

Fotogrametria w komputerowym modelowaniu obiektów architektonicznych

Sławomir Nikiel
Marek Kupaj*

Fotogrametria cyfrowa jest dziedziną szybko się rozwijającą. Fotogrametria w architekturze jest ściśle związana z automatyczną analizą zdjęć lotniczych i stacjonarnych w celu inwentaryzacji obiektów i gruntu oraz w celu ich cyfrowej analizy i rekonstrukcji. Proces fotogrametrycznej obróbki fotografii sprowadza się najczęściej do korekty perspektywicznej mającej na celu sprowadzenie widoku reprezentowanej na zdjęciu elewacji do ortofotografii, czyli odpowiednika rzutu równoległego. Proces ten wymaga jednak zebrania wielu dodatkowych danych w celu dokładnej reprezentacji obiektu i jest specyficzny dla każdej dziedziny zastosowań fotogrametrii. Niniejszy artykuł ma za zadanie zaprezentować problematykę fotogrametrii cyfrowej oraz przedstawić wyniki realizacji modułu fotogrametrycznego, tworzonego dla narzędzia modelowania i rekonstrukcji obiektów architektonicznych dla środowisk wirtualnej rzeczywistości.

Photogrammetry in Computer Aided Design for Architecture. The paper presents photogrammetric techniques and technologies currently used in architecture. The authors present algorithms and techniques for image correction necessary for further processing. Discussion of the developed application for virtual modelling is provided along with the real-case study of reconstruction of the Residential House in Laski Odrzańskie.

Wstęp

Komputerowe modelowanie obiektów architektonicznych w większości wypadków sprowadza się do rekonstrukcji obiektów na podstawie fotografii bądź obrazów, które wiernie oddają perspektywę obiektu. Dysponując kilkoma zdjęciami obiektu (wraz z dodatkowymi danymi pozwalającymi wyznaczyć położenie kamery w czasie fotografowania), można dokonać rekonstrukcji obiektu. Najpierw przeprowadza się korektę zniekształcenia soczewki obiektywu, następnie orientację wzajemną zdjęć i ostatecznie – orientację bezwzględną. Na podstawie tych danych można wyznaczyć położenie elementów geometrycznych danego obiektu przedstawionego na zdjęciach. Można dokonać rekonstrukcji obiektów na podstawie planów architektonicznych (rzutów ortogonalnych). Dysponując schematami ortogonalnymi obiektu (np. rzut elewacji frontowej, bocznej i tylnej), usuwa się poprzez korektę perspektywiczną zniekształcenia, a następnie przeprowadza się ich orientację. Korekta perspektywiczna służy tutaj także jako wstępny element

orientacji planów 2D. Możliwa jest też rekonstrukcja obiektów na podstawie ortofotografii, (które mogą być utworzone wcześniej na podstawie zdjęć obiektu – np. rekonstrukcja fasad budynków). Jeżeli ortofotografie są niedostępne, a dysponujemy zdjęciami – należy w takim wypadku dokonać korekcji perspektywicznej (wcześniej opcjonalnie korektę zniekształceń soczewki obiektywu), która doprowadzi zdjęcie do postaci ortofotografii. Jeśli są dostępne ortofotografie danego obiektu, można przystąpić do rekonstrukcji, która odbywa się na takiej samej zasadzie, jak w wypadku odtwarzania kształtu za pomocą schematów architektonicznych.

Niniejszy artykuł porusza kwestię rekonstrukcji architektonicznych przy użyciu ortofotografii, bądź na podstawie zdjęć sprowadzonych do rzutów ortogonalnych.

Aparaty, wykorzystywane do robienia zdjęć będą dalej określane mianem kamery. Z uwagi na fakt, iż proste aparaty dostępne na rynku nie spełniają wymogów, które muszą spełniać kamery fotogrametryczne, ich dokładność jest mniejsza niż kamer fotogrametrycz-

* Dr inż. Sławomir Nikiel, Marek Kupaj – Uniwersytet Zielonogórski, Wydział Elektrotechniki, Informatyki i Telekomunikacji, Instytut Sterowania

nych. Artykuł porusza również kwestię wykorzystania powszechnie dostępnych aparatów-kamer.

W kolejnych punktach są opisane poszczególne etapy rekonstrukcji architektonicznej, czyli:

- korekta zniekształceń perspektywicznych
- znalezienie modelu opisującego kamerę (pozycja, orientacja, zniekształcenia soczewki).

W dalszej części artykułu są poruszane kwestie przykładowego podejścia do problemu rekonstrukcji, czyli:

- opis modułu programu przeznaczonego do rekonstrukcji architektonicznej - przy użyciu programu BLUEPRINT MODELER
- przykład rekonstrukcji budowli architektonicznej przy użyciu wspomnianego programu.

Zniekształcenia perspektywiczne i ich korekta

Ze względu na to, iż zwykle istnieje konieczność przeprowadzenia korekty zniekształceń perspektywicznych, proces ten staje się znaczącą kwestią, poruszaną w trakcie rekonstrukcji dowolnego obiektu. Na ilustracji 1 (po lewej stronie) widoczne jest jeszcze nieprzetworzone zdjęcie. Jak widać, zniekształcenie perspektywiczne utrudnia możliwość skutecznego pomiaru kształtu detali wybranej ściany. Dopiero po korekcie perspektywicznej i uzyskaniu ortofotografii jest możliwy pomiar. Z uwagi na to, iż zdjęcie było robione pod pewnym kątem w stosunku do rzutu który chcemy otrzymać, im detal głębiej jest osadzony w ścianie, tym większe zniekształcenie jego położenia. Idea korekty zniekształcenia opiera się na takiej transformacji współrzędnych obrazu pierwotnego na obraz wtórny, aby usunąć efekt perspektywy dla wybranych elementów obiektu.



Rys. 1. Zdjęcie fragmentu budynku Uniwersytetu Zielonogórskiego przed i po wykonaniu korekty perspektywicznej

Zakładając, że dysponujemy 4 punktami kontrolnymi, które pozwolą zredukować perspektywę, zaproponowano następujące podejście:

Przy użyciu wzoru rzutowania (model kamery):

$$\begin{bmatrix} XW \\ YW \\ W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

gdzie $W = gx + hy + 1$

Wyznaczamy szukane współrzędne X, Y :

$$\begin{aligned} X &= \frac{ax + by + c}{gx + hy + 1} \\ Y &= \frac{dx + ey + f}{gx + hy + 1} \end{aligned} \quad (2)$$

Pozbywając się postaci ułamkowej i zamieniając na postać liniową, otrzymujemy:

$$\begin{aligned} X &= ax + by + c - Xxg - Yyh \\ Y &= dx + ey + f - Yxg - Yyh \end{aligned} \quad (3)$$

Z uwagi na fakt, iż dysponujemy punktami kontrolnymi x, y i X, Y , otrzymujemy następującą postać wektorową równania:

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -X_1x_1 & -X_1y_1 \\ 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 & -Y_1x_1 & -Y_1y_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_4 & y_4 & 1 & 0 & 0 & 0 & -X_4x_4 & -X_4y_4 \\ 0 & 0 & 0 & x_4 & y_4 & 1 & -Y_4x_4 & -Y_4y_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \\ g \\ h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ \vdots \\ X_4 \\ Y_4 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Traktując powyższe równanie jako $A \cdot x = b$, można je rozwiązać, sprowadzając do postaci normalnej:

$$\begin{aligned} A \cdot x &= b \\ (A^T A) \cdot x &= A^T \cdot b \\ x &= (A^T A)^{-1} \cdot (A^T b) \end{aligned} \quad (5)$$

Ze wzoru (2) można wyznaczyć współrzędne po korekcie. Jednakże z uwagi, na to, iż dla każdego punktu X, Y obrazu docelowego należy wykonać operację korekty, należy brać pod uwagę sposób interpolacji wartości koloru punktów zdjęcia (bitmapy).

Istnieje kilka sposobów interpolacji:

- metodą najbliższego sąsiada (*nearest neighbour*)
Wartości X, Y są zaokrąglane, wobec czego jest pobierany tylko 1 piksel, co w niektórych wypadkach owocuje powieleniem tych samych punktów. Jest to metoda najszybsza, wymagająca mniejszej mocy obliczeniowej, jednak daje wizualnie nienajlepsze rezultaty
- metodą dwuliniową (*bilinear*),
Wartości X, Y są uśredniane z okienka sąsiadujących z pobieranym punktem 2x2 pikseli, co daje lepszy rezultat wizualny lecz wymaga trochę większej mocy obliczeniowej
- metodą dwusześcienną (*bicubic*),
Wartości X, Y są uśredniane z okienka sąsiadujących

z pobieranym punktem 4x4 pikseli, co jest najlepszym wyjściem, jeśli chodzi o jakość wynikowego obrazu. Niestety duża złożoność obliczeniowa sprawia, iż jest to metoda znacznie wolniejsza od pozostałych.

Wybór sposobu interpolacji zależy oczywiście od użytkownika, choć zalecane jest użycie takiej metody, która daje wyniki satysfakcjonujące wizualnie, jak i czasowo.

Proste metody kalibracji kamery

Aktualnie, zwykle duża liczba opracowań projektów fotogrametrycznych opiera się na wykorzystaniu kamer analogowych bądź cyfrowych, które nie są kamerami fotogrametrycznymi. Powoduje to, iż taki sposób rekonstrukcji staje się bardzo atrakcyjny i popularny dla użytkowników, którzy z różnych powodów nie mogą pozwolić sobie na sprzęt wysokiej klasy, bądź też w większości dla zastosowań architektonicznych, archeologicznych, w których niekonieczne jest uzyskiwanie wysokich dokładności [1]. Pisząc o zwykłych aparatach, niemal natychmiastowo powstaje problem wyznaczenia ich parametrów, czyli orientacji wewnętrznej. W literaturze dotyczącej fotogrametrii i z praktyki osób zajmujących się tą dziedziną wiedzy wiadomo, iż istnieje wiele sposobów wyznaczenia orientacji wewnętrznej. Można tu wspomnieć o następujących sposobach:

- użycie równań rzutowania (*projective approach*) [2]
- kalibracja za pomocą powierzchni testowej (*test-field*) [3]
- kalibracja za pomocą wiązek promieni (*bundle-adjustment*) [4]
- inne techniki - takie jak użycie punktów zbiegu (*vanishing points*) [5].

Dodatkowym problemem jest wyznaczenie punktu

głównego zdjęcia (środek osi zdjęcia, lecz nie zawsze geometryczny środek zdjęcia) - szczególnie przy zwykłych aparatach nie ma możliwości określenia tego punktu. Należy wyznaczyć go metodami kalibrującymi kamerę (na podstawie zdjęcia). Z uwagi na to, iż obiektyw wprowadza pewne zniekształcenia, szczególnie w tańszych modelach, należy wprowadzić korektę zniekształcenia soczewki. Ponieważ zniekształcenia w dużej mierze rozchodzą się radialnie, przydaje się znajomość położenia punktu głównego zdjęcia (centrum zniekształceń). W artykule [6] zostały poruszone kwestie korekcji radialnych zniekształceń soczewki obiektywu.

W przypadku posiadania ortofotografii, która ma być płaszczyzną rzutującą (za pomocą której wyznaczy się punkty na obiekcie) istnieje problem ustalenia jej położenia. Jeśli potraktować ortofotografię jako płaszczyznę zdjęcia kamery, pozostaje problem ustalenia pozycji kamery (zakładamy, że znana jest orientacja aparatu - wynika to z charakteru danej ortofotografii - np. orientacja przednia dla fasady przedniej budynku itp.). Jest to dość ważne zagadnienie, jeśli chodzi o rekonstrukcję przy wykorzystaniu programów do modelowania/rekonstrukcji. Idea pozycjonowania takiej płaszczyzny została wykorzystana w aplikacji do modelowania Blue Print Modeller [7]. W skrócie idea pomysłu polega na wykorzystaniu punktów o znanych współrzędnych (3 punkty), które mają swoje odpowiedniki (poddane rzutowaniu) na schemacie architektonicznym. Dodatkowo ważna jest również odległość schematu od obiektu.

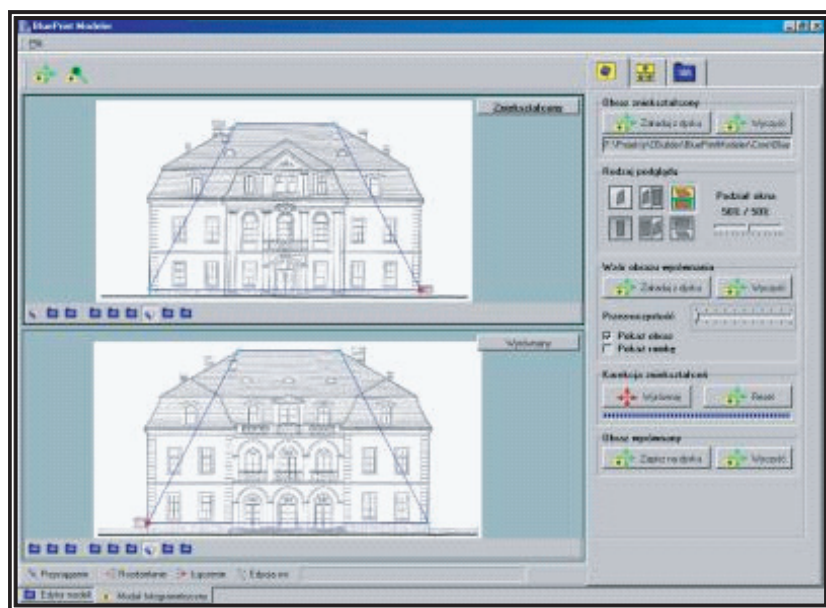
Przykład rekonstrukcji modelu

Dysponując odpowiednimi narzędziami programu BLUEPRINT MODELER dokonano rekonstrukcji architektonicznej nieistniejącego już Dworku w Laskach Odrzańskich (rekonstrukcja na podstawie schematów architektonicznych wykonanych w Instytucie Budownictwa Uniwersytetu Zielonogórskiego).

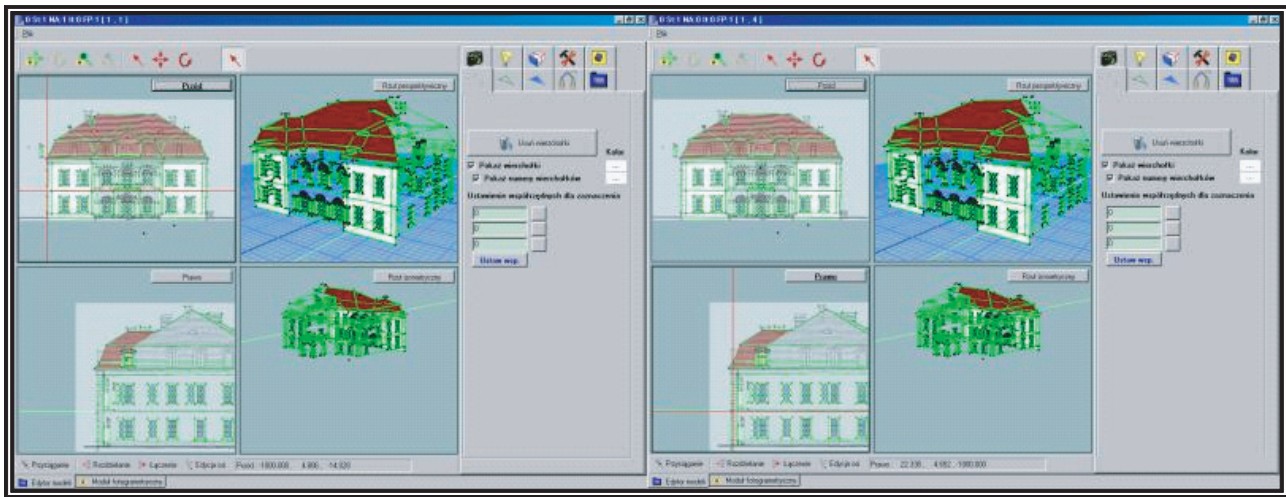
Etapy rekonstrukcji:

- Przygotowanie planów architektonicznych

Do rekonstrukcji użyto zeskanowanych planów architektonicznych (w skali 1:100) dla elewacji frontowej, tylnej, bocznej z obu stron, a także rzutu parteru (z góry). Narzędziami korekcji perspektywicznej doprowadzono plany do postaci ortofotografii, a także dokonano wstępnej wzajemnej orientacji (elewacja frontowa i tylna, elewacja lewa i prawa - zgodność punktów kontrolnych na przeciwnych schematach, np. elewacji frontowej i tylnej). Następnie utworzono obiekty schematów architektonicz-



Rys. 2. Korekcja perspektywiczna i względne dopasowanie planów do siebie



Rys. 3. Rekonstrukcja przy użyciu rzutowania z dwóch płaszczyzn

nych w programie i przypisano im bitmapy wykonanych wcześniej ortofotografii (rys. 2).

- Kalibracja położenia schematów
- Rekonstrukcja przy użyciu rzutowania (rys. 3)
- Eksport do formatu vrml

Wnioski

Komputerowe narzędzia wspomagania rekonstrukcji architektonicznej pozwalają bardzo skrócić jej proces. Ważną sprawą jest zaplanowanie zadania i ustalenie hierarchii obiektu, dzięki czemu zyskuje się klarowny obraz całej rekonstrukcji. Wyznaczenie hierarchii obiektu polega na takim logicznym podzieleniu obiektu (na mniejsze części), aby dostęp do obiektu był bardziej przejrzysty. Cała scena (razem z rekonstruowanymi obiektami) ma postać drzewa, które można modyfikować. Dokładność modelowania w dużej mierze zależy od dokładności posiadanych planów architektonicznych oraz ich pozycji względem siebie. Oznacza to, iż bardzo ważnym etapem jest część kalibracji położenia schematów. Aby modelowanie było precyzyjne, wprowadzono w programie BLUEPRINT MODELER możliwości ustalania dokładnych współrzędnych zaznaczonych punktów. Dodatkowo referencje do powstałych już obiektów powodują, iż nie ma konieczności rekonstrukcji tych samych obiektów wiele razy (np. zamiast rekonstruować kilka filarów budynku, wystarczy zrekonstruować jeden, po czym odpowiednio ustawić parametry autoreferencji). Jak widać, zastosowanie metod fotogrametrycznych w procesie rekonstrukcji architektonicznej jest bardzo przydatne. Dużą rolę odgrywa tu ortofotogrametria (dział fotogrametrii zajmujący się zdjęciami prostopadłymi/ortogonalnymi). Systemy wirtualnej rzeczywistości wymagają dobrej interakcji użytkownika z komputerem.

Oznacza to, iż szybkość wyświetlania grafiki musi być wystarczająca, aby system dał sobie radę z modelami. Złożone modele wymagają większej mocy obliczeniowej. Poza tym nie zawsze wymagana jest wysoka precyzja, więc lepiej jest stosować modele o małej liczbie poligonów, lecz takiej, by wystarczająco dobrze odzwierciedlały kształt obiektu. Jeśli zachodzi potrzeba dokładniejszego wykonania modelu, pozostaje jego dalsza obróbka w programie, bądź eksport do programów wyspecjalizowanych w modelowaniu typu 3D Studio Max lub Cinema 4D.

Bibliografia

- [1] Hemmleb M.: Digital rectification of historical images, Mat. Konferencyjne, CIPA, 1999, s. 28-42.
- [2] Karras G.E. et al.: Digital orthophotography in archeology with low-latitude non-metric images, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 32, 1999, s. 8-11.
- [3] Koelbl O.R.: Metric or non-metric cameras, Photogrammetric Engineering and Remote sensing, vol. 42, 1976, s. 103-113.
- [4] Zhang Z.: A flexible new technique for camera calibration, MSR-TR-98-71, Microsoft Corporation, 1998, s. 12.
- [5] Brauer-Burchardt C., Voss K.: Robust vanishing point determination in noisy images, ICPR, vol. 1, 2000, s. 559-562.
- [6] Wiedemann A.: Digital orthoimages in architectural photogrammetry using digital surface models, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. XXXI, Wiedeń, 1996, s. 605-609.
- [7] Nikiel S.: Blue-print based modelling of architectural artifacts, Mat. Konferencyjne EVA 2003, Berlin, s. 189-194.