

**BEZZAŁOGOWE APARATY LATAJĄCE UAV W FOTOGRAMETRII
I TELEDETEKCJI – STAN OBECNY I KIERUNKI ROZWOJU**

**UNMANNED AERIAL VEHICLES IN PHOTOGRAMMETRY
AND REMOTE SENSING – STATE OF THE ART AND TRENDS**

Piotr Sawicki

Katedra Fotogrametrii i Teledetekcji, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

SŁOWA KLUCZOWE: bezzałogowy aparat latający, sensor optyczny, LiDAR, nawigacja, NMT, ortofotomapa, model 3D

STRESZCZENIE: W ostatnich kilku latach nowym, interdyscyplinarnym obszarem nauki i badań jest konstrukcja oraz praktyczne zastosowanie w geomatyce bezzałogowych aparatów latających UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*). Bezzałogowce umożliwiają wykonanie kampanii fotolotniczych niskiego pułapu dla niewielkich obszarów i szybkie, wieloczasowe pozyskanie wysokorozdzielczych danych obrazowych w różnych zakresach spektralnych oraz potencjalnie danych z UAV-skaningu laserowego (*UAV-borne Laser Scanning*). Nowa technika akwizycji danych i możliwy szeroki zakres aplikacji aparatów latających UAV w pozyskiwaniu geoinformacji znalazły swoje odzwierciedlenie w problematyce badawczej międzykomisyjnej grupy roboczej ICWG I/V *Unmanned Vehicle Systems (UVS) for Mapping and Monitoring Applications* Międzynarodowego Towarzystwa Fotogrametrii i Teledetekcji (ISPRS). W pracy przedstawiono syntetyczne omówienie: budowy aparatów latających UAV na przykładzie typowych konstrukcji, analizę sensorów instalowanych na ich platformach, technologie fotogrametryczne i teledetekcyjne oraz rodzaje aplikacji w geomatyce, które wykorzystują pozyskane optyczne dane multisensoralne i dane LiDAR, techniczne aspekty zastosowania UAV, aktualne problemy badawcze i tendencje rozwoju systemów bezzałogowych UVS (*Unmanned Vehicle Systems*).

1. WPROWADZENIE

We współczesnej terminologii konstrukcja latająca, która wykonuje lot bez pilota na pokładzie, nie ma możliwości zabierania pasażerów oraz umożliwia wielokrotne użycie nazywana jest bezzałogowym aparatem latającym (statkiem powietrznym) UAV (*Unmanned/Unpiloted Aerial Vehicle*), bezzałogowcem lub dronem. Nazwą bezzałogowy system latający UAS (*Unmanned Aerial System*) określa się kompletny system, na który składa się właściwy aparat latający oraz moduły sterowania, stacja naziemna itd. PojęciemUCAV (*Unmanned Combat Aerial Vehicle*) określa się militarne bezzałogowce bojowe, np. Predator, Boeing X-45 z USA.

Bezzałogowe statki latające wykorzystywane są współcześnie przez siły powietrzne wielu armii świata do obserwacji, rozpoznania i akcji bojowych. Dzięki zastosowaniu zaawansowanych technologii elektronicznych i informatycznych, wyposażeniu w głowice optoelektroniczne służące do obserwacji i detekcji, instalacji na pokładzie środków

bojowych, możliwa jest realizacja skomplikowanych autonomicznych misji militarnych. Aparaty UAV posiadają również olbrzymi potencjał zastosowań w sferze cywilnej, w różnych dziedzinach nauki, techniki i gospodarki.

2. BUDOWA I KLASYFIKACJA APARATÓW UAV

System bezzałogowego aparatu latającego UAV, niezależnie od typu, składa się z pięciu podstawowych elementów:

- właściwa platforma nośna bezzałogowca, wyposażona w różne sensory pozyskiwania danych lub systemy broni,
- system kontroli lotu *Flight Control System*, na który może się składać: system inercyjny INS (IMU) (*Inertial Navigation System/Inertial Measurement Unit*), system GNSS (GPS), magnetometr, barometr, altimetr, odometr,
- system awioniki do zdalnego lub autonomicznego sterowania lotem, który umożliwia połączenie nadajnika z odbiornikiem drogą radiową, za pomocą lasera lub przy zastosowaniu systemu satelitarnego,
- system transmisji danych zarejestrowanych sensorami umieszczonymi na platformie,
- naziemna stacja kontrolna, umożliwiająca projektowanie trasy lotu i zdalne kierowanie aparatu latającego UAV.

Aparat latający UAV, który jest zdalnie sterowany i pilotowany drogą radiową przez operatora znajdującego się na ziemi nazywany jest aparatem typu RPV (*Remotely Piloted Vehicle*). Niektóre ze statków są wyposażone w funkcje autopilota, który przejmuje kontrolę nad lotem, z wyłączeniem fazy startu i lądowania. Nowoczesne bezzałogowce mogą wykonywać lot autonomicznie, dzięki systemowi programów do projektowania i realizacji toru lotu, z zaprogramowanym manewrem startu, kontroli lotu i lądowania, które są zaimplementowane na komputerach pokładowych. W takim przypadku lot musi odbywać się w całkowicie kontrolowanej przestrzeni powietrznej.

Bezzałogowe statki latające UAV, charakteryzuje duża różnorodność typów i konstrukcji (Eisenbeiss, 2009; UAS, 2011). Klasyfikację aparatów UAV można wykonać uwzględniając różne kryteria, m.in.: rodzaj napędu, wysokość, zasięg, czas lotu, ciężar własny, ładowność, przeznaczenie, koszt budowy.

Największe, potencjalne znaczenie w geomatyce ma 5 kategorii UAV, również ze względu na liczbę opracowanych konstrukcji (poniżej podano liczbę opracowanych konstrukcji, odpowiednio: w świecie/w Europie), które wyróżniają i charakteryzują 3 podstawowe parametry użytkowe: zasięg – Z, wysokość – W, czas lotu – T (UAS, 2011):

- HALE (*High Altitude Long Endurance*) – UAV wykonujące długi lot na dużej wysokości ($n = 48/5$, $Z > 2\ 000$ km, $W \leq 20$ km, $T = 24\div 48$ godz.),
- SR (*Short Range*) – UAV wykonujące lot krótkiego zasięgu ($n = 167/29$, $Z = 30\div 70$ km, $W \leq 3$ km, $T = 3\div 6$ godz.),
- CR (*Close Range*) – UAV wykonujące lot bliskiego zasięgu ($n = 200/45$, $Z = 10\div 30$ km, $W \leq 3$ km, $T = 2\div 4$ godz.),
- Mini UAV (*Mini Unmanned Aerial Vehicle*) – mini bezzałogowe aparaty latające ($n = 432/201$, $Z < 10$ km, $W < 1000$ m, $T < 2$ godz.),
- Micro UAV (*Micro Unmanned Aerial Vehicle*) – mikro bezzałogowe aparaty latające ($n = 157/51$, $Z \leq 10$ km, $W \leq 250$ m, $T \leq 1$ godz.).

3. KONSTRUKCJE UAV DO POZYSKIWANIA GEOINFORMACJI

Do pozyskiwania geoinformacji wykorzystywane są różne kategorie oraz konstrukcje aparatów UAV. Przykładem jest europejska platforma Mercator 1, przeznaczona do lotów w dolnej warstwie stratosfery, oraz 2 modele seryjnie produkowanych bezzałogowców, które w kategorii Mini UAV reprezentują konstrukcje typu pławiec i śmigłowiec.

3.1. HALE UAV – Mercator 1

W ramach europejskiego programu Pegasus (Everaerts, Lewycky, 2011; Pegasus, 2011), który jest powiązany z głównymi celami europejskich programów GMES oraz INSPIRE, została zbudowana w belgijskim instytucie badawczym VITO (*Flemish Institute for Technological Research*) stratosferyczna platforma kategorii HALE UAV – Mercator 1 (Rys. 1). Mercator 1 wyposażony jest w napęd elektryczny, zasilany ogniwami solarnymi, posiada rozpiętość skrzydeł 18 m, ciężar 32 kg, umożliwia lot na wysokości 15÷18 km i czas lotu rzędu kilku godzin. Stratosferyczny UAV Mercator 1 wyposażony został w 4 nowoczesne fotogrametryczne i teledetekcyjne sensory (tab. 1), stanowiąc alternatywę dla lotniczej wysokiego pułapu i satelitarnej rejestracji fotogrametrycznej oraz teledetekcyjnej.



Rys. 1. HALE UAV – Mercator

Tab. 1. Sensory i parametry platformy HALE UAV – Mercator 1
(dane obliczono dla wysokości lotu $W = 18$ km)

Sensor	Podstawowe parametry techniczne
MEDUSA: Multispectral Digital Camera	Sensor: CMOS 24MP Zakres spektralny: 400÷ 650 nm (RGB) Rozdzielczość terenowa: 30 cm Szerokość rejestracji: 3 000 m ($\geq 10\ 000$ pikseli) Czas pracy: 8 godz.
LiDAR	Częstotliwość PRF: 15 kHz Gęstość punktów: 1 punkt / 2÷4 m ² Szerokość skanowania: 2 400 m Dokładność (<i>postprocessing</i>): $S_{XY} = 30$ cm, $S_z < 15$ cm
Cyfrowa kamera termalna	Sensor: linijka 800 lub 1 600 pikseli Szerokość obrazowanego pasa: 2 400 m Rozdzielczość terenowa: 1.13÷2.25 m Rozdzielczość spektralna: 3÷5 μ m, 8÷12 μ m
Radar bocznego wybierania z anteną syntetyzowaną (SAR)	Częstotliwość PRF: 3kHz Rozdzielczość terenowa: 2.5 m Szerokość obrazowanego pasa: 4.5 km Długość fali: pasmo X

3.2. MINI UAV – DraganFly Tango i Microdrones md4-1000

Mini UAV o nazwie DraganFly Tango (Rys. 2) produkcji kanadyjskiej firmy Draganfly Innovations Inc. (Draganfly, 2011) jest płatowcem o podwójnych skrzydłach z napędem elektrycznym, który uruchamiany jest systemem katapultowym. Mini UAV quadrokopter md4-1000 (Rys. 3) niemieckiej firmy Microdrones GmbH (Microdrones, 2011) jest bezzałogowym, autonomicznym czterowirnikowym śmigłowcem o napędzie elektrycznym typu VTOL AUMAV (*Vertical Take Off and Landing Autonomous Unmanned Mini Aerial Vehicle*). Podstawowe parametry techniczne płatowca DraganFly Tango i śmigłowca md4-1000 przedstawia tabela 2.



Rys. 2. Płatowiec DraganFly Tango



Rys. 3. Mini śmigłowiec md4-1000

Tab. 2. Parametry techniczne aparatów Mini UAV – DraganFly Tango oraz md4-1000

Parametry techniczne	DraganFly Tango	md4-1000
Rozpiętość skrzydeł/śmigieł	1 500 mm	1 030 mm
Długość	1 200 mm	550 mm
Ciężar	2 800 g	2 650 g
Udźwig	1 140 g	1 200 g
Zasięg lotu	≤ 1 000 m	≥ 1 000 m
Max. pułap lotu	640 m	1 000 m
Czas lotu	50 min.	70 min.
Prędkość	50÷60 km/h	54 km/h
Kamera cyfrowa	10 MP	Olympus E-P2 12.3 MP
Kamera termalna	FLIR Tau 320 (324 × 256)	FLIR Tau 320 (324 × 256)
Kamera zmierzchowa wideo	1080 linii	WATEC 570 linii; 0.0003lux
Odbiorcza stacja bazowa	Tak	BS-01-001
Oprogramowanie sterujące	Tak	GPS- Waypoint Navigator

4. ZASTOSOWANIE APARATÓW LATAJĄCYCH UAV W GEOMATYCE

Platformy bezzałogowe kategorii Micro UAV i Mini UAV są obecnie najczęściej stosowane do pozyskiwania obrazów i danych fotogrametrycznych oraz teledetekcyjnych. Na ich podstawie można zrealizować następujące technologie:

- aerofotografia niskiego pułapu,
- cyfrowa aerotriangulacja (*Automatic Aerial Tringulation*) (Haala *et al.*, 2011),

- łączna triangulacja sieci cyfrowych zdjęć naziemnych i lotniczych niskiego pułapu,
- DTM (DEM)/DSM (Haala *et al.*, 2011; Sauerbier *et al.*, 2011; Thamm, 2011) (Rys. 4),
- generowanie ortomozaik cyfrowych,
- generowanie ortofotomap cyfrowych (Cropcam, 2011) (Rys. 5),
- fotogrametryczne pozyskiwanie danych 3D (*3D Photogrammetric Data Collection*),
- opracowanie tematycznych map wektorowych,
- opracowanie tematycznych map hybrydowych,
- pomiary termowizyjne,
- fotointerpretacja CAPI (*Computer Assisted PhotoInterpretation*),
- cyfrowa klasyfikacja obrazów,
- modele 3D obiektów (Eisenbeiss, 2008), miast i terenów zurbanizowanych.

Wykorzystując potencjał pomiarowy sensorów instalowanych na platformach UAV, wykonuje się eksperymentalnie (Eisenbeiss, 2009) lub produkcyjnie, następujące rodzaje aplikacji, związanych z geomatyką:

- pomiary katastralne,
- badania termowizyjne,
- badanie kształtu, deformacji i przemieszczeń obiektów inżynierskich,
- wyznaczenie objętości wyrobisk górniczych, składowisk surowców i mas ziemnych,
- inwentaryzacja i monitoring obiektów liniowej infrastruktury technicznej oraz obiektów przemysłowych
- inwentaryzacja i monitoring obszarów zurbanizowanych,
- inwentaryzacja morskich brzegów klifowych,
- rejestracja i inwentaryzacja obiektów archeologicznych (Sauerbier, Eisenbeiss, 2010),
- inwentaryzacja i dokumentacja architektoniczna obiektów zabytkowych i dóbr dziedzictwa kultury,
- modelowanie 3D pojedynczych obiektów oraz terenów zurbanizowanych,
- monitoring upraw i pokrycia terenu roślinnością (*land cover*) oraz użytkowania terenu (*land use*),
- rejestracja i monitoring obszarów leśnych (Zmarz, 2011) oraz chronionych obszarów przyrodniczych.



Rys. 4. DEM i ortofotomapa wygenerowane na podstawie zobrażeń UAV (56 zdjęć, rozdzielczość 4K × 3K) (Haala *et al.*, 2011)



Rys. 5. Ortofotomapa cyfrowa (obszar o pow. 259 ha, 48. zdjęć, Z=640 m) z georeferencjami (Cropcam, 2011)

Rejestracja geoinformacji z platform UAV znajduje współcześnie również zastosowanie w pracy wielu rodzajów służb związanych z funkcjonowaniem państwa oraz aktywnością w różnych aspektach działalności gospodarczej:

- rejestracja wypadków komunikacyjnych, katastrof i terenów objętych pożarem lub innym zagrożeniem,
- monitorowanie granicy państwa, obiektów użyteczności publicznej, imprez masowych na wolnym powietrzu,
- monitoring tras komunikacyjnych, natężenia ruchu pojazdów, ochrona konwojów,
- rejestracja nieruchomości w celu pozyskania danych obrazowych do wyceny,
- reklama internetowa obiektów 3D i miast.

Zastosowanie bezzałogowych aparatów latających UAV do rejestracji obiektów naziemnych jest korzystne z wielu względów technicznych i ekonomicznych, z których najważniejsze są:

- szybki czas pozyskania geoinformacji obrazowej,
- możliwość wykonania zdjęć fotogrametrycznych i teledetekcyjnych dla niewielkich obszarów, obszarów trudnodostępnych i niebezpiecznych,
- względna niezależność od lotniczych warunków pogodowych (Szczechowski, 2008),
- wysoka rozdzielczość terenowa danych obrazowych (poniżej 15 cm) oraz wysoka dokładność bezwzględna i względna pozycjonowania obiektów,
- wspomaganie cyfrowego przetwarzania obrazów lotniczych i satelitarnych,
- możliwość wykonania wielokrotnej i powtarzalnej w czasie rejestracji,
- niskie koszty zakupu i eksploatacji aparatu UAV oraz rejestracji zdjęć,
- brak konieczności posiadania lotniska z infrastrukturą techniczną,
- przyjazność dla środowiska.

5. KIERUNKI BADAŃ I ROZWOJU SYSTEMÓW UVS

Znaczenie i szeroki zakres zastosowań aparatów latających UAV w pozyskiwaniu geoinformacji obrazowej znalazł swoje odzwierciedlenie w problematyce badawczej międzykomisyjnej grupy roboczej ICWG I/V Międzynarodowego Towarzystwa Fotogrametrii i Teledetekcji (ISPRS), która w kadencji 2008–2012 działa pod nazwą: *Unmanned Vehicle Systems (UVS) for Mapping and Monitoring Applications*.

Zakres aktywności grupy roboczej ICWG I/V koncentruje się obecnie na następujących, podstawowych zadaniach (ISPRS, 2011):

- nawigacja oraz pozycjonowanie i orientacja systemów UVS,
- platformy UVS, ich wyposażenie i sensory do zastosowań w fotogrametrii i teledetekcji, ze szczególnym uwzględnieniem niskobudżetowych rozwiązań,
- UVS jako narzędzie dla rozwoju prototypowych sensorów teledetekcyjnych,
- UVS jako narzędzie do rozwijania nauki/edukacji, wykorzystującej metody fotogrametrii i teledetekcji,
- dokumentacja, porównanie i walidacja systemów UVS stosowanych w fotogrametrii i teledetekcji (parametry, właściwości, jakość danych, zastosowanie, koszty),
- współpraca z Komisją Techniczną III i VIII ISPRS oraz EuroSDR (*European Spatial Data Research Network*).

Lektura recenzowanych artykułów opublikowanych w 2010 r. w Archiwum ISPRS., po sympozjach Komisji Technicznej I (Vol. XXXVIII, Part 1, ICWG I/V) i V (Vol. XXXVIII, Part 5, Com. V), oraz w 2011 r., po konferencji naukowej (14–16.09.2011 r., ETH Zürich, Szwajcaria) pt. „*Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics*” (Vol. XXXVIII-1/C22), pozwala zdefiniować wiele nowych tematów i zadań w obszarze badań dotyczących UAV. Zakres prac rozwojowych i badawczych obejmuje, lub powinien w najbliższym czasie orientować się na następujące szczegółowe tematy:

- konstrukcja nowych platform UAV, w tym typu *low cost* (Clark *et al.*, 2010),
- konstrukcja UAS *on-line* oraz *real-time*, *near (quasi) real-time* (Rieke *et al.*, 2011),
- konstrukcja nowatorskich systemów UAS (Coppa *et al.*, 2010; Nackaerts, 2010),
- techniki projektowania misji fotogrametrycznych niskiego pułapu (*waypoint*),
- rozwój autonomicznych *on-board* systemów do zarządzania lotami,
- planowanie i realizacja autonomicznych lotów UAV (Scholtz *et al.*, 2011),
- procedury kalibracji sensorów optycznych (Sauerbier *et al.*, 2011),
- zastosowanie na platformie UAV różnych sensorów (Witayangkum *et al.*, 2011),
- zastosowanie na platformie UAV kamer multispektralnych i hiperspektralnych,
- integracja sensorów na platformie UAV,
- automatyzacja procesu orientacji sensorów (Barazzetti *et al.*, 2010),
- georeferencja wprost zdjęć lotniczych niskiego pułapu (Tsai *et al.*, 2010),
- integracja danych z UAV z danymi z pomiarów naziemnych,
- łączenie danych pozyskanych z obrazów wideo, RGB, wielospektralnych, IR, NIR, CIR, termalnych i skaningu laserowego,
- przesyłanie *on-line* danych cyfrowych i metody ich kompresji,
- automatyzacja procesu opracowania zdjęć, przetwarzania chmury punktów, generowania DEM/DSM (Küng *et al.*, 2011; Rosnell *et al.*, 2011) oraz generowania modeli 3D z georeferencją (Bulatov *et al.*, 2011),
- opracowanie map 2D i 3D (*3D Mapping*) oraz systemów GIS zasilanych danymi pozyskanymi z platform UVS,
- aplikacje UAV w pomiarach katastralnych,
- poszukiwanie nowych obszarów aplikacji UAV,
- przepisy cywilno-prawne dotyczące zastosowania aparatów UAV,
- zastosowanie oprogramowania typu GNU GPL (*GNU General Public License*) do przetwarzania danych obrazowych (Neitzel, Klonowski, 2011).

Analiza wyników najnowszych badań i aplikacji, dotyczących konstrukcji, nawigacji i zastosowania bezzałogowych aparatów latających UAV w geomatyce, pozwala wyróżnić najbardziej wartościowe osiągnięcia oraz sformułować następujące wnioski.

W procesie akwizycji danych fotogrametrycznych z platform UAV oraz w algorytmie przetwarzania i ekstrakcji informacji 3D nie występują obecnie zasadnicze różnice w stosunku do technologii fotogrametrycznych stosowanych we współczesnych opracowaniach cyfrowych na podstawie zdjęć lotniczych.

Różnice w projektowaniu i realizacji autonomicznego lotu fotogrametrycznego niskiego pułapu, np. dla obiektów powierzchniowych, liniowych lub dla elewacji pionowych długich obiektów naziemnych, wynikają z konstrukcji i sposobu działania aparatów UAV.

Aktywność wielu grup badawczych skupiona jest na problemie autonomicznego lotu, nawigacji i wyznaczania georeferencji wprost aparatu UAV. Do nawigacji mulisensoralnej

(altimetr barometryczny, magnetometr, system INS, odbiornik GNSS, kamera termalna IR) platformy helikoptera UAV wykorzystuje się dane z serwisu EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) (Molina *et al.*, 2011). Konstruuje się nowe, zminiaturyzowane systemy autopilota typu MINC (*Miniature Integrated Navigation and Control*) (Scholtz *et al.*, 2011).

Innowacyjnym rozwiązaniem jest wykonanie automatycznych i autonomicznych lotów fotogrametrycznych UAV, opartych na zsynchronizowanej z sygnałem GPS, detekcji i akwizycji w czasie rzeczywistym danych pola magnetycznego, (Eck, Imbach, 2011).

Do nawigacji UAV helikoptera zastosowano algorytm z zaimplementowanym filtrem Kalmana (estymuje błędy systemu INS) i filtrem PMF (*Point Mass Filter*) (łączy pomiary wizyjnego odometru z obrazami) do estymacji georeferencji w czasie rzeczywistym, wspomaganej zobrazowaniami (Conte, Doherty, 2011). Istotna ze względu na realizację lotu i dokładność opracowań fotogrametrycznych nawigacja i georeferencja wprost zdjęć lotniczych niskiego pułapu wspomagana jest rozszerzonym filtrem Kalmana (*Extended Kalman Filter*) (Haala *et al.*, 2011), zawansowanymi metodami SLAM (*Simultaneous Localisation and Mapping*) (Nuechter *et al.*, 2007) oraz algorytmem kompensacji kąta znosu (Steffen, Förstner, 2008).

Zakres aplikacji aparatów UAV zostanie w niedalekiej przyszłości znacznie rozszerzony dzięki zastosowaniu nowych konstrukcji lekkich i zminiaturyzowanych kamer wielospektralnych i hiperspektralnych (Nackaerts *et al.*, 2010; Scholtz *et al.*, 2011).

Weryfikację trajektorii lotu, określanej standardowo za pomocą systemu GPS z dokładnością 3÷5 m, przeprowadzono dla mikro oktokoopera Falcon 8 AscTech przez określenie georeferencji wprost przy użyciu sprzętu Leica SmartStation i mini przyrządu 360°, umieszczonego na pokładzie koptera, uzyskując średnią różnicę pozycjonowania ok. 0.8 m (Blaha *et al.*, 2011).

Teoretyczna analiza propagacji błędów nawigacji wykazała, że na podstawie zdjęć zarejestrowanych z pokładu aparatu bezzałogowego kategorii Micro UAV oraz przy zastosowaniu komercyjnego *hardware* jest możliwe wyznaczenie w czasie rzeczywistym położenia wielopunktowych celów naziemnych z dokładnością położenia sytuacyjnego $m_{XY} < 5$ cm (Akhtman *et al.*, 2011).

W pełni zautomatyzowaną *off-line* rekonstrukcję powierzchni 3D budynku (Wefelscheid *et al.*, 2011) uzyskano na podstawie przetwarzania gęstej chmury punktów, pozyskanej ze zdjęć wykonanych z pokładu oktokoopera Falcon 8. W pierwszej fazie opracowania wykorzystano kombinację algorytmu SIFT (*Scale-Invariant Feature Transform*) oraz Förstner operatora, które posłużyły do definiowania punktów zainteresowania na każdym obrazie, poprzez detekcję cechy i dopasowanie (*matching*). Zamknięcie węzłów uzyskano metodą VDA (*Variance Descriptor Analysis*).

Jeden z pierwszych eksperymentów związany z zastosowaniem UAV w pomiarach katastralnych przeprowadzono w Szwajcarii na ETH Zürich, wykonując z pokładu oktokoopera Falcon 8 zdjęcia skalibrowanym aparatem fotograficznym Panasonic Lumix DMC-LX3 (rozdzielczość 3.65K × 2.75K) z wysokości powyżej 40 m (rozdzielczość terenowa 1.5 cm). Średnia dokładność wyznaczenia współrzędnych sygnalizowanych punktów katastralnych wyniosła: $m_{XY} = \pm 2$ cm, $m_Z \leq \pm 5$ cm (Manyoky *et al.*, 2011), co przewyższa wymaganą w katastrze szwajcarskim dokładność położenia sytuacyjnego punktów granicznych działek (dla obszaru zabudowanego, strefa TS2 – 3.5 cm i obszaru intensywnie użytkowanego rolniczo, strefa TS3 – 7 cm).

6. PODSUMOWANIE

W ostatnich kilku latach nowym, interdyscyplinarnym obszarem nauki i badań, łączącym fotogrametrię, inżynierię lotniczą, nawigację, automatykę i robotykę, maszynowe widzenie, jest konstrukcja i praktyczne zastosowanie w geomatyce bezzałogowych aparatów latających UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*).

Wśród 11. podstawowych kategorii konstrukcyjnych statków UAV, klasyfikowanych wspólnie przez Międzynarodową Wspólnotę UAS (*International Unmanned Aircraft Systems Community*), najliczniej reprezentowana jest (432 konstrukcji na świecie, 201 w Europie) kategoria Mini UAV (*Mini Unmanned Aerial Vehicle*) (UAS, 2011).

Bezzałogowe aparaty latające UAV, które zostały ostatnio opracowane w Polsce (6 statków bezzałogowych, w tym 1 należy do kategorii Micro UAV, 5 konstrukcji należy do kategorii Mini UAV), są konstrukcjami prototypowymi zbudowanymi w pojedynczych egzemplarzach, które nie wkroczyły w etap seryjnej produkcji, a tym bardziej sprzedaży.

Największe możliwości powszechnego zastosowania w geomatyce stwarzają konstrukcje śmigłowców i płatowców, które można zaliczyć do grupy Mini UAV (*Mini Unmanned Aerial Vehicle*). Wynika to ze stosunkowo niskich kosztów budowy platformy, przeważnie wykonywanej z włókien węglowych lub kompozytów oraz względnie niskich cen zakupu wyposażenia pokładowego, na które składa się system sterowania, nawigacji i rejestracji danych. Oprócz kosztów decydujące są parametry techniczne statku bezpilotowego (wysokość lotu, zasięg, czas lotu, udźwig, mały ciężar własny i wymiary zewnętrzne), łatwość transportu, automatyczne i autonomiczne sterowanie i nawigacja oraz potencjalna aplikacyjność.

Bezzałogowe aparaty latające UAV, w przeciwieństwie do planowanych kampanii fotolotniczych, umożliwiają dla stosunkowo niewielkich obszarów, m.in. szybkie, stosunkowo tanie pozyskanie wysokorozdzielczych, wieloczasowych (*multitemporary*), zdjęć o dowolnej orientacji: celowanych, pionowych, nachylonych, ukośnych oraz opcjonalnie danych z UAV-skaningu laserowego (*UAV-borne Laser Scanning*). Możliwa jest rejestracja optyczna w zakresie widzialnym i w podczerwieni termalnej oraz pozyskanie obrazowań wielospektralnych, superspektralnych lub hiperspektralnych.

Aktualna problematyka badawcza, która związana jest z rozwojem bezzałogowych aparatów latających UAV, dotyczy przede wszystkim budowy nowych konstrukcji, projektowania i realizacji autonomicznych lotów niskiego pułapu, wyznaczania georeferencji wprost, integracji wielu sensorów na platformie UAV oraz automatyzacji akwizycji danych.

Praktyczne wykorzystanie w geomatyce multisensoralnych danych cyfrowych, pozyskanych technologią UAV, związane jest obecnie z zastosowaniem automatyzacji procesu przetwarzania danych, użyciem zaawansowanych metod fotogrametrycznych i teledetekcyjnych opracowania zdjęć, budową DEM/DSM, tworzeniem ortofotomap, generowaniem modeli 3D i wykonaniem map 3D (*3D Mapping*).

7. LITERATURA

Akhtman Y., Garg A., Skaloud J., 2011. MAV-based real-time localization of terrestrial targets with cm-level accuracy: feasibility study. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII-1/C22.

- Barazzetti L., Remondino F., Scaioni M., Brumana R., 2010. Fully automatic UAV image – based sensor orientation. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII, Part 1, ICWG I/V.
- Blaha M., Eisenbeiss H., Grimm D., Limpach P., 2011. Direct georeferencing of UAVS. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII-1/C22.
- Bulatov D., Solbrig P., Gross H., Wernerus P., Repasi E., Heipke C., 2011. Context-based urban terrain reconstruction from UAV-videos for geoinformation applications. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII-1/C22.
- Clark A. F., Woods J. C., Oechsle O., 2010. A low-cost airborne platform for ecological monitoring. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII, Part 5, Com. V.
- Conte G., Doherty P., 2011. A visual navigation system for UAS based on geo-referenced imagery. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII-1/C22.
- Coppa U., Guarnieri A., Camarda M., Vettore A., 2010. Development of Unmanned Aerial Vehicle at Padova University. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII, Part 5, Com. V.
- Cropcam, 2011. www.cropcam.com
- Draganfly, 2011. www.draganfly.com
- Eck C., Imbach B., 2011. Aerial magnetic sensing with an UAV helicopter. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII-1/C22.
- Eisenbeiss H., 2009. UAV Photogrammetry. Diss., ETH Zürich, *IGP Mitteilungen*, Nr. 105.
- Eisenbeiss H., Sauerbier M., Püschel H., 2008. Kombinierte Auswertung von terrestrischen und UAV-Bildern für die 3D-Modellierung des Schlosses Landenberg. *Photogrammetrie/Fernerkundung, Geomatik Schweiz*, Nr. 9, s. 470–473.
- Everaerts J., Lewycky N., 2011. Obtaining a permit-to-fly for a HALE-UAV in Belgium. ISPRS, 2011. www.isprs.org
- Haala N., Cramer M., Weimer F., Trittler M., 2011. Performance test on UAV-based photogrammetric data collection. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII-1/C22.
- Küng O., Strecha C., Beyeler A., Zufferey J.-C., Floreano D., Fua P., Gervais F., 2011. The accuracy of automatic photogrammetric techniques on ultra-light UAV imagery. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII-1/C22.
- Manyoky M., Theiler P., Steudler D., Eisenbeiss H., 2011. Unmanned Aerial Vehicle in cadastral applications. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII-1/C22.
- Microdrones, 2011. www.microdrones.com
- Molina P., Colomina I., Vitoria T., Silva P. F., Stebler Y., Skaloud J., Kornus W., Prades R., 2011. EGNOS-based multi-sensor accurate and reliable navigation in Search-And-Rescue missions with UAVS. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII-1/C22.
- Nackaerts K., Delauré B., Everaerts J., Michiels B., Holmlund C., Mäkynen J., Saari H., 2010. Evaluation of a lightweight UAS-prototype for hyperspectral imaging. *International*

- Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII, Part 1, ICWG I/V.
- Neitzel F., Klonowski J., 2011. Mobile 3D mapping with a low-cost UAV system. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII-1/C22.
- Nuechter, A., Lingemann, K., Hertzberg, J., Surmann, H., 2007. 6D SLAM for 3D mapping outdoor environments. *Journal of Field Robotics (JFR), Special Issue on Quantitative Performance Evaluation of Robotic and Intelligent Systems*, Vol. 24 (8-9), s. 699–722.
- Pegasus, 2011. www.pegasus4europe.com.
- Rieke M., Förster T., Geipel J., Prinz T., 2011. High-precision positioning and real-time data processing of UAV-systems. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII-1/C22.
- Rosnell T., Honkavaara E., Nurminen K., 2011. On geometric processing of multi-temporal image data collected by light UAV Systems. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII-1/C22.
- Sauerbier M., Eisenbeiss H., 2010. UAVs for the documentation of archaeological excavations. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII, Part 5, Com. V.
- Sauerbier M., Siegrist E., Eisenbeiss H., Demir N., 2011. The practical application of UAV-based photogrammetry under economic aspects. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII-1/C22.
- Scholtz A., Kaschwich C., Krüger A., Kufieta K., Schnetter P., Wilkens C. S., Krüger T., Vörsmann P., 2011. Development of a new multi-purpose UAS for scientific application. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII-1/C22.
- Steffen, R., Förstner, W., 2008. On visual real time mapping for unmanned aerial vehicles. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information*, Vol. XXXVII Part 3a, s. 57–62.
- Szczechowski B., 2008. Wykorzystanie bezzałogowych aparatów latających (mini śmigłowców) do wykonywania fotogrametrycznych zdjęć lotniczych z niskich pułapów. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 18b, s. 569–579.
- Thamm H.P., 2011. SUSI62 a robust and safe parachute UAV with long flight time and good payload. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII-1/C22.
- Tsai L. M., Chiang K. W., Huang W. Y., Lin Y. S., Tsai J. S., Lo C. F., Lin Y. S., Wu C. H., 2010. The development of a direct georeferencing ready UAV based photogrammetry platform. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII, Part 1, ICWG I/V.
- UAS, 2011. Unmanned Aircraft Systems. The Global Perspective 2011/2012, 9th Edition. *International UAS Community*.
- Witayangkurn A., Nagai M., Honda K., Dailey M., Shibasaki R., 2011. Real-time monitoring system using Unmanned Aerial Vehicle integrated with sensor observation service. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII-1/C22.
- Wefelscheid C., Hänsch R., Hellwich O., 2011. Three-dimensional building reconstruction using images obtained by Unmanned Aerial Vehicles. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII-1/C22.

Zmarz A., 2011. Zastosowanie bezzałogowych statków latających do pozyskania danych obrazowych o lesie. *Katedra Urządzania Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa, SGGW w Warszawie* (praca doktorska).

**UNMANNED AERIAL VEHICLES IN PHOTOGRAMMETRY
AND REMOTE SENSING – STATE OF THE ART AND TRENDS**

KEY WORDS: unmanned aerial vehicle, optical sensor, LiDAR, navigation, DTM, orthophotomap, 3D model

SUMMARY: Designing and practical application of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in geomatics is a new interdisciplinary field of science and research, which arose in last years. UAVs enable execution of small areas low altitude photo shoots as well as fast obtaining of multitemporary high resolution image data in various spectral range. Potentially UAV-borne Laser Scanning is also possible. New techniques of data acquisition and wide range of possible applications of UAVs in obtaining geoinformation are the subject of research of ISPRS Intercommission Working Group I/V *Unmanned Vehicle Systems (UVS) for Mapping and Monitoring Applications*. The paper synthetically reviews recent developments in the field of *Unmanned Vehicle Systems* and outlines further directions of research. It presents construction of typical UAVs and analysis of sensors installed on their platforms. Moreover it describes photogrammetric and remote sensing technologies and various kinds of applications in geomatics which base on optical multisensoral and LiDAR data and technical aspects of UAVs application.

Dr inż. Piotr Sawicki
e-mail: piotr.sawicki@geodezja.pl
tel.: +89 5233282
fax: +89 5233210