

MODELOWANIE 3^D NA PODSTAWIE FOTOGRAFII AMATORSKICH*

Edward Nowak¹, Joanna Nowak²

¹ Politechnika Warszawska

² European Commission Joint Research Centre

Streszczenie. Fotogrametryczne opracowanie zdjęć amatorskich, niemetrycznych zobrażeń cyfrowych, jest utrudnione ze względu na niemożność przeprowadzenia laboratoryjnej kalibracji użytych aparatów fotograficznych czy zastosowania samokalibracji za pomocą znanej ogólnej metody DLT – Direct Linear Transformation (brak fotopunktów o znanych współrzędnych terenowych). W praktyce zazwyczaj dysponujemy tylko zdjęciami pozyskiwanymi często z kilku różnych źródeł i nierzadko są to zdjęcia wykonane z wykorzystaniem obiektywu zmiennoogniskowego (zoom).

W pracy przeprowadzono analizę matematycznych podstaw rzutu środkowego, w szczególności wykazano możliwość uzyskania pełnej orientacji wewnętrznej na podstawie perspektywicznych punktów zbiegu oraz opracowano nowe sposoby wyznaczenia tych punktów. Przedstawione rozwiązanie pozwala na metryczne opracowanie niemetrycznych zobrażeń cyfrowych, w tym zdjęć kadrowanych lub wykonanych z wykorzystaniem obiektywu zmiennoogniskowego. Zaproponowano również autonomiczną metodę wyznaczenia dystorsji radialnej na podstawie efektu beczkowatości (poduszkowatości). Metoda umożliwia uniknięcie negatywnych skutków silnego skorelowania parametrów dystorsji z odległością obrazową.

Doświadczenia z ogólnie dostępnego oprogramowania do modelowania zdjęć amatorskich (wizualizacji geometrycznych 3^D) wskazują, że wybrane własności perspektywicznych punktów zbiegu są już wykorzystane w praktyce. W szczególności przetestowano, udostępnione przez Google, narzędzie Photo Match umożliwiające budowę nieskomplikowanego modelu 3^D ze zdjęć obrazujących dwie prostopadłe płaszczyzny danego obiektu, np. ściany budynku.

Słowa kluczowe: cyfrowe zdjęcia amatorskie, modelowanie 3^D, samokalibracja zdjęć, dystorsja radialna, perspektywiczne punkty zbiegu

* Opracowanie wykonano w ramach projektu badawczego 4T12E00827.

SAMOKALIBRACJA W PARAMETRYZACJI DLT

Opracowanie zdjęć amatorskich (np. w celu dokonania trójwymiarowych wizualizacji geometrycznych) wymaga rozwiązania problemu braku parametrów orientacji wewnętrznej kamery. Odtworzenie wiązki rzutu środkowego na podstawie zdjęć wykonywanych z zastosowaniem obiektywów zmiennoogniskowych (zoom) jest dodatkowo utrudnione i wymaga zastosowania odpowiednich procedur samokalibracyjnych [Kraus 1992, 1997, Tokarczyk i Stanios 2004].

Fotogrametria bliskiego zasięgu często posługuje się ogólną metodą parametryzacji DLT (Direct Linear Transformation) [Abdel-Aziz i Karara 1971, Hbrouk i in. 1996]:

$$x = \frac{d_{1,1}X + d_{1,2}Y + d_{1,3}Z + b_1}{d_{3,1}X + d_{3,2}Y + d_{3,3}Z + b_3}, \quad y = \frac{d_{2,1}X + d_{2,2}Y + d_{2,3}Z + b_1}{d_{3,1}X + d_{3,2}Y + d_{3,3}Z + b_3}, \quad (1)$$

która wymaga wyznaczenia 11 parametrów (dla jednoznaczności przyjmujemy $d_{33} = 1$).

Można wykazać ich równoważność z parametrami [Nowak i Nowak 2000]:

- orientacji zewnętrznej $X_s, Y_s, Z_s, \varpi, \varphi, \kappa$,
- orientacji wewnętrznej x_g, y_g, c_k ,
- układu pomiarowego μ, τ .

Samokalibracja w parametryzacji DLT wymaga fotopunktów o znanych współrzędnych terenowych [Kraus 1992, Nowak i Nowak 2001, Happach i in. 2003], czym w praktyce zdjęć amatorskich nie dysponujemy.

DYSTORSJA OBIEKTYWU

Model parametryczny rzeczywistych zdjęć cyfrowych powinien uwzględniać wpływ fizycznej realizacji rzutu przez obiektyw kamery. Najczęściej stosuje się w tym celu parametry dystorsji radialnej określonej wzorem:

$$t_i = t_i(1 + R_3 \cdot r^2 + R_5 \cdot r^4) \quad (2)$$

gdzie: R_3, R_5 – współczynniki dystorsji radialnej.

Wyżej wymieniony model dystorsji, nazywany również parametrami dodatkowymi, jest stosowany w aerotriangulacji [Kraus 1997, Nowak 2002]. Wykryto tam zjawisko silnej korelacji tych parametrów. Takie niekorzystne zjawisko występuje również w zagadnieniach fotogrametrii bliskiego zasięgu [Nowak i Nowak 2005], gdzie korelacja z odległością obrazową przekracza nawet 90%.

Proponujemy specjalne rozwiązanie dla aparatów amatorskich, aby uniknąć negatywnych skutków wspomnianej korelacji:

1. Model ograniczamy do jednego współczynnika, odniesionego do promienia maksymalnego (połowa przekątnej zdjęcia) $t_i = t_i(1 + R_3 \cdot (r_i / r_{\max.})^2)$ (3)

gdzie $t_i^T = [x_i, y_i]$, $r_i = |t_i| = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$

2. Estymację prowadzimy na podstawie obserwacji 3 punktów na odcinkach prostoliniowych w pobliżu ramki zdjęcia przed wyznaczeniem innych parametrów.

Uzyskane wyniki dystorsji możemy stosować do innych zdjęć wykonanych tym samym obiektywem, przy czym uwzględniamy zmianę odległości obrazowej tak, aby tym samym kątom środkowym odpowiadała ta sama wartość dystorsji. Taką zależność potwierdzają doświadczenia Al-Ajlouni i Fraser [2006]. Można do tego celu wykorzystać zapis ogniskowej w plikach obrazowych (najczęściej jest to przybliżona wartość podana w milimetrach).

$$t_i = t_i(1 + r_3 \cdot (r_i / r_{\max.})^2 \cdot c^2 / c_1^2) . \tag{4}$$

Do wyznaczeń powinniśmy wykorzystać możliwie małą ogniskową $c < c_1$.

Algorytm określenia współczynnika dystorsji na podstawie obserwacji współrzędnych tłowych 3 punktów odcinka prostej przedstawia się następująco:

- obracamy układ tłowy tak, aby odcinek 1-2 był równoległy do osi Ox $t' = At$

gdzie $A = \frac{1}{d_{12}} \begin{bmatrix} p & q \\ -q & p \end{bmatrix}$, $p = x_2 - x_1$, $q = y_2 - y_1$, $d_{12} = \sqrt{p^2 + q^2}$ (5)

- wyznaczamy rzut punktu 3 na odcinek 1-2

$$t_4 = \frac{d_{13}}{d_{12}} t_1 + \frac{d_{23}}{d_{12}} t_2 \tag{6}$$

- uwzględniamy warunek prostoliniowości obrazu odcinka

$$y_4 = y_3 \tag{7}$$

- uwzględniamy kąty między odcinkiem 12 a promieniami wodzącymi punktów (zmiana współczynnika dystorsji działa wzdłuż promienia)

$$y_i = y_i(1 + R_3 \cdot f_i)$$

gdzie $f_i = (r_i / r_{\max.})^2 \cdot s_i$, $s_i = ((x_2 - x_1) \cdot y_i - (y_2 - y_1) \cdot x_i) / r_i / d_{12}$ (8)

- wówczas warunek (7) przybiera postać

$$y_1(1 + R_3 \cdot f_1) \cdot d_{13} + y_2(1 + R_3 \cdot f_2) \cdot d_{23} = y_3(1 + R_3 \cdot f_3) \cdot d_{12} \tag{9}$$

stąd ostatecznie $R_3 = \frac{y_1 \cdot d_{13} + y_2 \cdot d_{23} - y_3 \cdot d_{12}}{f_1 \cdot d_{13} f_2 \cdot d_{23} - f_3 \cdot d_{12}}$. (10)

Znając cechy rzutu środkowego oraz dysponując obrazami linii prostych na badanych zdjęciach, można uzyskać również inne współczynniki (obok omówionej wyżej dystorsji). Kanadyjscy badacze [Habib i in. 2004] poszukując prostego rozwiązania kalibracji amatorskich aparatów cyfrowych (w zastosowaniu do trójwymiarowego modelowania obiektów cennych historycznie), proponują właśnie wykorzystanie obrazów linii prostych.

PARAMETRYZACJA METRYCZNA CYFROWEGO APARATU FOTOGRAFICZNEGO

Między układami oryginału i obrazu zachodzi kolinearność:

$$r = \lambda A(R - R_S) \quad (11)$$

gdzie: punkt obrazu $r^T = [x, y, c]$
 punkt oryginału $c R^T = [X, Y, Z]$
 środek rzutów $R_S^T = [X_S, Y_S, Z_S]$

Macierz obrotu jest ortogonalna $A^T A = I$ i może być określona za pomocą trzech kątów obrotu Eulera, np. k_3 dookoła osi Oz , k_2 dookoła osi Oy , k_1 dookoła osi Ox .

$$\begin{aligned} a_{1,1} &= \cos(k_2) \cdot \cos(k_3) & a_{1,2} &= -\cos(k_2) \cdot \sin(k_3) & a_{1,3} &= \sin(k_2) \\ a_{2,1} &= \sin(k_1) \cdot \sin(k_2) \cdot \cos(k_3) + \cos(k_1) \cdot \sin(k_3) \\ a_{2,2} &= \cos(k_1) \cdot \cos(k_3) - \sin(k_1) \cdot \sin(k_2) \cdot \sin(k_3) \\ a_{2,3} &= -\cos(k_2) \cdot \sin(k_1) \\ a_{3,1} &= \sin(k_1) \cdot \sin(k_3) - \cos(k_1) \cdot \sin(k_2) \cdot \cos(k_3) \\ a_{3,2} &= \sin(k_1) \cdot \cos(k_3) + \cos(k_1) \cdot \sin(k_2) \cdot \sin(k_3) \\ a_{3,3} &= \cos(k_1) \cdot \cos(k_2) \end{aligned} \quad (12)$$

Eliminując z (1) parametr λ , otrzymamy jawne wzory rzutu środkowego o 7 parametrach:

$$\begin{aligned} x &= \frac{a_{1,1}(X - X_S) + a_{1,2}(Y - Y_S) + a_{1,3}(Z - Z_S)}{a_{3,1}(X - X_S) + a_{3,2}(Y - Y_S) + a_{3,3}(Z - Z_S)} c \\ y &= \frac{a_{2,1}(X - X_S) + a_{2,2}(Y - Y_S) + a_{2,3}(Z - Z_S)}{a_{3,1}(X - X_S) + a_{3,2}(Y - Y_S) + a_{3,3}(Z - Z_S)} c \end{aligned} \quad (13)$$

gdzie $X_S, Y_S, Z_S, c, k_1, k_2, k_3$ to odpowiednio współrzędne środka rzutów, odległość obrazowa oraz współczynniki dystorsji.

Łatwo zauważyć, że odległość obrazowa c jest wyrażona w jednostkach współrzędnych tłowych, a w przypadku aparatów cyfrowych są nimi piksele.

WYZNACZENIE PARAMETRÓW ORIENTACJI ZDJĘCIA

Obrazy perspektywiczne mają tę własność, że obrazy linii równoległych oryginału przecinają się w punktach zbiegu. Interesujące są punkty zbiegu osi układu terenowego:

$$\begin{array}{l} \text{punkt zbiegu osi } OX \\ X \rightarrow \infty \end{array} \quad \lim x = \frac{a_{1,1}}{a_{3,1}} c = x_X \quad \lim y = \frac{a_{2,1}}{a_{3,1}} c = y_X \quad (14)$$

$$\begin{array}{l} \text{punkt zbiegu osi } OY \\ Z \rightarrow \infty \end{array} \quad \lim x = \frac{a_{1,2}}{a_{3,2}} c = x_Y \quad \lim y = \frac{a_{2,2}}{a_{3,2}} c = y_Y \quad (15)$$

$$\begin{array}{l} \text{punkt zbiegu osi } OZ \\ Z \rightarrow \infty \end{array} \quad \lim x = \frac{a_{1,3}}{a_{3,3}} c = x_Z \quad \lim y = \frac{a_{2,3}}{a_{3,3}} c = y_Z \quad (16)$$

Wykorzystując ortogonalność kolumn macierzy obrotu, otrzymamy iloczyny skalarne wektorów punktów zbiegu:

$$x_X \cdot x_Y + y_X \cdot y_Y = x_X \cdot x_Z + y_X \cdot y_Z = x_Y \cdot x_Z + y_Y \cdot y_Z = -c^2 \quad (17)$$

To zasadnicze twierdzenie o punktach zbiegu (17) prowadzi do dwóch ważnych w zastosowaniach wniosków:

1. dwa dowolne, właściwe punkty zbiegu pozwalają na wyznaczenie odległości obrazowej – czyli najważniejszego atrybutu zdjęć wykonywanych obiektywem zmiennoogniskowym (zoom);
2. trzy punkty zbiegu tworzą trójkąt, dla którego wektory punktów zbiegu są prostopadłe do boków, np. $x_X \cdot (x_Y - x_Z) + y_X \cdot (y_Y - y_Z) = 0$, czyli punkt przecięcia wysokości (ortocentrum) jest punktem głównym zdjęcia, co prowadzi do pełnej orientacji wewnętrznej i pozwala na metryczne wykorzystanie zdjęć kadrowanych.

Obydwa wnioski zostały uwzględnione w autorskim systemie komputerowym FOTO [Happach 2003] już w 2003 (wersja *foto_3d2003.exe* i wszystkie następne), umożliwiającą obróbkę zdjęć wykonanych obiektywem zmiennoogniskowym lub kadrowanych. Można zauważyć, że wniosek nr 1 wykorzystuje koncern Google w narzędziu Photo-Match wspomagającym modelowanie 3D (w aplikacji SketchUp) bezpośrednio na fotografii obiektu [www.sketchup.com].

Współrzędne tłowe punktów zbiegu osi pozwalają również na wyznaczenie kątów obrotu, np. z dwóch zbiegów poziomych otrzymamy:

$$k_1 = -\arctan\left(\frac{y_Z}{c}\right), \quad k_2 = \arctan\left(\frac{x_Z}{c \cdot \cos(k_1)}\right)$$

$$k_3 = \arctan\left(\frac{y_X \cdot \cos(k_1) + c \cdot \sin(k_1)}{y_X \cdot \sin(k_1) - c \cdot \cos(k_1)} \sin(k_2)\right). \quad (18)$$

Można również wyznaczyć elementy macierzy obrotu bezpośrednio ze związków algebraicznych:

- wynikających z ortogonalności wierszy i kolumn macierzy A , np.

$$(x_X^2 + y_X^2) \cdot c^2 = \frac{a_{11}^2 + a_{21}^2}{a_{31}^2} = \frac{1 - a_{31}^2}{a_{31}^2} \quad (19)$$

Z założenia dotyczącego małych kątów obrotu wynika, iż $a_{11} > 0$ (oraz pozostałe elementy przekątne), stąd znaki określa reguła $\text{sign}(a_{31}) = \text{sign}(x_X)$;

- wynikających z wyznaczania odwrotności za pomocą dopełnień algebraicznych $A^T = A^{-1}$, np.

$$a_{23} = -(a_{11} \cdot a_{32} - a_{31} \cdot a_{12}). \quad (20)$$

Trzeba zaznaczyć, że wyznaczenie orientacji jest niemożliwe, gdy dwa punkty zbiegu są niewłaściwe (płaszczyzna zdjęcia równoległa do dwóch osi układu terenowego). Taki przypadek jest mało prawdopodobny w zdjęciach amatorskich.

WYZNACZENIE ŚRODKA RZUTÓW

Do wyznaczenia współrzędnych środka rzutów wykorzystamy obrazy dwóch szczególnych punktów oryginału: początek układu współrzędnych terenowych O oraz punkt H leżący na osi OY . Wówczas

- podstawiając $R = 0$ do wzoru (11), mamy $r_O = [x_O, y_O, c]^T = -\lambda_O AR_S$.
Macierz A jest ortogonalna, to mnożąc przez A^T otrzymamy:

$$-\lambda_O R_S = U$$

$$\text{gdzie znany wektor } U = A^T r_O = [U_1, U_2, U_3]^T.$$

$$\text{Eliminując parametr } \lambda_O, \text{ otrzymamy } X_S = \frac{U_1}{U_3} Z_S, \quad Y_S = \frac{U_2}{U_3} Z_S \quad (21)$$

- Kładąc $R = R_H = [0, Y_H, 0]$ do wzoru (1), mamy $r_H = [x_H, y_H, c]^T = \lambda_H A(R_H - R_S)$.

Analogicznie jak poprzednio, mnożąc przez A^T , otrzymamy:

$$\lambda_H \begin{bmatrix} -X_S \\ Y_H - Y_S \\ -Z_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \end{bmatrix} = A^T r_H$$

Eliminując parametr λ_H , otrzymamy $Y_H - Y_S = -\frac{W_2}{W_3} Z_S$.

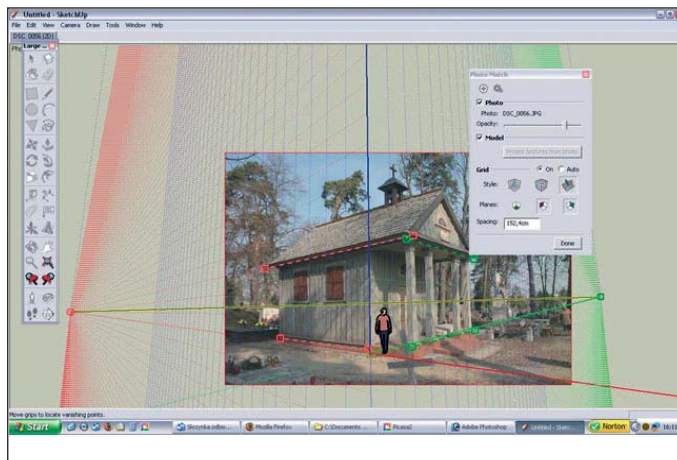
Dodając (21), otrzymamy ostatnią niewiadomą $Z_S = Y_H \frac{U_3 W_3}{U_2 W_3 - U_3 W_2}$. (22)

Łatwo zauważyć, że wartość Y_H określa skalę wektora środka rzutów. Zastąpienie pomiaru terenowego pośrednim oszacowaniem wpłynie tylko na wielkość (skale), ale nie zmieni kształtu odtwarzanego obiektu.

Jako zdjęcie bazowe należy wybrać zdjęcie zawierające dwie prostopadłe płaszczyzny, np. ściany budynku. Zobrazowane płaszczyzny powinny pozwalać na wyznaczenie dwóch poziomych zbiegów perspektywicznych (np. po linii okien, gzymsu itp.). Krawędź pionowa wyznaczy kierunek trzeciego zbiegu (pionowego).

SPOSOBY WYZNACZANIA PUNKTÓW ZBIEGU

Naturalnym sposobem wyznaczenia punktów zbiegu jest wykorzystanie przecięć obrazów linii równoległych do osi układu terenowego. Na takiej metodzie opiera się m.in. narzędzie Google PhotoMatch [<http://earth.google.com/userguide>] (ryc. 1). Korzyści z kalibracji na podstawie punktów zbiegu są nie do przecenienia, dlatego poniżej przedstawiamy inne sposoby ich wyznaczenia (szczególnie ważne, gdy na zdjęciu nie można zidentyfikować dwóch przecinających się prostych).



Ryc. 1. Ustawianie zbiegów perspektywicznych (narzędzie PhotoMatch)

Fig.1. Manually adjusting the vanishing points (Google PhotoMatch)

Wyznaczanie punktu zbiegu na podstawie znanego podziału odcinka

Jednym ze sposobów na wyznaczenie punktu zbiegu jest wykorzystanie symetrii obiektu, np. powtarzające się rozmieszczenie okien.

Załóżmy, że możemy na danym zdjęciu zidentyfikować odcinek (o końcach 1 i 3), który jest dzielony punktem 2 w znanym stosunku u/v . Wprowadzając współrzędne bieżące prostej K (do której należą wszystkie trzy punkty), otrzymamy $\frac{K_2 - K_1}{K_3 - K_2} = \frac{u}{v}$. Obrazem tej prostej jest prosta o współrzędnych bieżących k , związana z oryginałem zależnością rzutową $k = \frac{aK + b}{dK + 1}$, a wówczas punkt zbiegu wyraża się jako $k_K = \lim_{K \rightarrow \infty} k = \frac{a}{d}$.

$$K \rightarrow \infty$$

Dla określenia nieznanymi parametrów rzutu a, b, d wykorzystamy zaobserwowane na zdjęciu współrzędne bieżące wspomnianych trzech punktów, a w szczególności:

- dla punktu 1 – wstawiając $K_1 = 0$ do równania rzutu, otrzymamy $b = k_1 = 0$;
- dla punktu 2 – wstawiając $K_2 = 0$ do równania rzutu, otrzymamy $k_2 = ua + uk_2d$;
- dla punktu 3 – wstawiając $K_3 = u + v = w$ do równania rzutu, otrzymamy $k_3 = wa + wk_3d$.

Z dwóch ostatnich równań otrzymamy współrzędną bieżącą poszukiwanego punktu zbiegu:

$$k_K = \frac{a}{d} = \frac{(w-u)k_2k_3}{uk_3 - wk_2} = \frac{w-u}{u/k_2 - w/k_3}.$$

Wykorzystując znaną zależność punktów ABCD należących do jednej prostej (tzw. dwustosunek), mamy dla oryginału: $q = \frac{AC}{BC} \frac{BD}{AD}$, $\lim_{D \rightarrow \infty} q = \frac{AC}{BC} = \frac{w}{v}$, a dla obrazu:

$$q = \frac{w}{v} = \frac{ac}{bc} \frac{bd}{ad} = q' \frac{ad - ab}{ad}, \text{ gdzie } q' = \frac{AC}{BC}.$$

$$\text{Wówczas: } (q - q') ad = -q' ab = -q'(ac - bc) = q'(1 - q')bc, \text{ } ad = \frac{q'(1 - q')}{q' - q} bc.$$

Podstawiając: $q' = \frac{k_3}{k_3 - k_2}$, $bc = k_3 - k_2$, $1 - q' = \frac{-k_2}{k_3 - k_2}$, otrzymamy ostatecznie:

$$ad = -\frac{k_3k_2}{k_3 - (k_3 - k_2)w/v} = \frac{-vk_3k_2}{wk_2 - uk_3}.$$

Wyznaczenie drugiego punktu zbiegu na podstawie pojedynczej prostej i znanej ogniskowej

Mając jeden punkt zbiegu (P_x), spróbujemy znaleźć kolejny. Potrzebne nam będą następujące dane: ogniskowa c oraz wektory wodzące punktu zbiegu P_x i dwóch punktów P_1, P_2 leżących na linii dążącej do drugiego punktu zbiegu.

Równanie parametryczne prostej $P = P_1 + (P_2 - P_1)t$ oraz warunek (17) w postaci wektorowej:

$$PP_X = P_1P_X + (P_2 - P_1)P_X t = -c^2$$

pozwalają na wyznaczenie wartości parametru dla poszukiwanego punktu zbiegu:

$$t = \frac{P_1P_X + c^2}{(P_1 - P_2)P_X}.$$

Wyznaczenie drugiego i trzeciego punktu zbiegu na podstawie pojedynczych prostych

Założmy inny przypadek: Mamy dane wektory wodzące punktu zbiegu P_X oraz dwie pary punktów P_1, P_2 i P_3, P_4 wyznaczających linie do drugiego i trzeciego punktu zbiegu.

Układamy warunek (17) dla kolejnych par punktów zbiegu, otrzymując:

- dla pierwszego i drugiego punktu zbiegu $(P_1 + Q_{12}t)P_X = -c^2$
- dla pierwszego i trzeciego punktu zbiegu $(P_3 + Q_{34}s)P_X = -c^2$
- dla drugiego i trzeciego punktu zbiegu $(P_1 + Q_{12}t)(P_3 + Q_{34}s) = -c^2$,
- gdzie $Q_{jk} = P_k - P_j$.

Odejmując pierwsze równanie od pozostałych, mamy:

$$(Q_{13} + Q_{34}s - Q_{12}t)P_X = 0 \quad \text{oraz} \quad (P_1 + Q_{12}t)(P_3 + Q_{34}s - P_X) = 0$$

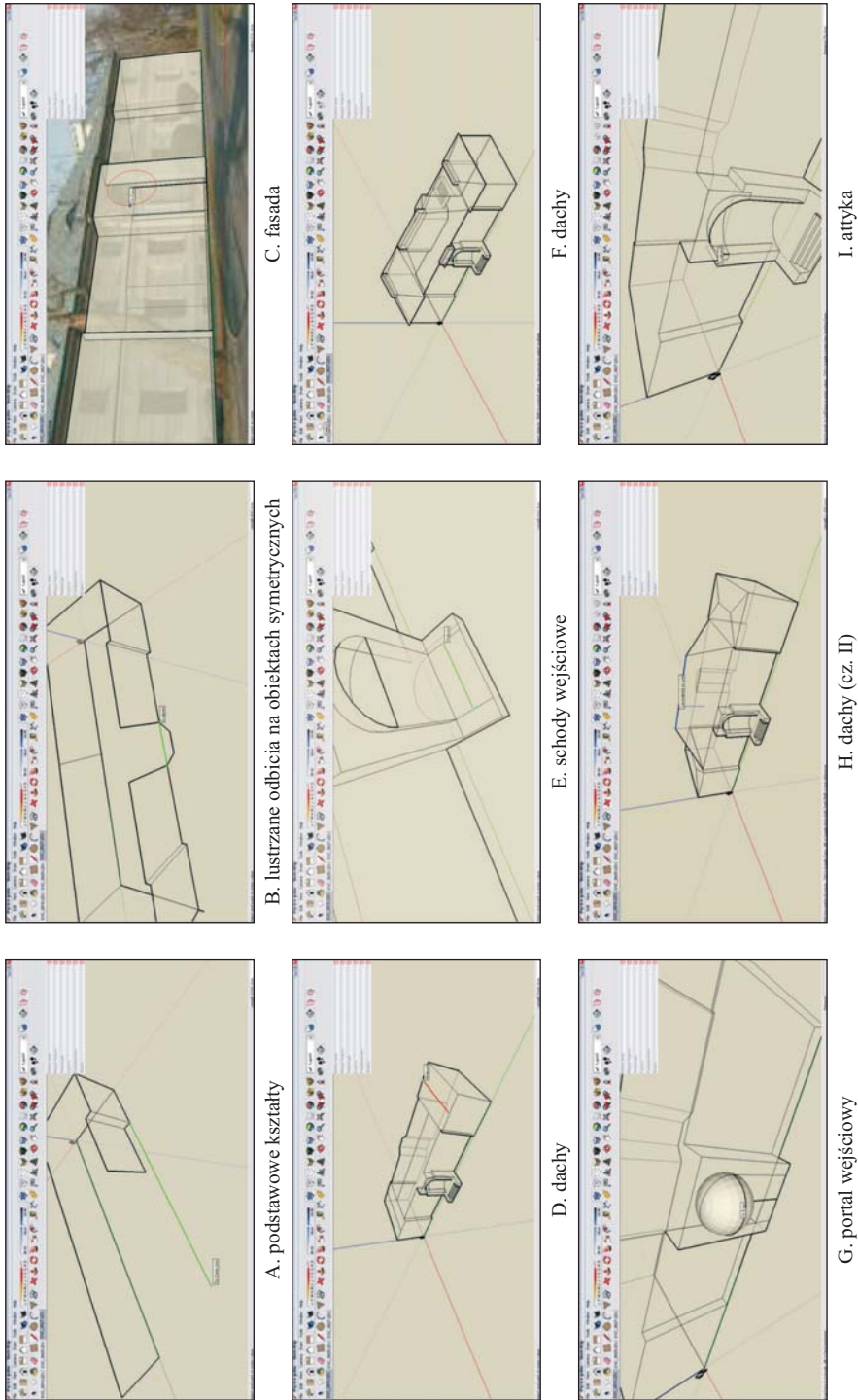
wyznaczamy niewiadomą t : $t = \frac{Q_{13}P_X + Q_{34}s}{Q_{12}P_X}$ i wstawiając, otrzymujemy równanie kwadratowe dla s . Z możliwych dwóch jego rozwiązań wybieramy to, które daje $c^2 > 0$ po wstawieniu do warunków (17).

MODELOWANIE 3^D

Coraz bardziej wymagający użytkownicy globalnej sieci Internet i/lub aparatów cyfrowych stymulują dynamiczny rozwój metod modelowania trójwymiarowego (inaczej wizualizacja geometryczna 3D). Przeszliśmy już etapy definiowania kształtu brył za pomocą linii szkieletowych (model drutowy), pokrywanie teksturą (rendering), oklejanie obrazami i osadzanie na numerycznym modelu terenu. Trójwymiarowy, fotorealistyczny model ułatwia inwentaryzację i badanie stanu geometrycznego obiektu, a udostępnianie modelu czy animacji w Internecie, na przykład przy zastosowaniu języka modelowania rzeczywistości wirtualnej VRML (Virtual Reality Modeling Language) lub formatu KML/KMZ (na potrzeby geo-browsersa Google Earth), sprzyja popularyzacji obiektu.

Definiowanie kształtu

Kształt obiektów trójwymiarowych definiujemy poprzez projektowanie lub inwentaryzację geodezyjną. W niniejszym opracowaniu zajmujemy się inwentaryzacją fotogrametryczną, a w szczególności jej uproszczoną wersją, przeznaczoną dla amatorów tworzących modele dla celów prezentacji lub promocji (ryc. 2).



Ryc. 2. Fazy modelowania Dworu Polskiego w Pęcicach (narzędzie SketchUp)
 Fig. 2. Overview of the 3D modelling phases based on the Dwór Polski Pęcice (Google SketchUp application)

Kształt obiektu określają płaty powierzchni i ich krawędzie. W praktyce rozróżniamy:

- model drutowy zbudowany z krawędzi:
 - prostoliniowych (TIN, GRID),
 - krzywoliniowych (stożkowe, spline);
- model płata stanowiący fragment powierzchni:
 - płaskiej,
 - zakrzywionej (kwadryki, NURBS).

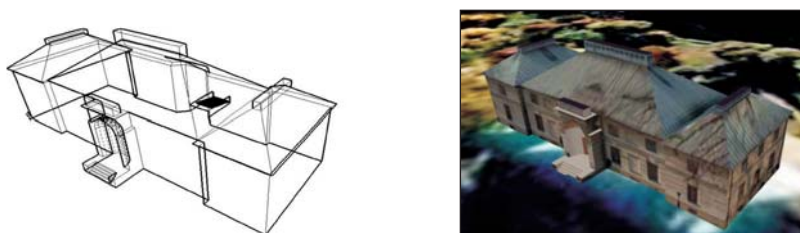
Jednym z najbardziej zaawansowanych narzędzi do określania dowolnych kształtów (np. rzeźb) jest program Rhinoceros [McNeel 2002] operujący standardem przemysłowym NURBS [Nowak i Nowak 2006]. Niestety, jest dostosowany tylko do projektowania. W praktyce wykorzystuje się programy typu CAD (np. AutoCAD, MicroStation, 3D-Studio).

Oklejanie powierzchni

Nakładanie na zidentyfikowane powierzchnie tekstur czy obrazów znacznie zwiększa atrakcyjność modeli. Rozróżniamy oklejanie poprzez:

- nakładanie regularnych tekstur;
- nakładanie obrazów (zdjęć):
 - transformacje płaskie (resampling),
 - przecięcia wiązki fotograficznej powierzchnią o znanym kształcie (monoplotting).

W ogólnodostępnych programach przeznaczonych do obróbki zdjęć cyfrowych najczęściej stosowany jest resampling (ryc. 3)



Ryc. 3. Model drutowy Dworu Polskiego w Pęcicach (strona lewa) oraz ten sam model z nałożonymi teksturami ze zdjęć poszczególnych ścian Dworu (strona prawa)

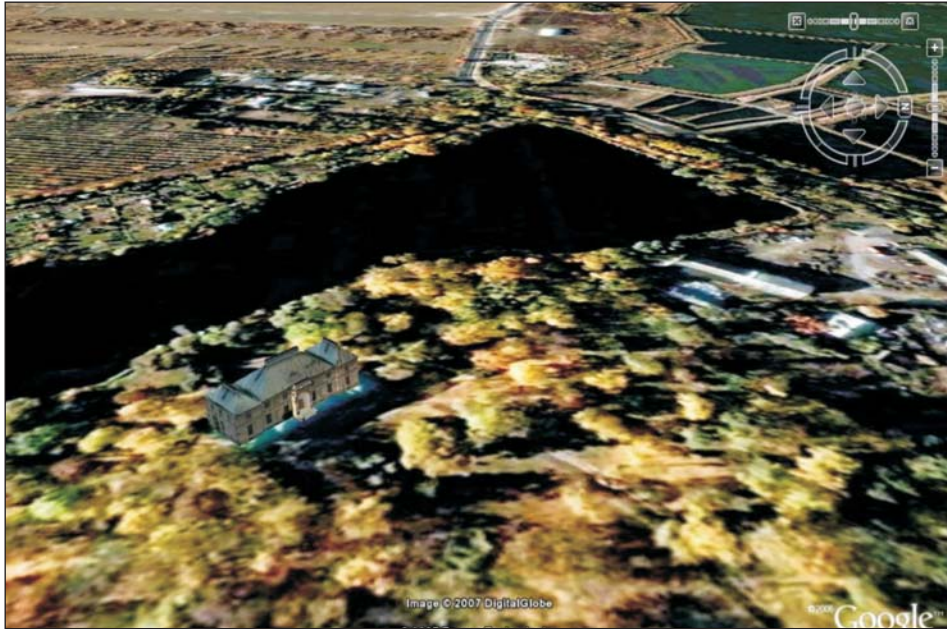
Fig. 3. Dwór Polski Pęcice wireframe (on the left), and the same model with building texture applied (on the right)

Bezpośrednia budowa modelu 3^D z amatorskich zdjęć cyfrowych

Opracowania architektoniczne i inwentaryzacja inżynierska były dotychczas domeną profesjonalnej fotogrametrii. Możliwości współczesnych aparatów cyfrowych (m.in. wysoka rozdzielczość obrazu, duża czułość matrycy CCD) umożliwiają szerokie zastosowanie zobrażeń niemetrycznych pozyskiwanych amatorskimi aparatami cyfrowymi, w tym do budowy modeli 3^D.

Dostępny od niedawna na polskim rynku system PI-3000 umożliwia automatyczne modelowanie powierzchni brył o dowolnym kształcie na podstawie ich zobrażeń. Eks-

perymenty przeprowadzone na Politechnice Gdańskiej i UWM w Olsztynie potwierdziły jego wysoką przydatność do wizualizacji geometrycznych 3^D z użyciem niometrycznych aparatów cyfrowych [Chmielewski i Szulwic 2005]. Niestety, system PI-3000 wymaga znajomości elementów orientacji wewnętrznej aparatów oraz współczynników dystorsji radialnej. Niewątpliwym ulepszeniem byłoby wykorzystanie orientacji wzajemnej dla różnych ogniskowych [Nowak i Nowak 1998], ale pozostałaby cena stanowiąca barierę dla amatorów.



Ryc. 4. Dwór Polski w Pęcicach (model drutowy oklejony obrazami w wyniku transformacji płaskiej, opublikowany w aplikacji Google Earth)

Fig. 4. Final model placed in its proper location (viewed within the Google Earth Application)

Udostępnienie przez koncern Google kompletu darmowych narzędzi [www.sketchup.com] na potrzeby użytkownika niekomercyjnego: PhotoMatch do budowy uproszczonego modelu wprost ze zdjęcia, gdzie elementy orientacji wewnętrznej i zewnętrznej wyznaczone są na podstawie dwóch punktów zbiegu, które z kolei są wyszukiwane metodą przecięć obrazów linii równoległych do osi układu terenowego wskazanych bezpośrednio na zdjęciu (ryc.1) oraz SketchUp do projektowania elementarnych kształtów w formie modelu drutowego i nakładania tekstur (ryc. 2) – znacząco przyczynia się do wzrostu popularności opracowania fotogrametrycznego zdjęć amatorskich, a przy tym daje możliwość łatwego komunikowania innym swoich osiągnięć (np. poprzez wstawienie modelu w KMZ do Google Earth (ryc. 4).

WNIOSKI

Trójwymiarowe modelowanie obiektów architektonicznych odwzorowanych za pomocą amatorskich aparatów cyfrowych utrudnia brak znajomości elementów orientacji wewnętrznej użytych aparatów oraz parametrów dystorsji (radialnej).

W naszej pracy, analizując matematyczne podstawy rzutu środkowego, wykazaliśmy możliwość wykonania pełnej orientacji wewnętrznej na podstawie perspektywicznych punktów zbiegu. Metoda pozwala na opracowanie zdjęć kadrowanych lub wykonanych z wykorzystaniem obiektywu zmiennoogniskowego (zoom). Z takimi zdjęciami mamy często do czynienia w praktyce, stąd omówienie sposobów znalezienia punktów zbiegu stanowi dużą część naszych badań. Jednocześnie zaprezentowaliśmy autorską metodę uzyskania współczynników dystorsji na podstawie obserwacji zniekształceń obrazu odcinków prostoliniowych, która umożliwia uniknięcie negatywnych skutków silnego skolelowania parametrów dystorsji z odległością obrazową.

Dalszych badań wymaga analiza dokładności i określenie warunków technicznych dla wykonania samokalibracji.

PIŚMIENNICTWO

- Abdel-Aziz Y.I., Karara H.M., 1971. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. *Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetry* (pp. 1–18). Falls Church, VA: American Society of Photogrammetry.
- Al-Ajlouni S., Fraser C.S., 2006. Zoom-Dependent Calibration for Consumer-Grade Cameras. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Dresden, Sept., Dresden, 35(5), 20–25.
- Chmielewski K., Szulwic J., 2005. Niemetryczne zdjęcia cyfrowe w fotogrametrii bliskiego zasięgu w systemie Topcon PI-3000. *Zeszyty Sesji Jubileuszowej 60-lecia Katedry Geodezji Politechniki Gdańskiej*, 17.06.2005, Gdańsk.
- Habib A., Ghanma M., Al-Ruzouq R., Kim E.M., 2004. 3-D Modelling of Historical Sites Using Low-Cost Digital Cameras, XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, Commission 5, SS4-CIPA-Low-Cost Systems in Recording and Managing the Cultural Heritage.
- Happach M., Nowak E., Nowak J., 2003. Amateur Photographic Recording Used To Rescue Works Of Cultural Heritage. *International Conference and Exhibition GIS Silesia 2003*; Sosnowiec, Poland.
- Hbrouk H.E., Li X.P., Faig W., 1996. Determination of Geometric Characteristics of a Digital Camera by Self-Calibration. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXI, Part B1, Vienna.
- Kraus K., 1992. *Photogrammetry, Volume 1. Fundamentals and Standard Processes*. Dümmlerbuch / Bonn. Institute for Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna University of Technology.
- Kraus K., 1997. *Photogrammetry, Volume 2. Advanced Methods and Applications*. Dümmlerbuch / Bonn. Institute for Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna University of Technology.
- Nowak E., Nowak J., 1998. Pozyskiwanie danych przestrzennych z fotografii amatorskich dla rekonstrukcji obiektów zniszczonych. *Mat. Międz. Konf. Nauk. „Ochrona i przetwarzanie danych”*, Ustroń.
- Nowak E., Nowak J., 2001. Building shape reconstruction on the basis of an amateur photograph. *International Conference GIS Polonia 2001*, Warszawa.

- Nowak E., Nowak J., 2005. Modelowanie układu pomiarowego amatorskiego cyfrowego aparatu fotograficznego. *Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej, seria konferencyjna nr 114/45. Geoinformacja dla wszystkich, XIX JSG, Wrocław, 263–273.*
- Nowak E., Nowak J., 2006. Aproksymacja kształtu obiektów trójwymiarowych wielomianami oraz NURBS – podejście niezawodnościowe. *85th Anniversary of the Faculty of Geodesy and Cartography, Warsaw University of Technology.*
- Nowak J., 2002. Badanie niezawodnościowych własności technik fotogrametrycznych w aspekcie zastosowań inżynierskich. *Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska.*
- McNeel R., (ed.), 2002. *Rhinoceros – NURBS modeling for Windows, Users Guide.*
- Tokarczyk R., Stanios I., 2004. Kalibracja cyfrowego aparatu fotograficznego z wykorzystaniem darmowej wersji programu Aerosys. *Przegląd Geodezyjny Nr 6/2004.*

MODELLING 3^D VIEWS BASED ON AMATEUR PHOTOGRAPHY

Abstract. Modelling three-dimensional objects (e.g. historical buildings) based on non-metric digital images is a complex task because the internal orientation and radial distortion parameters are unstable and unknown. In this paper, by analysing the mathematical basis of the central projection, the authors describe the feasibility of using the internal orientation of amateur photographs through the use of vanishing points (in a perspective drawing). The presented method is able to use zoomed photographs. Consequently, the paper also includes several ways of deriving the vanishing points analytically. The authors also propose a method for deriving the radial distortion parameters on the basis of the barrel/cushion effect. The advantage of this solution is the possibility to minimise the negative effects of the strong correlation between distortion parameters and the focal distance.

Key words: non-metric (amateur) photographs, 3D modelling, autocalibration, radial distortion, vanishing points

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 30.06.2009

Do cytowania – For citation: Nowak E., Nowak J., 2009. Modelowanie 3^D na podstawie fotografii amatorskich. *Acta Sci. Pol. Geod. Descr. Terr.*, 8(2), 39–52.