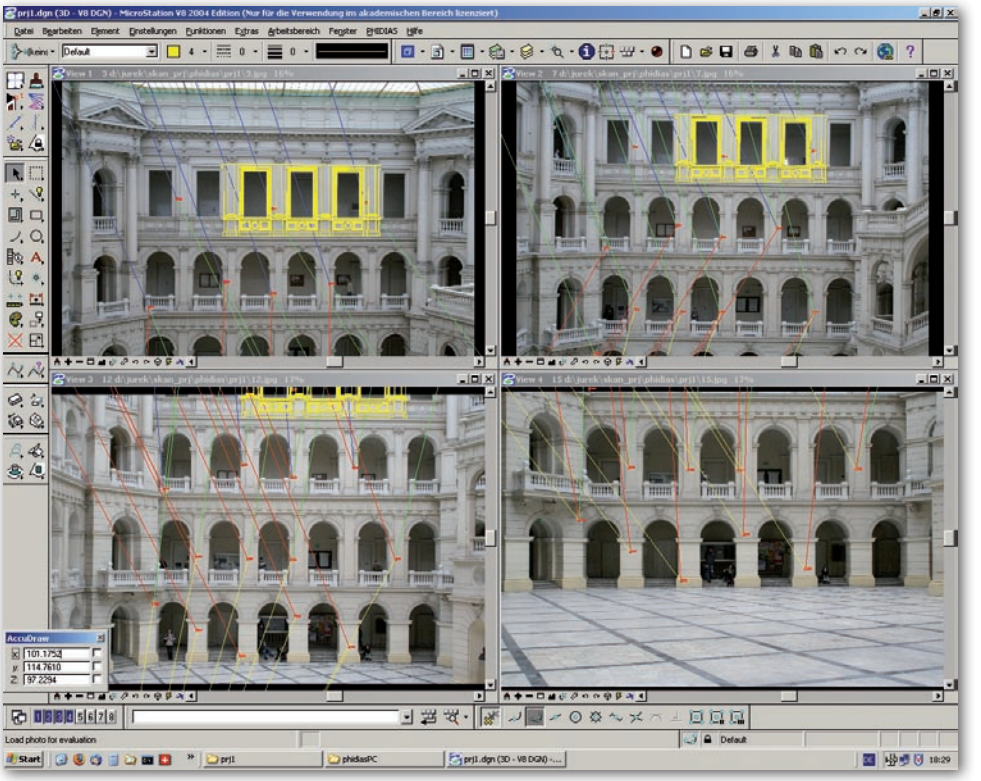
Laserowy skaning naziemny – nowe możliwości, nowe wyzwania

SKAN ZE ZDJĘCIEM

Pierwsze laserowe skanery naziemne pojawiły się na rynku pod koniec roku 1998. Atuty tych urządzeń to: technika pomiarów „bliskiego zasięgu", duża szybkość zbierania danych, wydajność wynikająca z integracji instrumentu z oprogramowaniem, odporność na błędy spowodowane przez operatora, mobilność, bezpieczeństwo użytkowania i milimetrowa dokładność.

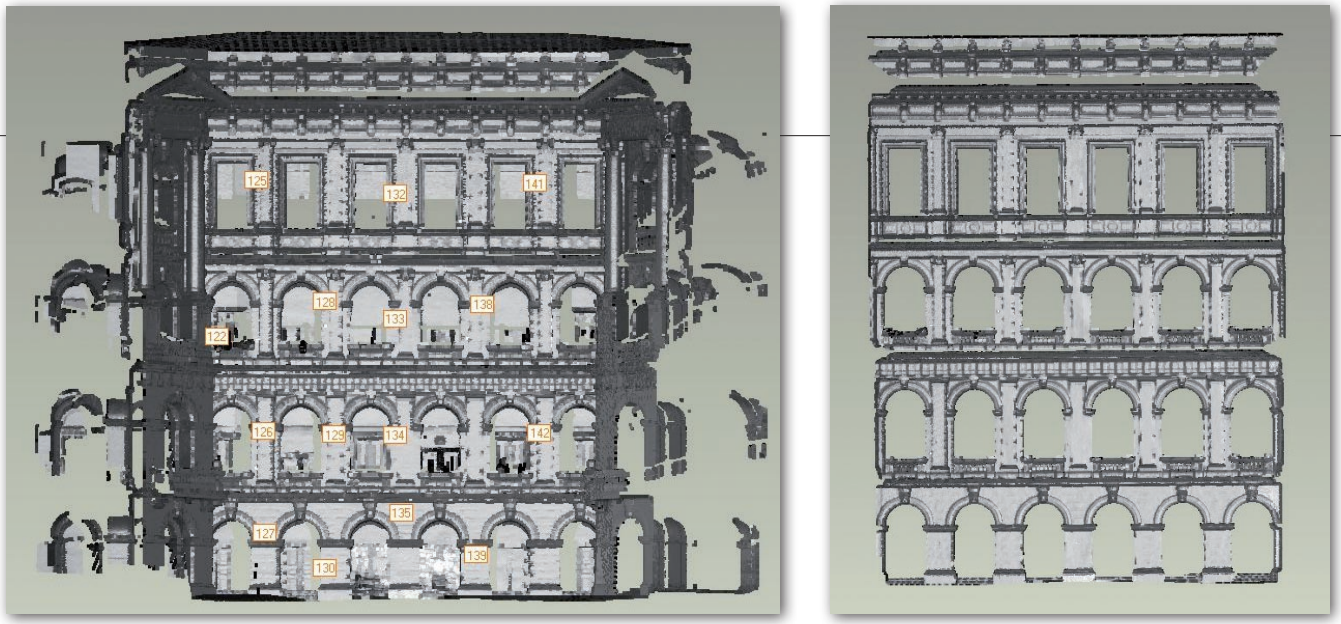


Rys. 1. Zdjęcia cyfrowe wykorzystane do opracowania ściany północnej Auli Głównej Politechniki Warszawskiej wraz z modelem szkieletowym 3D

JERZY TURKIEWICZ

Szybko okazało się, że istnieje ogromne zapotrzebowanie na realizację pomiarów inżynierskich skanerami laserowymi. Po paru latach można było wyraźnie określić warunki, w których skanery stały się bezkonkurencyjne w stosunku do innych metod pomiarowych (skomplikowane geometrie, powierzchnie, duża szczegółowość, zagęszczenie detali, wykonywane z daleka pomiary obiektów trudno dostępnych, pomiary obiektów aktywnych, w ciągłym użyciu, niebezpiecznych).

Technologia skaningu laserowego zyskała także niebagatelne zalety biznesowe: minimalizacja ryzyka błędnego pomiaru (a więc niepowodzenia projektu), możliwość realizacji nieprecyzyjnie sformułowanych zadań i wprowadzania zmian w trakcie projektu (elastyczność danych), możliwość przeprowadzenia wcześniej niezdefiniowanych analiz obiektu, szybki czas wykonania pomiaru (brak konieczności przestoju urządzeń czy zamykania ciągów komunikacyj-



Rys. 2. Chmura punktów ze skanowania ściany Auli Głównej PW. Z lewej 2,3 mln punktów, z prawej liczba punktów zredukowana do 1 mln

nych), możliwość użycia danych w wielu dyscyplinach.

W krótkim czasie skaning laserowy naziemny stał się nie tylko kolejną techniką pomiarową, ale umożliwił geodetom wkroczenie na nowe rynki, rozszerzając wachlarz ich usług. Wiele gorących dyskusji w środowisku wzbudza zagadnienie współistnienia (współzawodnictwa) skaningu laserowego i fotogrametrii cyfrowej.

Fotogrametria bliskiego zasięgu zaczęła wykorzystywać kamery cyfrowe jako narzędzia do pomiarów trójwymiarowych obiektu dopiero wtedy, kiedy pojawiły się kamery o wysokich rozdzielczościach i komputery, które mogły poradzić sobie z tak dużą ilością danych. Największą zaletą tej technologii jest możliwość otrzymywania dokładnych trójwymiarowych współrzędnych punktów aproksymujących kształt obiektu i tworzenie trójwymiarowych modeli z dwóch lub trzech zdjęć o wspólnym pokryciu.

Z kolei skanery laserowe automatycznie digitalizują złożoną geometrię obiektu trójwymiarowymi punktami (otrzymany produkt można nazwać cyfrowym modelem powierzchni DSM mierzonego obiektu [Vozikis, 2004]), z których następnie tworzony jest szczegółowy trójwymiarowy model. Ujemną stroną skanerów jest brak możliwości pozyskiwania informacji radiometrycznej o obiekcie, a także niewystarczające możliwości oprogramowania do automatycznej kompilacji chmur punktów w porównaniu z wysoko zautomatyzowanymi pakietami fotogrametrycznymi.

Jednoczesne wykorzystanie obu sensorów do pomiarów inwentaryzacyjnych jest obecnie najbardziej praktyczną i efektywną metodą, którą cechuje wysoki stopień automatyzacji, począwszy od wykonania pomiaru, na opracowaniu danych skończywszy. Stopień tej automatyzacji jest w dużym stopniu zdeterminowany sposobem wykonania pomiaru: niezależnie dla każdego sensora albo z kamery zainstalowanej na skanerze. To drugie rozwiązanie wpływa nie tylko na skrócenie czasu opracowania danych, ale również na zminimalizowanie ryzyka popełnienia błędu przez tzw. czynnik ludzki.

Laserowe skanery naziemne rejestrują także wartość intensywności odbitej wiązki laserowej. Jednak w zakresie spektralnym rejestrowanym przez wiązkę lasera, wyświetlanym w czarno-białej palecie (najnowsze rozwiązania oferują już paletę RGB), występują małe kontrasty pomiędzy obiektami o zbliżonych właściwościach refleksyjnych (w przeważającej większości obiektami konstruowanymi z identycznych materiałów, jak np. fasady budynków). Dodatkowo obrazy laserowe charakteryzują się brakiem plastyczności, a zatem małymi

Rys. 3. Szczegółowy model 3D uzyskany w wyniku przypisania wartości RGB ze zdjęć cyfrowych i poligonizacji wymodelowanej chmury punktów

walorami interpretacyjnymi w porównaniu z materiałami fotograficznymi. Obserwacje laserowe mają jednak bardzo istotną zaletę – w każdym pikselu kryje się parametr odległości do poszczególnych punktów obiektu.

Wspólne opracowanie zdjęć i skanów prowadzi do bardziej kompletnych, wiarygodnych i dokładnych rezultatów podczas wyznaczania orientacji obydwu sensorów oraz rekonstrukcji obiektów. Jednoczesne wyświetlenie obrazów intensywności (3D) i obrazów fotograficznych (2D) umożliwia monoskopowe pomiary punktów wiążących, które mogą zostać wsparte funkcjami korelacyjnymi, osiągając podpikselowe dokładności. Ponadto można wspólnie wyrównać metodą najmniejszych kwadratów obserwacje punktów biegunowych skaningu laserowego naziemnego i wiązek promieni fotograficznych. W szczególności atrakcyjnie przedstawiają się wizualizacje w postaci trójwymiarowych modeli. Skaning laserowy dostarcza danych geometrycznych, a pozyskane ze zdjęć cyfrowych tekstury rozpina się na płaszczyznach modelu geometrycznego.

Najnowsze rozwiązania w zakresie integracji skaningu laserowego i zdjęć cyfrowych doprowadziły do stałego zamontowania kamery cyfrowej na skanerze laserowym. Wzajemna orientacja między sensorami wyznaczana jest w procesie kalibracji. Integracja danych przebiega w następujący sposób: trójwymiarowa chmura punktów bezpośrednio po pomiarze jest transformowana do cyfrowego zdjęcia – odpowiednie wartości RGB zostają zidentyfikowane i odczytane. Ostatecznie wartości RGB zostają przekształcone i zastępują w przestrzeni trójwymiarowej poszczególne punkty z chmury punktów skanu. W ten sposób powstaje trójwymiarowa chmura punktów ze znanymi ze zdjęcia kolorami. Jest ona wygenerowana bezpośrednio po zakończonym pomiarze i może zostać zwizualizowana w bardziej interesujący sposób.

W celu wyznaczenia parametrów orientacji zewnętrznej obu sensorów i zdefiniowania jednolitego układu współrzędnych do zrekonstruowania obiektu, trzeba przetransformować obserwacje pozyskane różnymi instrumentami do jednego globalnego układu współrzędnych. Wyrównanie hybrydowe stwarza idealne warunki do wyznaczenia parametrów orientacji zewnętrznej i wewnętrznej różnych instrumentów.

Do przeprowadzenia wyrównania muszą być pomierzone punkty wiążące, które łączą nie tylko poszczególne zdjęcia i poszczególne skany między sobą, ale także takie punkty, które połączą chmury punktów ze zdjęciami cyfrowymi. Punkty kontrolne ze znanymi współrzędnymi (lub innymi znanymi właściwościami geometrycznymi) w nadrzędnym, referencyjnym systemie współrzędnych są potrzebne jedynie do zdefiniowania parametrów orientacji sensorów względem tego systemu. Skala może być wyliczona z danych laserowych (odległość), a pozostałe parametry rotacji i translacji z punktów kontrolnych.

Rys. 4. Trójwymiarowa ortofotografia

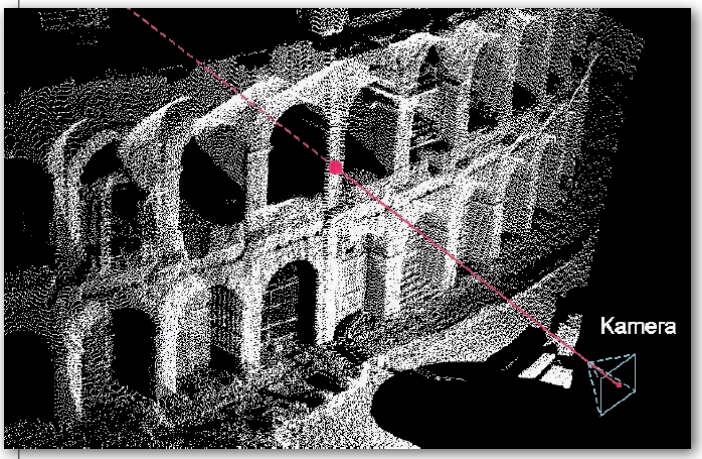
Wyznaczenie kompletnego zestawu matryc wiążących układ skanera z układem projektu może być przeprowadzone albo na danych ze skanera laserowego, albo standardowymi metodami fotogrametrycznymi. Nie nastręcza też większych problemów łączenie obydwu metod w celu zwiększenia dokładności albo skrócenia czasu wykonywanych pomiarów (Hybrid Adjustment Approach [Kager, 2003]).

Poszczególne skany są łączone ze sobą za pomocą punktów wiążących, które pozwalają wyznaczyć matrycę transformacji, będącą centralnym zadaniem w projektach ze skaningu laserowego. Identyfikacja współrzędnych punktów wiążących na normalnorozdzielczym skanie jest wykonywana z umiarkowaną dokładnością. Oczywiście, skaner oferuje również pozyskiwanie danych w wysokiej rozdzielczości, ale ze względu na czasowe ograniczenia i zbyt dużą ilość niepotrzebnych danych w miejscach, w których sygnały nie są usytuowane, rezygnuje się z tego rozwiązania.

Metodą, która znacznie skraca czas pomiarów, jest najpierw przybliżone oszacowanie pozycji sygnału na normalnorozdzielczym skanie, a następnie przeprowadzenie pojedynczych wysokorozdzielczych skanów o małej powierzchni każdego z sygnałów. Inną metodą, oferującą jeszcze większą oszczędność czasu, jest ustalenie współrzędnych sygnałów przy użyciu zdjęć z kamery w bardzo wysokiej rozdzielczości (w porównaniu z rozdzielczością oferowaną przez skanery). Normalnorozdzielczy skan służy do zawężenia poszukiwanych obszarów na zdjęciu, w ten sposób wiarygodne obliczenia stają się możliwe bez dodatkowego oświetlania (światło-flash używane jest w przypadku automatycznego pomiaru punktów). Metoda ta zdecydowanie rozdziela role obydwu technologii na etapach wykrycia sygnału i wyznaczenia jego współrzędnych. Możliwe jest również zwiększenie dokładności poprzez łączenie dwóch typów danych i wprowadzenie ich jako jednego zestawu do programu wyrównującego.

Podsumowując, wspólne opracowanie materiałów radiometrycznych (2D) i materiałów geometrycznych (3D) wpływa na lepsze wyniki orientacji i rekonstrukcji, zwiększając wiarygodność opracowania i walory wizualizacyjne zrekonstruowanego obiektu.

Powyższe twierdzenia zbadano w ramach części praktycznej pracy magisterskiej autora zatytułowanej „Wtórne przetworzenie danych pozyskanych naziemnym skaningiem laserowym w celu ich integracji z obrazami cyfrowymi", obronionej w styczniu 2007 roku na Wydziale Geodezji i Kartografii PW. Celem pracy było przedstawienie możliwości metod integracji obrazów cyfrowych z danymi pozyskanymi



Rys. 5. Bezpośrednie wyznaczenie współrzędnych punktów przy użyciu funkcji superimpozycji

naziemnym skaningiem laserowym na przykładzie Auli Głównej Politechniki Warszawskiej.

Szczególną uwagę należy zwrócić na fakt, że obecne inwentaryzacje o charakterze architektonicznym są wzbogacane wysokorozdzielczymi kolorowymi materiałami fotograficznymi. Zabiegi te mają spowodować, że raz wykonany pomiar zostanie wykorzystany nie tylko dla celów architektonicznych, ale także dla innych, np. komercyjnych (marketing) albo dokumentacyjnych (konserwacja zabytków). Omawiana praca dyplomowa ukazuje potencjał rozwiązań przy jednoczesnym zastosowaniu zdjęć i skanera laserowego w dziedzinach do tej pory wzajemnie się wykluczających podczas rutynowych kampanii mierniczych: wizualizacji (bogactwo barw) i inwentaryzacji (dokładność geometryczna). Potencjał ten przedstawiają produkty wygenerowane w ramach części praktycznej pracy: szczegółowy model 3D, ortofotografia 3D i model szkieletowy 3D.

Przy wykorzystaniu 4 zdjęć (rys. 1) o rozdzielczości 3456 × 2304 piksele i chmury punktów (rys. 2) o gęstości skanowania 2 cm (określonej odstępem między punktami) poddano szczegółowemu opracowaniu ścianę północną Auli Głównej PW. Proces wyznaczenia parametrów orientacji zewnętrznej został zdeterminowany poprzez sposób pozyskania materiałów źródłowych – zdjęcia wykonano niezależnie od skanu. Dlatego proces wyznaczenia parametrów orientacji zewnętrznej obu sensorów został podzielony na trzy etapy:

1. Pomiar punktów osnowy na zdjęciu w układzie obrazowym zdjęcia.

2. Pomiar punktów osnowy na skanie w układzie skanera.

3. Jednoczesne wyznaczenie parametrów orientacji zewnętrznej obu sensorów.

Następnie wymodelowano powierzchnię obiektu z „nieprzetworzonej" chmury punktów. Działania te z jednej strony dążą do najwierniejszego oddania geometrii obiektu, z drugiej zaś do maksymalnej redukcji liczby punktów. Doprowadziło to do zmniejszenia liczby punktów z 2 337 700 do 961 700 (rys. 2). Krokiem poprzedzającym wygenerowanie szczegółowego modelu 3D jest poligonizacja „wymodelowanej" chmury punktów, tzw. triangulacja. Nazwa procesu triangulacji pochodzi od poligonów zbudowanych z trójkątów, których wierzchołki tworzą pojedyncze punkty „wymodelowanego" skanu. Powstałym poligonom zostaje przypisana odpowiednia wartość parametru „RGB" wyliczona z obrazów cyfrowych. Ostatecznie otrzymujemy szczegółowy model 3D (rys. 3).

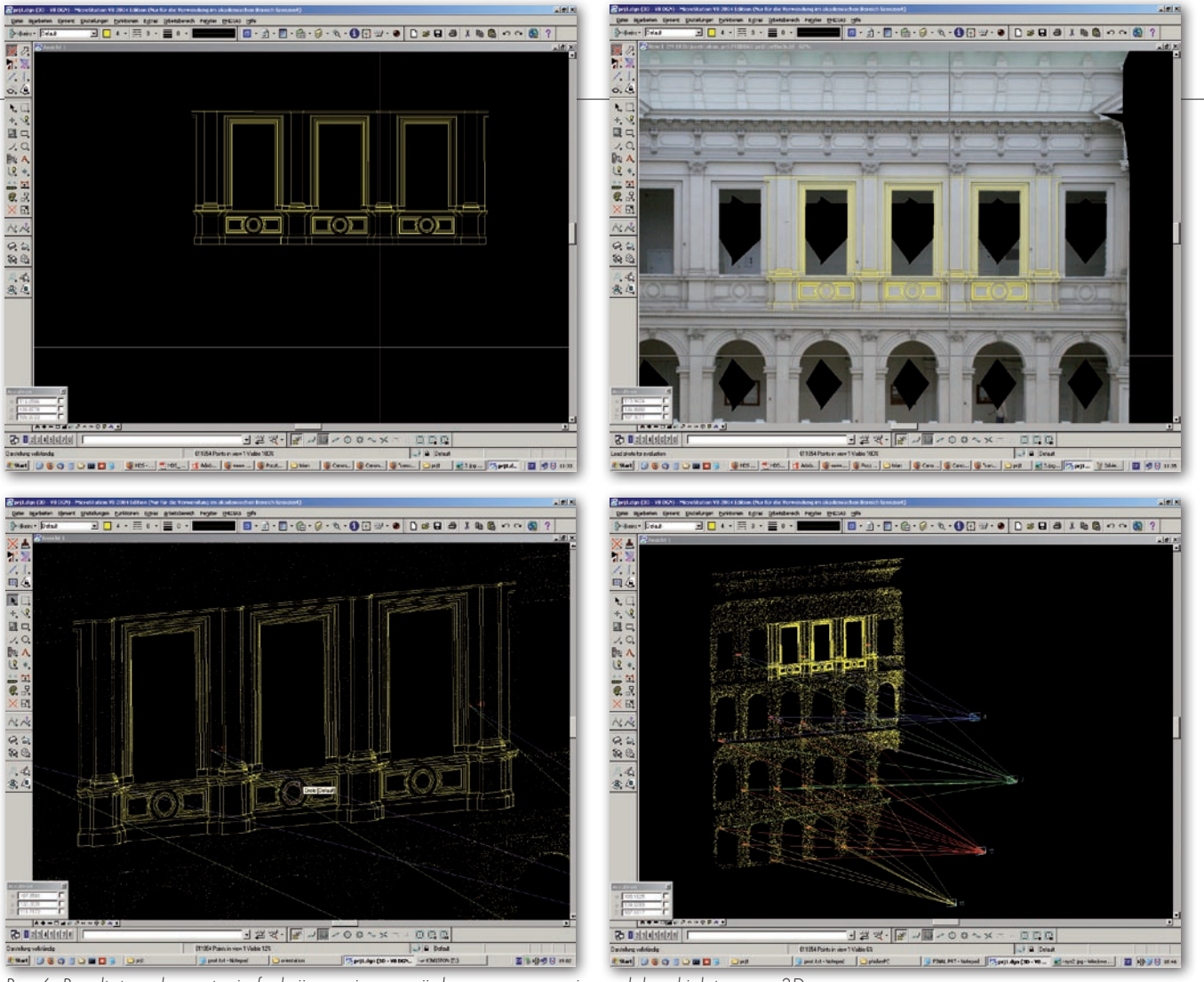
Widoczne czarne miejsca w reprezentacji szczegółowego modelu 3D są efektem „martwych pól" występujących w zarejestrowanej chmurze punktów, które w większości przypadków powstają w wyniku zasłonięcia przez inne elementy fizyczne podczas wykonywanego pomiaru. Jedynym skutecznym rozwiązaniem kwestii „martwych pól" jest dobrze przemyślana i odpowiednio zaprojektowana kampania pomiarowa.

Dysponując cyfrowym modelem powierzchni DSM oraz obrazami cyfrowymi mierzonego obiektu, możemy wygenerować ortofotografię 3D (rys. 4). Termin trójwymiarowej ortofotografii pojawił się ze względu na możliwość otrzymania trzeciej składowej współrzędnych punktu na dwuwymiarowej tradycyjnej ortofotografii. Tę trzecią współrzędną określa się „głębokość" (odległość) wskazanego punktu na ortofotografii względem zdefiniowanej płaszczyzny projekcji ortofotografii.

Harmonijną współpracę pomiędzy metodami fotogrametrycznymi a skaningiem laserowym naziemnym prezentuje ostatni model wygenerowany w ramach pracy dyplomowej – model szkieletowy 3D. Model szkieletowy to reprezentacja obiektu trójwymiarowego utworzona przez jego krawędzie lub inne linie służące do przedstawienia jego kształtu. Niezwykle pomocnym narzędziem w pozyskiwaniu elementów geometrycznych konstrukcji architektonicznych okazała się funkcja superimpozycji. Jest ona realizowana poprzez przecięcie powierzchni pojedynczego zdjęcia, zorientowanego w przestrzeni metodą wcięcia wstecz, z powierzchnią chmury punktów. W ten sposób praca odbywa się na pojedynczych zdjęciach i unika się żmudnego ustalania orientacji geometrycznej większej liczby zdjęć, co ma miejsce w typowych zadaniach fotogrametrycznych. Główna zasada opracowania fotogrametrycznego oparta jest na metodzie wcięcia wprzód, jeżeli jednak dysponujemy chmurą punktów danego obiektu, będziemy potrafili wyznaczyć współrzędne przestrzenne bezpośrednio (rys. 5). Rezultaty wykorzystania funkcji superimpozycji do wygenerowania modelu szkieletowego 3D zaprezentowano na rys. 6.

Do niedawna analizy chmur punktów przysparzały podczas opracowania wielu trudności związanych z odpowiednią metodyką zarządzania tak dużą ilością danych. Zbiory tych danych, niejednokrotnie składające się z co najmniej kilku chmur punktów, nie mogły być poddane opracowaniu ze względu na ograniczenia programów, limitujące liczbę wprowadzanych obiektów. Ograniczenia te korespondowały z niewystarczającymi mocami obliczeniowymi stacji cyfrowych. Obecnie ogromne pakiety danych można wyświetlać i wykorzystywać do przeprowadzanych analiz.

Wyzwania dotyczą również, jak już wyżej wspomniano, wykształcenia odpowiednich procedur w realizacji kampanii pomiarowych w celu uniknięcia bądź zminimalizowania wpływu łatwych do przewidzenia błędów, takich jak: „martwe pola", szumy, zaburzenie geometrii obiektu przez elementy do niego nieprzynależące, ale także tych bardziej ukrytych, takich jak: incydentalne problemy iluminacyjne, niekontrolowane zmiany atmosferyczne w najbliższym otoczeniu mierzonego obiektu (mgła, duża wilgotność powietrza, opary) czy gatunki materiałów tworzących obiekt. Tak więc wypracowanie odpo-



Rys. 6. Rezultaty wykorzystania funkcji superimpozycji do wygenerowania modelu szkieletowego 3D

wiednich indywidualnych rozwiązań dostosowanych do panujących warunków w miejscu pomiaru ciągle wymaga wielu badań.

Wyzwania nie omijają dalszych opracowań, następujących po rejestracji danych. Wszelkie błędy wynikające z „niedoskonałości" rejestracji muszą zostać uzupełnione („martwe pola") lub poprawione (szumy) za pomocą dostępnych narzędzi, oferowanych, co cieszy, w coraz to liczniejszych pakietach oprogramowania, czasami dedykowanych wyłącznie do opracowywania chmur punktów.

Jeśli chodzi o kwestię współzawodnictwa między fotogrametrią a skaningiem laserowym, to – zdaniem autora – żadna z metod nie jest zagrożeniem dla drugiej, istnieje natomiast szerokie pole do integracji obydwu technik pomiarowych w celu osiągnięcia jeszcze lepszych rezultatów pod względem geometrycznym, wizualizacyjnym i wydajności rekonstrukcji modeli 3D. Możemy wręcz mówić o komplementarności obydwu technik pomiarowych, spełniających wymogi inżynierii inwentaryzacyjnej. Dysponują one najlepszymi atutami do tworzenia rzeczywistych modeli budynków („landmarks") czy większych kompleksów zurbanizowanych (modele miast 3D), wizualizacji, przekształceń, analizy wybranych obiektów i detali architektonicznych.

Wydaje się, iż szeroki wachlarz możliwości uwolniony przez pojawienie się na rynku laserowych skanerów naziemnych czeka na zagospodarowanie przez ich naturalnych odbiorców – inżynierów geodetów. Oczekiwane jest również na powstanie odpowiednich procedur pomiarowych i strategii późniejszych opracowań mających wpływ na zwiększenie efektywności prac geodezyjnych, mogących wykształcić się tylko w realizacji projektów kreowanych przez tradycyjny rynek geodezyjny, ale także te nowe rynki, z którymi współpracę umożliwia skaning laserowy. Wydaje się, że aktualnie jedynie bariera ekonomiczna wstrzymuje rynek geodezyjny przed bardziej powszechnym stosowaniem hybrydowego systemu skanera laserowego i obrazów cyfrowych (a w przypadku rynku inżynierii inwentaryzacyjnej – nawet przed jego zdominowaniem).

Reasumując, skaning laserowy poszerza i będzie otwierać nowe rynki usług oferowanych przez branżę geodezyjną, przyczyniając się do zwiększenia roli geodetów w społeczeństwie informacyjnym XXI wieku.

JERZY TURKIEWICZ

Materiały źródłowe:
- Ullrich A., Schwarz R., Kager H., 2003: Using hybrid multi-staion adjustment for an integrated camera laser-scanner system – Laser scanning Workshop II: Registration & modelling;
- Lemmens M., 2002: Evolving Role of the Surveyor in Society, GIM International, 4/2002;
- Vozikis G., Haring A., Vozikis E., Kraus K., 2004: Laser Scanning: A new method for Recording and Documentation in Archaeology, FIG Working Week, Athens;
- Turkiewicz J., 2007: Wtórne przetworzenie danych pozyskanych naziemnym skaningiem laserowym w celu ich integracji z obrazami cyfrowymi", praca magisterska, Warszawa (Praca magisterska została zrealizowana na Politechnice Wiedeńskiej w Instytucie Fotogrametrii i Teledetekcji w ramach stypendium Sokrates-Erasmus dzięki pani prof. dr hab. A. Bujakiewicz).