

Aleksandra Bujakiewicz*

QUO VADIS, FOTOGRAMETRIO?

1. Wprowadzenie

Dokąd podąża fotogrametria i jaka ona będzie w najbliższych kilkunastu latach? To jest pytanie, które zadają sobie wszyscy specjaliści w tej dziedzinie na całym świecie. Szybki postęp technologiczny ostatnich lat oraz wiele nowych metod i technologii w zakresie przetwarzania obrazów cyfrowych i integracji różnych danych wskazuje na coraz większe możliwości fotogrametrii i teledetekcji w dostarczaniu różnego rodzaju danych dla zasilania baz topograficznych i systemów informacji geograficznej oraz wielu innych zastosowań. Problem automatyzacji pomiarów fotogrametrycznych jest od wielu lat w zakresie badań podstawowych. Pomimo wieloletnich zmagania i osiągnięć w tym zakresie, ciągle jeszcze nie został uzyskany taki poziom, w którym w pełni automatyczne pomiary fotogrametryczne są realizowane w czasie rzeczywistym, a zadowalające wyniki są dostarczane natychmiast – na żądanie – w celu podjęcia na ich podstawie odpowiednich decyzji.

Pięćdziesiąty już Tydzień Fotogrametryczny, który miał miejsce we wrześniu 2005 roku w Stuttgarcie, odbywał się pod hasłem „Quo Vadis, Photogrammetry?”. Tematy wiążące w zakresie najważniejszych trendów przyszłości fotogrametrii, dotyczyły nowych sensorów (kamer cyfrowych, systemów skaningu laserowego, lotniczych systemów radarowych) i fuzji różnych danych, wizualizacji danych przestrzennych, zasilania wirtualnych baz 3D GIS, fotogrametrii w czasie rzeczywistym. Szybki rozwój technologii fotogrametrycznych i teledetekcyjnych oraz ich integracja z technologiami GIS wymaga stałych zmian i aktualizacji programów nauczania. Omawiane były możliwości i korzyści stałej aktualizacji wiedzy, poprzez wprowadzenie nowych modułów w trybie nauczania na odległość, tzw. *e-learning*.

* Politechnika Warszawska, Instytut Fotogrametrii i Kartografii

W niniejszym artykule zostanie przeprowadzona analiza wybranych tematów, które z pewnością będą kontynuowane i rozwijane w ciągu najbliższych kilku lat.

2. Fuzja danych obrazowych i ich bezpośrednia georeferencja

Coraz szerszy zakres stosowania danych obrazowych stał się możliwy dzięki stałemu rozwojowi systemów obrazujących, pracujących na platformach lotniczych, satelitarnych i lądowych. Satelitarne systemy wysokorozdzielcze, cyfrowe kamery lotnicze (kadrowe i z linijkami skanującymi), lotnicze skanery laserowe LIDAR, systemy radarowe, sensory multispektralne, termalne i hiperspektralne, naziemne kamery CCD i naziemne skanery laserowe – to przykłady systemów działających w oparciu o różne zasady i pozyskujących dane obrazowe o różnej rozdzielczości przestrzennej i w szerokim zakresie spektrum. Powszechne ich wykorzystanie do tworzenia numerycznych map, baz topograficznych i tematycznych oraz systemów informacji geograficznej stało się możliwe dzięki znacznej automatyzacji procesów pozyskania i przetwarzania obrazów.

W ostatnich latach pojawiły się nowe możliwości, które zwiększyły uniwersalność wykorzystania danych obrazowych poprzez:

- fuzję różnych danych obrazowych,
- bezpośrednią georeferencję pozyskiwanych danych obrazowych poprzez integrację systemów obrazujących z systemem GPS/INS.

Jednoczesne wielosensorowe pozyskanie danych o szerokim spektrum spowodowało znaczne obniżenie ich kosztów. Fuzja różnych zobrazowań pozwala łączyć obrazy panchromatyczne o wyższej rozdzielczości przestrzennej, pozyskane kamerami/systemami z platformy lotniczej czy satelitarnej, z danymi obrazowymi o zróżnicowanej rozdzielczości spektralnej (multispektralne obrazy lotnicze i satelitarne, dane pozyskane kadrowymi i liniowo skanującymi sensorami termalnymi lub hiperspektralnymi). W ten sposób uzyskuje się dane obrazowe posiadające wyższą rozdzielczość przestrzenną i jednocześnie charakteryzujące się rozdzielczością spektralną w szerszym zakresie spektrum. Jest to istotne zarówno ze względu na dokładność metryczną, jak i na różnorodność tematyczną zobrazowania. Można także łączyć dane uzyskane różnymi innymi sensorami/systemami obrazującymi, jak np. skanerem laserowym (lotniczym czy naziemnym) czy lotniczym systemem SAR z obrazami pozyskanymi kamerą cyfrową [18].

Integracja systemów obrazujących z systemem GPS/INS, dostarczającym w czasie lotu parametry orientacji zewnętrznej, umożliwia bezpośrednią georeferencję zobrazowania w trakcie jego pozyskiwania. Tego rodzaju rozwiązanie jest już stosowane od kilkunastu lat, jednakże intensywność badań dotyczących tego zagadnienia zwiększyła się w ostatnich latach w związku z rozwojem dynamicznych systemów obrazujących, w których parametry orientacji zewnętrznej o wysokiej dokładności muszą być uwzględniane w czasie tworzenia obrazu [4, 5, 9]. Przykładami takich systemów są cyfrowe kamery lotnicze bazujące na liniijkach skanujących, np. ADS40 [8], lotnicze skanery laserowe, takie np. jak ALS50

firmy Leica Geosystems, czy LiteMapper 5600 firmy IGI Ltd [15], naziemne skanery laserowe [2], oraz ostatnio rozwijane lotnicze systemy SAR [14]. Niektóre nowoczesne metody łączenia ze sobą różnego rodzaju danych obrazowych wymagają także bezpośredniej georeferencji w trakcie ich pozyskania.

Lotnicze mobilne systemy mapowania, takie jak np. AIMS (*Aerial Integrated Mapping System*), rozwijany w Stanowym Uniwersytecie Ohio [10], czy DSS firmy Applanix, pozwalają pozyskać trójwymiarowe dane o topografii terenu i pokryciu. Ze względu na wysokie wymagania dokładnościowe pozyskiwanych danych terenowych, analizowane są różnego rodzaju wpływy i błędy zarówno systemów, jak i ich instalacji na platformie, które mogą obniżyć dokładność bezpośredniej georeferencji obrazu.

W ostatnich latach rozwijane są także lądowe mobilne systemy mapowania LMMS (*Land Mobile Mapping Systems*), które poprzez integrację w czasie rzeczywistym systemu obrazującego (np. kamery cyfrowej CCD) z systemem GPS/INS pozwalają w trakcie przejazdu samochodu z zainstalowanym systemem rekonstruować trójwymiarowe położenie obiektów np. wzdłuż autostrad, dróg czy innych tras.

Stały rozwój zintegrowanego systemu GPS/INS systematycznie zwiększa dokładność określenia orientacji zewnętrznej obrazów w trakcie ich pozyskania. Można się zatem spodziewać, że w bliższej czy dalszej przyszłości, kiedy stosowanie lotniczych kamer cyfrowych w prowadzonych projektach fotogrametrycznych stanie się powszechne, proces fotogrametrycznego pomiaru zostanie znacznie skrócony i uproszczony z uwagi na wyeliminowanie etapu aerotriangulacji, którego głównym celem obecnie jest poprawa dokładności orientacji zewnętrznej zdjęć określonej w trakcie lotu.

3. Udział fotogrametrii w 3D GIS

Rozwój 3D GIS jest możliwy dzięki wirtualnym technikom przetwarzania kompleksowych 3D danych oraz stałemu rozwojowi grafiki komputerowej. Wirtualne rzeczywiste systemy 3D GIS są stosowane obecnie dla prezentacji istniejących lub planowanych modeli krajobrazu. Potencjalne zakresy ich zastosowania to planowanie miast, turystyka, dokumentacja zabytków architektonicznych, gospodarka nieruchomościami i inne. Wirtualne modele miast, które są niezbędne w zastosowaniach modeli miejskiego krajobrazu, stały się standardowymi produktami generowanymi w oparciu o fotogrametryczne metody pozyskiwania danych. Rozwój narzędzi i algorytmów wykorzystujących dane obrazowe dla wydajnego generowania 3D modeli miast był tematem badań przez kilka ostatnich lat [1, 3, 13].

Generowanie 3D GIS dla terenów miejskich wymaga integracji różnych danych dotyczących terenu. Poza topografią terenu reprezentowaną przez DTM, wymagane są dane dotyczące pokrycia, tj. 3D modeli budynków, modeli różnego typu obiektów inżynierskich, pokrycia szatą roślinną, etc. [12]. Dla klasyfikacji różnych poziomów detali w modelach miast definiuje się cztery kategorie modeli. Poziom zwany LOD0 odnosi się do modelu regionalnego, który jest reprezentowany przez 2.5D cyfrowy model terenu, model LOD1

dotyczy modelu definiującego podstawy budynków. W modelu LOD2, budynki są dostępne z teksturą i dachami. Szczegółowe modele architektoniczne są generowane w LOD3, a wnętrza budynków wraz z modelami *walkable* zawarte są w LOD4.

Różnorodność tematyczna, szczegółowość i dokładność danych wymaga stosowania obrazów z różnych sensorów, często łączonych ze sobą i zintegrowanych z danymi pozyskanymi systemem GPS/INS, w celu ich bezpośredniej georeferencji. Dane pozyskiwane z obrazów laserowych lub z obrazów stereo i mono, wykonanych w różnych zakresach spektrum z platformy lotniczej, są uzupełniane informacjami uzyskanymi z obrazów wykonanych z platform naziemnych [2, 12]. Takie integracje stały się możliwe dzięki intensywnemu rozwojowi grafiki komputerowej. Ich intensyfikacja w ostatnich latach jest napędzana wymaganiami tworzenia nowych metod prezentowania geodanych, bazujących na wirtualnej rzeczywistości technologii. Jest to szczególnie pomocne w wirtualnym modelowaniu miast, gdzie animacje w czasie rzeczywistym oraz bliski wgląd w otoczenie miasta są bardzo użyteczne.

Dla pozyskania danych dotyczących określenia fasad budynków wraz z teksturą, co jest szczególnie istotne w przypadku dokumentacji zabytków architektonicznych, coraz powszechniej stosowane są lądowe mobilne systemy mapowania (LMMS), w których dwie (lub cztery) kamery CCD i skanery laserowe są zintegrowane z systemem GPS/INS. Do planowania miast i zarządzania nimi wymagana jest prosta prezentacja modeli budynków, jednakże dodatkowo określa się inne dane pokrywające teren wzdłuż ulic, takie jak znaki drogowe, różne urządzenia inżynierskie oraz zadrzewienie etc. Określenie trójwymiarowego położenia wybranych obiektów wymaga ich identyfikacji i pomiaru na stereo-obrazach. Zgodnie z [6], celem ekstrakcji obiektów jest umożliwienie geometrycznych przetworzeń, takich jak kalibracja, orientacja czy rekonstrukcja i rozpoznanie obiektu oraz interpretacja i kategoryzacja obrazu. Manualna ekstrakcja szczegółów była głównym ograniczeniem w technologii mobilnego mapowania. Wyznaczenie orientacji zewnętrznej systemu obrazującego, dzięki jego integracji z systemem GPS/INS w trakcie pozyskania obrazów, pozwala na stosowanie półautomatycznej metody pomiaru, poprzez określenie odpowiadających linii epipolarnych na obrazach stereoskopowych. Gdy wybiera się manualnie określone do pomiaru szczegóły na jednym ze zdjęć, homologiczne obrazy na drugim zdjęciu są wykrywane poprzez automatyczny matching wzdłuż odpowiadających linii epipolarnych.

4. Fotogrametria w czasie rzeczywistym – *Real Time Photogrammetry*

Od wielu lat trwa wdrażanie automatycznych procesów do technologii fotogrametrycznych. Jednakże, jak dotąd, z pełnym skutkiem zostały zautomatyzowane tylko takie procesy, w których nie jest wymagana decyzja związana z wyborem i interpretacją wybranych dyskretnych elementów punktowych czy liniowych na obrazach. Należą do nich takie technologie fotogrametryczne, jak automatyczna aerotriangulacja czy rekonstrukcja powierzchni terenu lub kształtu obiektu. W ostatnich latach coraz częściej używany jest ter-

min „fotogrametria w czasie rzeczywistym”. W ten sposób określa się taki zakres fotogrametrii, w którym pomiary fotogrametryczne charakteryzujące się pełną automatyzacją procesu są realizowane w czasie rzeczywistym, a wyniki są dostarczane natychmiast – na żądanie – w celu podjęcia na ich podstawie odpowiednich decyzji.

Zgodnie z [6], fotogrametria w czasie rzeczywistym jest rozważana w trzech aspektach:

- 1) ekstrakcja obiektów dla pomiarów w czasie rzeczywistym,
- 2) opracowanie przestrzenno-czasowe obrazów,
- 3) rozpoznanie obiektów w czasie rzeczywistym.

W ostatnich latach prowadzono różne badania i podejmowano próby zmierzające do osiągnięcia pełnej automatyzacji. Analizowane były techniki bazujące na wielowarstwowych neuronowych sieciach Hopfielda lub metoda Marcova losowego pola, w celu rozpoznania obiektów wzdłuż ulic (lamp ulicznych czy świateł ruchu drogowego [21, 22]. Do automatycznej ekstrakcji osi dróg z sekwencji obrazów wykonanych lądowym mobilnym systemem mapowania rozwijana była między innymi metoda trójwymiarowego modelowania typu *snake* [20]. Dla celu matchingu i rozpoznania obrazu rozwijane są afiniczne inwariantne detektory regionów (ang. *affine invariant region detectors*), które przebiegają w dwóch etapach: wyszukiwanie regionów (na podstawie piramidy obrazów) oraz opisanie treści obrazu w tych regionach [17]. Nowoczesne narzędzia dla przetwarzania obrazu i dostępność technik robustowych dla ekstrakcji geometrycznych i tematycznych informacji z obrazów znacznie przybliżają realność takiego celu. Opracowanie obrazów w odniesieniu do przestrzeni i czasu obejmuje zarówno orientację systemu, jak i rekonstrukcję obiektu. Oba te zadania, które mogą być wykonane oddzielnie lub jednocześnie, są łatwiejsze do wykonania w czasie rzeczywistym, gdyż nie wymagają szczegółowej interpretacji obrazu. Do przeprowadzenia jednoczesnej automatycznej wzajemnej orientacji sekwencji zdjęć, wykonanych kamerą (CCD lub wideo), wykorzystuje się kilka procedur [19]. Orientacja bezwzględna może być wykonana automatycznie, jeśli punkty kontrolne są dostępne na zdjęciach w formie sygnalizowanych obrazów cyfrowych [7]. Inną metodą określenia orientacji zewnętrznej lądowego mobilnego systemu rejestrującego jest analiza otoczenia, dla którego znane jest położenie wybranych obiektów (ang. *the kidnapped robot*). W tym przypadku system jest zwykle zintegrowany ze skanerem laserowym mierzącym odległości do tych obiektów. Automatyczna rekonstrukcja obiektów jest bardziej skomplikowana niż określenie orientacji systemu, ze względu na ich często skomplikowany kształt i dużą liczbę parametrów opisujących mierzone obiekty. Stereoalgorytm w czasie rzeczywistym, rozwijany przez [23], opiera się na procedurze *multi-resolution*, ze zmiennym rozmiarem okna dla każdego poziomu i stosowaniem sumy kwadratów różnic gęstości optycznej (SSD) jako miernika podobieństwa.

Jednoczesna lokalizacja mobilnego systemu obrazującego i mapowanie SLAM (*Simultaneous Location and Mapping*) zawiera oba etapy, tj. określenie w czasie rzeczywistym parametrów orientacji zewnętrznej systemu oraz rekonstrukcję w czasie rzeczywistym zarejestrowanego otoczenia. Lokalizację mobilnego systemu obrazującego określa się w oparciu o znane *a priori* z mapy położenie obiektów otaczających. Głównym problemem etapu re-

konstrukcji otoczenia jest integracja w czasie rzeczywistym danych obrazowych sekwencji zdjęć, wykonanych w różnym czasie i w różnych położeniach systemu rejestrującego.

Rekonstrukcja otoczenia w czasie rzeczywistym jest jedynie wstępną częścią tego kompleksowego zadania. Znacznie trudniejsze jest rozpoznanie i wykrycie w czasie rzeczywistym wielu specyficznych obiektów z badanego otoczenia, np. znaków drogowych, słupów, etc. Takie zadanie wymaga kategoryzacji obiektów, tj. identyfikacji klas, do których takie grupy obiektów należą [6].

5. Podsumowanie

Pomimo ogromnego postępu obserwowanego przez ostatnich 15 lat w zakresie badań i doświadczeń dotyczących pełnej automatyzacji procesów fotogrametrycznych, nie uzyskano takich osiągnięć, na jakie pierwotnie liczone. Wynika to stąd, że każde nowe podejście określa nowe zadania, które muszą być rozwiązane. Są one z punktu widzenia naukowego bardzo interesujące, jednakże ich złożoność i poziom skomplikowania są coraz wyższe i ciągle stwarzają nowe trudności w ich praktycznym zastosowaniu [16].

Literatura

- [1] Alshawabkeh Y., Haala N.: *Integration of Digital Photogrammetry and Laser Scanning for Heritage Documentation*. IAPRS, vol. 35, Part B, on CD, 2004
- [2] Bohm J.: *Terrestrial Laser Scanning – A Supplementary Approach for 3D Documentation and Animation*. Photogrammetric Week '05, Wichmann 2005, 263–271
- [3] Bohm J., Haala N.: *Efficient Integration of Aerial and Terrestrial Laser Data for Virtual City Modeling Using LASERMAPS*. ISPRS workshop on Laser Scanning, 2005
- [4] Cramer M.: *Performance of GPS/Inertial Solutions in Photogrammetry*. Photogrammetric Week '01, Wichmann 2001, 49–62
- [5] Cramer M., Stallmann D., Haala N.: *Direct Georeferencing Using GPS/Inertial Exterior Orientation for Photogrammetric Applications*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. XXXIII, B3, 2000, 198–205
- [6] Forstner W.: *Real-Time Photogrammetry*. Photogrammetric Week '05, Wichmann 2005, 229–238
- [7] Fotohandy, 2004. <http://www.ibp.uni-bonn.de>
- [8] Fricker P.: *ADS40 – Progressing Digital Aerial Data Collection*. Photogrammetric Week '01, Wichmann 2001, 93–104
- [9] Grejner-Brzezińska D.: *Direct Exterior Orientation of Airborne Imagery with GPS/INS System: Performance and Analysis*. Navigation, vol. 46, No. 4, 1999, 261–270
- [10] Grejner-Brzezińska D.: *Mobile Mapping Technology: Ten Years Later, Part I*. Surveying and Land Information Systems, vol. 61, No. 2, 2001, 79–94

-
- [11] Grejner-Brzezińska D.: *Mobile Mapping Technology: Ten Years Later, Part II*. Surveying and Land Information Systems, vol. 61, No. 3, 2001, 83–100
- [12] Haala N.: *Towards Virtual Reality GIS*. Photogrammetric Week '05, Wichmann 2005, 285–294
- [13] Haala N., Bohm J.: *A Multi Sensor System for Positioning in Urban Environments*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 58 (1–2), 2003, 31–42
- [14] Hellwich O., Reigber A., Guillaso S., Jager M., Neumann M., Bellmann A.: Photogrammetric Week '05. Wichmann 2005, 135–146
- [15] Kremer J.: *IGI Ltd – Serving the Aerial Survey Industry for more than 20 Years*. Photogrammetric Week '05, Wichmann 2005, 33–38
- [16] Mayer H.: *What Next: Autonomous Photogrammetric Image Understanding?* Photogrammetric Week '05, Wichmann 2005, 331–339
- [17] Mikołajczyk K., Tuytelaars T., Schmid C., Zisserman A., Matas J., Schaffalitzky F., Kadir T., Van Gool L.: *A Comparison of Affine region Detectors*. Journal in Computer Vision, 2005
- [18] Roth R.: *Trends in Sensor and Data Fusion*. Photogrammetric Week '05, Wichmann 2005, 253–261
- [19] Rother C., Carlsson S.: *Linear Multi View Reconstruction and Camera Recovery*. Int. Conference on Computer Vision, Vancouver 2001, 42–51
- [20] Tao C.V., Li R., Chapman M.A.: *Automated Reconstruction of Road Centerlines from Mobile Mapping Image Sequences*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 64 (7), 1998, 709–716
- [21] Tu Z., Li R.: *A multilayer Hopfield neural network for 3D object recognition*. Proceedings of International Mobile Mapping Workshop, Bangkok 1999, 1–6
- [22] Tu Z., Li R.: *Automatic Recognition of Civil Infrastructure Objects in Mobile Mapping Imagery Using a Marcov Random Field Model*. International Archives of ISPRS, 33 (2), on CD, 2000
- [23] Yang R.I., Pollefeys M.: *Multi-Resolution Real -Time Stereo on Commodity Graphics Hardware*. Proceedings IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2003, 211–218