja terenowa. Takie a nie inne realia wymagają od systemów informacyjnych ciągłej aktualizacji danych. Zaawansowane i rozbudowane systemy rozpoznania obrazowego (lotnicze, satelitarne) pracujące w obszarze fotogrametrii dalekiego zasięgu nie zawsze są w stanie spełnić wymogi informacyjne stawiane przez użytkowników np. dostępność do systemu na życzenie,

aktualność danych, wymagana rozdzielczość itd.. Pewną alternatywę w zakresie obrazowych systemów rozpoznania stanowią bezzałogowe platformy wyposażone w moduły wizyjne. Rosnące od wielu lat zapotrzebowanie (szczególnie ze strony wojska) na Bezpilotowe Statki Powietrzne (BSP) zaowocowało powstaniem wielu różnych konstrukcji [1]. Do najbardziej znanych rozwiązań należą bardzo zaawansowane konstrukcje m.in. Predator czy Global Hawk, które są stosowane do rozpoznania powietrznego i charakteryzują się stosunkowo dużymi (jak na tę klasę obiektów) parametrami geometryczno-masowymi, złożonymi układami aerodynamicznymi, itd.. Istnieją również znacznie prostsze konstrukcje, oferowanie między innymi przez rodzimych producentów, np. SOFAR (WB ELECTRONICS) [2] czy HOB-bit (ITWL) [3] wykorzystywane m.in. w systemach ochrony do nadzoru terenów rozległych. Niewielkie konstrukcje latające klasy mini nie są w stanie zapewnić stabilnego lotu, gdyż są bardzo podatne na wszelkie ruchy mas powietrza. Bez stabilizacji głównej osi optycznej kamer niemożliwa staje się rejestracja tzw. obrazów prawopionowych będących podstawą współczesnych analiz fotogrametrycznych. Skutkuje to nieco odmiennym podejściem do sposobu analizy i wykorzystania materiału obrazowego z tego typu platform. Traktuje się je najczęściej jako mobilne, zdalnie sterowane moduły wykorzystywane do bezpośrednich obserwacji terenu i fotointerpretacji materiału na postawie tzw. obrazów ukośnych. Rezygnacja z potencjalnych możliwości pomiarowych wydaje się być jednak nieuzasadniona. Niniejszy referat nawiązuje do wyników uzyskanych podczas prac nad projektem HOB-bit autorstwa ITWL oraz mikroBSP realizowanego przez konsorcjum ITWL, WAT, RADWAR w zakresie możliwości wykorzystania materiału obrazowego uzyskanego z kamer pokładowych bezzałogowej mini-platformy powietrznej do pozycjonowania obiektów terenowych.

2. Właściwości zdjęć lotniczych

Liczne ograniczenia w zakresie możliwości akwizycji i przetwarzania obrazów z BSP (w stosunku do zaawansowanych lotniczych czy satelitarnych systemów fotogrametrycznych) nie dyskwalifikuje ich jedynie precyzuje obszary potencjalnych zastosowań. O potencjale informacyjnym rozwiązań fotogrametrycznych decyduje m.in. możliwość określania kształtu, wielkości, czy położenia przestrzennego obiektów i zjawisk fizycznych. Pojemność informacyjna systemu zależy zarówno od parametrów modułu akwizycji: zdolność rozdzielcza, kątowne pole widzenia, znajomość elementów orientacji wewnętrznej i zewnętrznej układu teledetekcyjnego jak

i modułów analitycznych, realizujących algorytmy przetwarzania i analizy danych. Złożoność informacji terenowej wprowadza rozróżnienie aż czterech rodzajów rozdzielczości dla systemów geomatycznych: przestrzenna, czasowa, radiometryczna i spektralna. Dodatkowo wypadkowa przestrzenna zdolność rozdzielcza limitowana jest rozdzielczością obiektywu, układu detekcyjnego, rozmyciem obrazu spowodowanym ruchem postępowym platformy i jej ruchami kątowymi, kontrastem obserwowanego obiektu oraz czynnikami atmosferycznymi [4-5]. Podstawowa istotna różnica między fotogrametrią lotniczą (satelitarną) a zobrazowaniami z BSP, wynika z realizowanych zadań. W pierwszym przypadku (gdzie dysponuje się wysokorozdzielczymi zdjęciami prawie pionowymi, wykonanymi z wysokich pułapów) przedmiotem zainteresowania jest identyfikacja i precyzyjne pozycjonowanie obiektów/zjawisk występujących na danym terenie. W przypadku mikroBSP (gdzie uzyskujemy zdjęcia/wideo o stosunkowo niskiej rozdzielczości, wykonane na niskich pułapach pod różnymi kątami) najistotniejsza jest aktualność sytuacji terenowej związanej z określoną grupą obiektów i/lub zjawisk. Zadania realizowane przez poszczególne platformy determinują rodzaj możliwej do uzyskania informacji:

- a) w fotogrametrii lotniczej są to: opracowania kartometryczne (mapy topograficzne, fotomapy, ortofotomapy), trójwymiarowe obrazowanie terenu (NMT – Numeryczny Model Terenu),
- b) w fotogrametrii mikroBSP może to być fotoszkie (opracowanie o ograniczonych własnościach kartometrycznych)

3. Akwizycja danych obrazowych

Podczas realizacji projektu mikroBSP akwizycja obrazów realizowana była przez kamery podczepione do dziobowej części kadłuba platformy. Dane o aktualnej pozycji terenowej samolotu pozyskiwane były z modułu GPS. Do wyznaczania pozycji terenowej obiektów wykorzystywany był pozyskany materiał obrazowy, dane telemetryczne (lokalizacji i orientacja w przestrzeni platformy), oraz dostępne mapy topograficzne, zdjęcia lotnicze (satelitarne). Dzięki rektyfikacji geometrycznej można było przeprowadzić procedurę mozaikowania, w wyniku której możliwe było uzyskanie fotoszkie.

3.1. Elementy systemu

System pomiarowo-obszaryjny składa się z platformy latającej "HOB-bit" wraz wymiennymi modułami akwizycji obrazów oraz naziemnego centrum planowania i kontroli misji.

Tab. 1. Podstawowe dane techniczne platformy HOB-bit
Tab. 1. Basic technical data of HOB-bit platform

Masa startowa	3,5÷5 kg
Prędkość lotu	40÷90 km/h
Wysokość praktyczna	100÷600 m
Promień operowania	do 20 km
Czas lotu	do 90 min



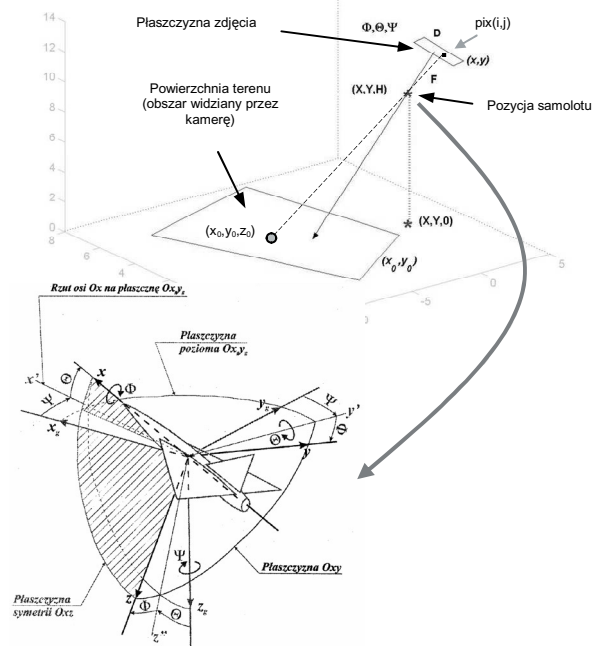
Tab. 2. Charakterystyka modułów akwizycji obrazów
Tab. 2. Characteristic of modules of acquisition images

Model	Kamera 1 - CCTV	Kamera 2 - MedRes
Matryca CCD <i>D</i>	5.08mm x 3.81mm	7.53mm x 5.64mm
Rozdzielczość <i>m, n</i>	TRYB VIDEO 792 x 594	TRYB VIDEO 320 x 240 TRYB FOTO 2048 x 1536
Ogniskowa <i>F</i>	4.2 - 42mm	5.5 - 16.5mm
Jasność obiektywu <i>Średnica przysłony</i>	1.6 - 2.9 2.63 - 14.48 mm	2.6 - 4.7 2.12 - 3.51 mm
Migawka <i>A</i>	TRYB VIDEO 1/60 - 1/100000s	TRYB FOTO: 8 - 1/2000s TRYB VIDEO: 1/30-1/2000s

Transmisja danych rejestrowanych podczas lotu realizowana była:
- kodowanymi łączami analogowymi (obrazy),
- łączami cyfrowymi (dane z GPS).

3.2. Metoda pomiarowa

Systemy fotogrametryczne BSP wykorzystują do akwizycji obrazów metodę rzutu środkowego. Orientację wewnętrzną rejestratora reprezentują: przekątna matrycy *D* (d-rozmiar piksela), ogniskowa obiektywu *F* oraz współrzędne obrazowe (*x, y*) zależne od pozycji obiektu (*i, j*) na matrycy detekcyjnej o wymiarze (*m, n*). Elementy orientacji zewnętrznej stanowią: aktualna pozycja w przestrzeni platformy mikroBSP (*H*-wysokość terenowa, wsp. geodezyjne *X, Y*, wsp. geograficzne λ_0, μ_0), oraz orientacja kamery (samolotu), którą reprezentują kąty odchylenia, pochylenia i przechylenia (Ψ, Θ, Φ).



Rys. 1. Rzut środkowy z elementami orientacji wewnętrznej i zewnętrznej
Fig. 1. The central projection with elements of internal orientation and external

3.3. Metodyka wyznaczania pozycji w terenie na podstawie zdjęcia

Do wyznaczania pozycji terenowej obiektu (x_0, y_0, z_0 - we współrzędnych geodezyjnych) zidentyfikowanego na zdjęciu jako *pix(i, j)* wykorzystano dwie metody:

1. Parametryczną – wykorzystującą znajomość elementów orientacji wewnętrznej i zewnętrznej [4]

$$\begin{bmatrix} x_0(i, j) \\ y_0(i, j) \\ z_0(i, j) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{13}F + X(\lambda_0) \\ a_{23}F + Y(\mu_0) \\ a_{33}F + H \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x = d(\text{pix}(i) - 0.5 - 0.5m) \\ y = d(\text{pix}(j) - 0.5 - 0.5n) \\ z = 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\Theta \cos\Psi & -\cos\Theta \sin\Psi & \sin\Theta \\ \cos\Phi \sin\Psi + \sin\Phi \sin\Theta \cos\Psi & \cos\Phi \cos\Psi - \sin\Phi \sin\Theta \sin\Psi & -\sin\Phi \cos\Theta \\ \sin\Phi \sin\Psi - \cos\Phi \sin\Theta \cos\Psi & \sin\Phi \cos\Psi + \cos\Phi \sin\Theta \sin\Psi & \cos\Phi \cos\Theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

2. Nieparametryczną (transformacja perspektywiczna 2D) – wykorzystującą mapy terenu i znajomość położenia punktów charakterystycznych

$$x_0 = \frac{Ax + By + C}{Dx + Ey + 1}; \quad y_0 = \frac{Gx + Hy + F}{Dx + Ey + 1} \quad (3)$$

Do określenia parametrów (A, B, C, D, E, F, G, H) wymagana jest znajomość współrzędnych terenowych co najmniej 4 par punktów x_i, y_i i x'_i, y'_i (tzw. punktów homologicznych).

Wielkości λ_0 i μ_0 oznaczają współrzędne geograficzne rzutu na powierzchnię Ziemi współrzędnych mikroBSP z przestrzeni 3D. Współrzędne geograficzne obiektów wyznacza się ze wzorów

$$x_\lambda(i, j) = \frac{X(\lambda_0) - H \cdot (x_0(i, j) - X(\lambda_0))}{(z_0(i, j) - H)} \quad y_\mu(i, j) = \frac{Y(\mu_0) - H \cdot (y_0(i, j) - Y(\mu_0))}{(z_0(i, j) - H)} \quad (4)$$

$$\Delta\lambda = f(\lambda_0) \left[\frac{^\circ}{m} \right] \quad \Delta\mu = f(\mu_0) \left[\frac{^\circ}{m} \right] \quad (5)$$

$$\lambda_0(i, j) = \lambda_0 + x_\lambda(i, j) \cdot \Delta\lambda(\lambda_0) \quad \mu_0(i, j) = \mu_0 + y_\mu(i, j) \cdot \Delta\mu(\mu_0) \quad (6)$$

gdzie $\Delta\lambda$ i $\Delta\mu$ są współczynnikami przejścia między układem geodezyjnym a układem współrzędnych geograficznych.

4. Wyniki badań

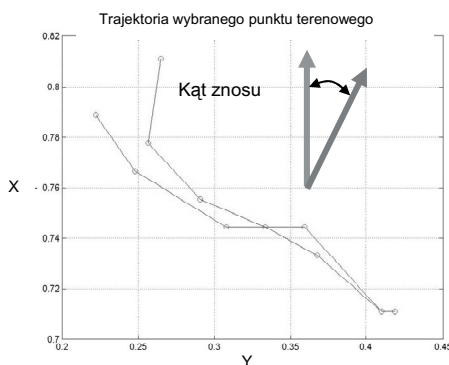
W ramach realizacji projektu mikroBSP, zostały przeprowadzone badania dotyczące: stabilności lotu platformy, oraz możliwości wykonywania opracowań fotogrametrycznych.

4.1. Stabilność lotu

Analiza sekwencji wideo $\Delta t = 0.2s$ z kamery 1 wykazała bardzo dużą podatność platformy na podmuchy mas powietrza, czego efektem były chwilowe zmiany orientacji katowej kamery rzędu nawet kilkunastu stopni na sekundę (widoczne rozmycie obrazu).



Rys.2. Kadr z sekwencji wideo podczas testowania stabilności lotu platformy
Fig.2. The frame from video sequence during flying platform stability evaluation.



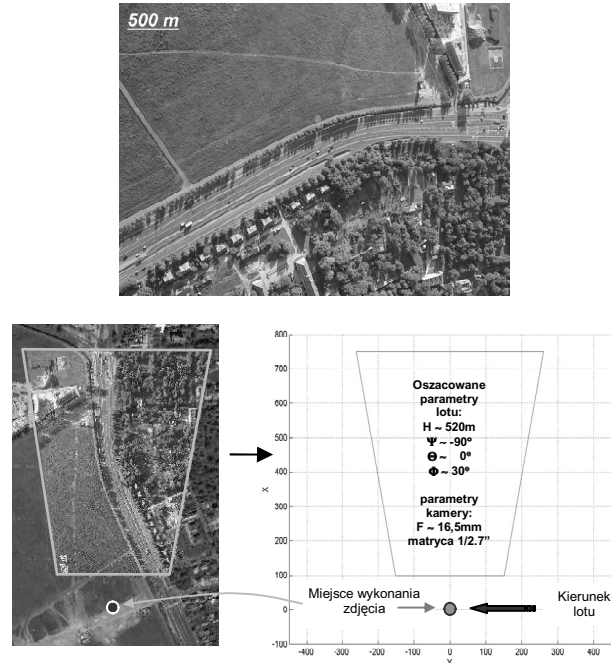
Rys. 3. Zmiany położenia punktu terenowego (w unormowanych współrzędnych zdjęcia) dla kolejnych 12 klatek sekwencji wideo
Fig. 3. Changes of localization of a ground point (normalized coordinates) for 12 frames of video sequence.

Tab. 3. Oszacowane zmiany parametrów katowych dla kolejnych kadrów
Tab. 3. Estimation changes of angular parameters for following frames

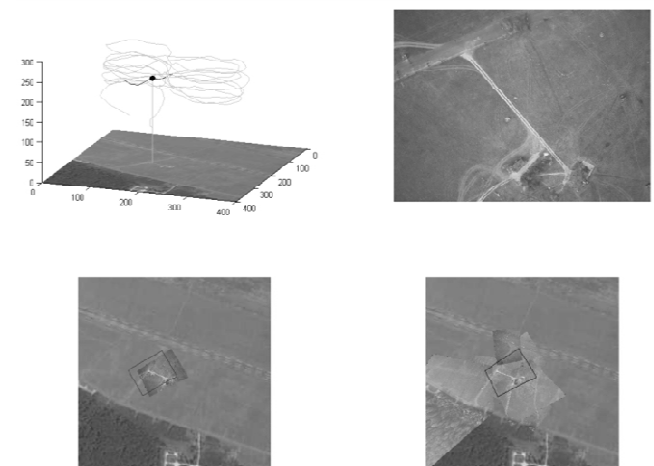
	2-1	3-2	4-3	5-4	6-5	7-6
$\theta[s]$	-3,07	12,30	15,39	12,30	15,39	3,07
$\Phi[s]$	9,00	6,00	3,00	3,00	6,00	0,00
	8-7	9-8	10-9	11-10	12-11	
$\theta[s]$	-3,07	-18,46	-18,46	-21,54	-9,23	
$\Phi[s]$	0,00	9,00	0,00	-6,00	-6,00	

4.2. Opracowanie fotogrametryczne

O potencjale informacyjnych lotniczych systemów rozpoznawczych decyduje możliwość wykonywania opracowań fotogrametrycznych. Przeprowadzone badania dla mikroBSP dotyczyły sprawdzenia możliwości kojarzenia zdjęć pozyskanych z platformy z innymi materiałami kartograficznymi (rys. 4), jak również możliwości tworzenia fotoszkieł dzięki procedurze mozaikowania (rys.5) W badaniach wykorzystano zdjęcia zarejestrowane kamerą typu MedRes.



Rys. 4. Kojarzenie zdjęcia z fotomapą
Fig. 4. Associating of picture with fotomap



Rys. 5. Tworzenie fotoszkieł
Fig. 5. Photodraft creating

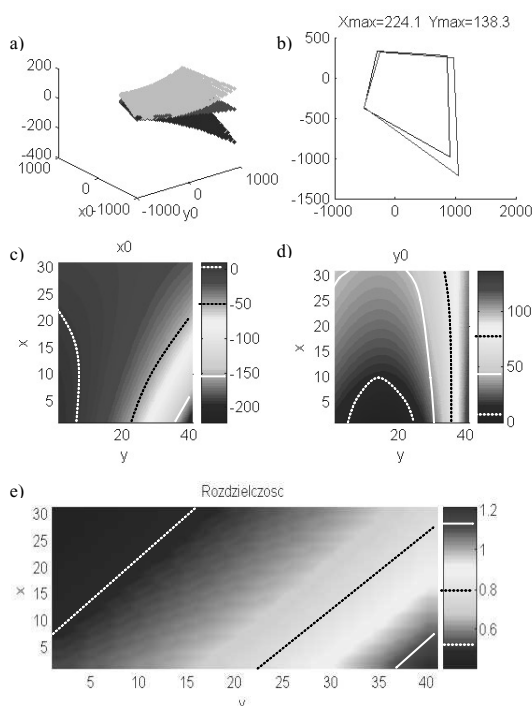
Uzyskane dane podczas lotów doświadczalnych potwierdziły, że zarejestrowane obrazy z platformy są w większości zdjęciami ukośnymi. Uzyskanie dobrych jakościowo opracowań fotogrametrycznych wymaga ścisłej integracji obrazów z elementami orientacji zewnętrznej w procesie przetwarzania danych. Przeprowadzone analizy obrazów wskazują na możliwość wykorzystania zdjęć z mikroBSP do aktualizacji informacji terenowej.

5. Własności opracowań obrazów z BSP

Zaawansowane systemy fotogrametryczne rejestrują (do celów kartometrycznych) zdjęcia prawie pionowe. Dodatkowo stosuje się szereg innych rozwiązań mających na celu poprawę dokładności opracowań np. kompensacja ruchu postępowego samolotu, stabilizacja kątowna kamery czy integracja danych GPS/INS. O dokładności np. oszacowań pozycji terenowych obiektów na podstawie zdjęć (sekwencji wideo) w głównej mierze decydują dwie grupy czynników: elementy orientacji wewnętrznej i zewnętrznej. Skoro proste systemy BSP (w tym również badany mikroBSP) nie dysponują zaawansowanymi w/w metodami korekcyjnymi, ważną rzeczą staje się możliwość uzupełnienia danych o wyznaczonej pozycji terenowej obiektu w dodatkową informację o ewentualnym rozkładzie błędów pozycjonowania.

Dla zastosowanych w projekcie modułów obrazowych nie były przeprowadzane pomiary kalibracyjne, gdyż konstrukcja tych urządzeń nie pozwalała na to. Realizacja algorytmów pomiarowych opartych na metodzie z rozdz. 3.3 wykorzystuje dane katalogowe modułów. Przeprowadzone analizy wskazują na to, że (dla typowych nalołów fotogrametrycznych mikroBSP: $H \sim 300 \div 500\text{m}$, $V \sim 50\text{--}70\text{ km/h}$) to parametry elementów orientacji zewnętrznej decydują o niedokładności całkowitej wyznaczenia pozycji terenowej. Ponadto istnieje duże prawdopodobieństwo wykonywania zdjęć „rozmytych” w sytuacjach szybkich przelotów na niewielkich wysokościach, ze względu na brak kontroli czasu otwarcia migawki w zastosowanych rejestratorach obrazu. Z kolei wraz ze wzrostem wysokości lotu H może ujawnić się wpływ parametrów orientacji wewnętrznej na całkowitą niedokładność pomiarową.

Orientacja głównej osi kamery (Ψ , Θ , Φ) i zmiany jej położenia w czasie wykonywanego nalotu decydują o parametrach rejestrowanych obrazów: „widziany” obszar terenu rys. 6b, rozkład rozdzielczości terenowej reprezentowany przez piksele zdjęcia rys 6e, możliwe rozkłady niedokładności całkowitej wyznaczonych pozycji terenowych rys. 6a (w kierunku X rys. 6c i kierunku Y rys. 6d) w poszczególnych fragmentach zdjęcia. Rys. 6 przedstawia w/w parametry dla przeprowadzonej symulacji (zdjęcie nachylone) z wybranymi wartościami elementów orientacji zewnętrznej i wewnętrznej: $F=4\text{mm}$, $X=0 \pm 5\text{m}$, $Y=0 \pm 5\text{m}$, $H=500 \pm 10\text{m}$, $\Psi=10 \pm 2^\circ$, $\Theta=10 \pm 2^\circ$, $\Phi=10 \pm 2^\circ$.



Rys. 6. Wpływ nachylenia zdjęcia na parametry obrazu.

Fig. 6. Influence of inclination of picture on parameters of images.

Wzrost odchylenia głównej osi optycznej kamer od nadiru (przypadek rejestracji zdjęcia pionowego) istotnie wpływa na pogorszenie dokładności wyznaczenia współrzędnych terenowych w obszarze zdjęcia rys.6cd. W przypadku wykonywania zdjęć nachylonych należy się liczyć z występowaniem zjawiska niejednorodności rozdzielczości terenowej w płaszczyźnie zdjęcia rys. 6e. Ze względu na istnienie bardzo dużego prawdopodobieństwa występowania silnych wahań bocznych podczas lotu, źródłem największych błędów przy wyznaczaniu pozycji terenowej (szczególnie w peryferyjnych częściach zdjęcia) są oszacowania kątów pochylenia i przechylenia. Dodatkowo istnieje konieczność ścisłej synchronizacji czasowej momentów wyznaczenia parametrów orientacji zewnętrznej z faktycznym momentem otwarcia migawki kamer.

6. Podsumowanie

Przeprowadzone analizy (potwierdzone wynikami eksperymentalnymi) w zakresie parametrów lotu oraz możliwości pomiarowych kamer wskazują na to, że spełnienie (założonego w projekcie mikroBSP) wymogu rejestracji obrazów z rozdzielczością 0.2m jest możliwe dla parametrów wyszczególnionych w tab. 4.

Tab. 4. Parametry rejestracji obrazów z rozdzielczością 0.2m

Tab. 4. The parameters of image registration with resolution 0.2 m

	Kamera 1	Kamera 2
Kątowe pole widzenia	70°/ F=4.2mm	80°/ f=5.5mm
Max wysokości lotu	85m	300m
Prędkości przelotowe	~ 90 km/h	
Szerokość terenowa	~ 100m	~ 400m
Pole powierzchni	~ 0.008 km ²	~ 0.128 km ²

Uzyskanie dobrych jakościowo zdjęć wymaga spełnienia szeregu kryteriów. Najważniejszym z nich jest nie przekraczanie dozwolonych prędkości lotu na określonych (tab. 4) wysokościach. Zastosowanie kamery o podwyższonej rozdzielczości (MedRes) umożliwia przeprowadzenie rejestracji obrazu z wyższych pułapów. Wykonywanie krótszych czasowo nalołów rozpoznawczych (spełniającej wymagania na rozdzielczość przestrzenną) nad zadanym terenem jest możliwe tylko dzięki zastosowaniu kamery „nr 2”. Dzięki zastosowaniu kamery typu CCTV (wymagającej akwizycji obrazów w nalołach rozpoznawczych na niższych pułapach), otrzymujemy mniejsze błędy w oszacowaniu pozycji terenowej obiektów występujących w całym obszarze zdjęcia.

Uzyskane wyniki z analiz teoretycznych jak i badań, wskazują na możliwość wykorzystania platformy mikroBSP (wyposażonej w moduły obrazujące) do zadań nie tylko obserwacyjnych ale również pomiarowych zarówno w obszarze militarnym jak i cywilnym.

7. Literatura

- [1] J. Brzezina, Z. Dańko: Bezpilotowe statki powietrzne i AGS jako nowe wyzwania i zagrożenia w powietrzu. Przegląd Sił Powietrznych, sierpień 2004, str. 30-34.
- [2] M. Wychowaniec: Nadzór terenów rozległych – nowe możliwości. Ochrona Mienia i Informacji nr 5, 2005, str. 24-25.
- [3] B. Głowacki, G. Sobczak: Mały i skuteczny HOB-bit. Nowa Technika Wojskowa nr 2, 2005, str. 38-40.
- [4] J. Adamczyk, K. Będkowski, "Metody cyfrowe w teledetekcji", Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2005.
- [5] Z. Kurczyński, R. Preuss, "Podstawy Fotogrametrii", Oficyna wydawnicza PW, Warszawa 2003.