

WOJCIECH BYCHAWSKI

528.716

Metoda eliminowania wpływów zmian elementów orientacji przy fotogrametrycznym wyznaczaniu przemieszczeń

1. Wstęp

Wykorzystywanie fotogrametrii naziemnej do określania przemieszczeń w przestrzeni nie ma zbyt bogatych tradycji, a podejmowane próby na ogół nie dawały zadowalających wyników zwłaszcza w warunkach produkcyjnych. Przyczyną tego stanu rzeczy jest w głównej mierze to, że technologicznie opracowań oparte są na wykorzystywaniu modelu stereoskopowego. Badany obiekt fotografowany jest zwykle tak, aby można było utworzyć model stereoskopowy, który służy do określania terenowych współrzędnych punktów kontrolowanych. Jeżeli czynności te będą okresowo powtarzane, to z różnic współrzędnych będzie można sądzić o wielkości przemieszczeń. Mała efektywność takiego sposobu postępowania wynika z technologicznych trudności geometryzowania modelu stereoskopowego utworzonego ze zdjęć naziemnych, z trudności doprowadzania do porównywalności zbiorów punktów kontrolowanych wyznaczanych z różnych stereogramów, jak również z tego, że błędy identyfikacji takich punktów przenoszą się wprost na wielkości wyznaczanych przemieszczeń.

Przy opracowywaniu zdjęć naziemnych zawodzą zwykle metody wykorzystywane w fotogrametrii lotniczej. Chodzi tu przede wszystkim o inną konstrukcję geometryczną modelu stereoskopowego. Zmiana płaszczyzn fotogrametrycznego układu współrzędnych — bagatelna z punktu widzenia teorii — ma istotne znaczenie technologiczne. Rzecz bowiem w tym, że współrzędne płaskie (X , Y) są wyznaczane ze stereogramu zdjęć naziemnych z nierówną dokładnością. Powoduje to często trudne do opanowania perturbacje w procesie geometryzowania modelu, zwłaszcza że większość technologii zakłada usuwanie zniekształceń modelu na podstawie znanych współrzędnych fotopunktów. Dążenie do złagodzenia skutków tych trudności powoduje zwiększenie liczby fotopunktów i zmianę sposobu ich rozmieszczenia względem obiektu. Prace te z reguły powodują znaczny wzrost

kosztów prac polowych podważając nawet niekiedy sens ekonomiczny stosowania fotogrametrii. Dotyczy to zwłaszcza takich obiektów, których przemieszczenia mogą być scharakteryzowane małą liczbą punktów kontrolowanych, zbliżoną do wymaganej liczby fotopunktów.

Innym problemem jest stworzenie możliwości porównywania współrzędnych punktów kontrolowanych wyznaczanych z różnych stereogramów. Chodzi tu o zbiór punktów kontrolowanych, których współrzędne wyznaczono z dwóch stereogramów, na których zarejestrowano pierwotny i wtórny stan obiektu. Opracowując każdy z tych stereogramów operuje się zwykle nieco inaczej zorientowanym w przestrzeni układem współrzędnych. Dlatego też, aby współrzędne jednoimiennych punktów mogły być ze sobą porównywane, muszą być najpierw sprowadzone do wspólnego układu. W praktyce wykonuje się to za pomocą transformacji, której punktami łącznymi są fotopunkty. Ich współrzędne służą zarówno do geometryzowania modelu, jak i do wyrażania współrzędnych punktów kontrolowanych we wspólnym układzie odniesienia dla dwóch modeli. A zatem dokładność wyznaczania fotopunktów ma wpływ zarówno na stopień skorygowania zniekształceń modelu, jak też na usytuowanie w przestrzeni osi układu odniesienia, względem których wyrażane mają być przemieszczenia punktów kontrolowanych.

Słabością metody stereofotogrametrycznej jest też to, że obarcza ona wyznaczone przemieszczenia błędem identyfikacji. Nie chodzi tu oczywiście o przypadkowe błędy ustawiania znaczka pomiarowego na punkcie, który zdaniem obserwatora jest punktem kontrolowanym. Mowa jest tu bowiem o takim błędzie identyfikacji, który może popełnić obserwator, gdy w trakcie obserwacji modelu stereoskopowego wtórnego stanu obiektu usiłuje odnaleźć w przestrzeni modelu ten sam fizyczny punkt, który był zaobserwowany na modelu stanu pierwotnego. Tak rozumiany błąd identyfikacji jest trudny do wykrycia zwłaszcza w warunkach produkcyjnych, ponieważ obserwator jest z natury rzeczy bardziej skoncentrowany na utrzymywaniu wewnętrznej zgodności wyników obserwacji, niż na interpretacji i analizowaniu obrazu.

Opisana charakterystyka źródeł błędów określania przemieszczeń w przestrzeni za pomocą stereofotogrametrii naziemnej skłania do poszukiwania innego sposobu opracowań, który pozwoliłby na pełniejsze wykorzystywanie fotogrametrii. Na szczególną uwagę w tych poszukiwaniach zasługuje zjawisko tzw. *paralaksy czasowej*.

Termin paralaksa czasowa przyjął się stosunkowo niedawno. Pod tym pojęciem rozumie się zmianę współrzędnych tłowych punktu, który zmienił swoje położenie względem środka rzutów w czasie, jaki upłynął między ekspozycjami. Z tej definicji wynika, że zjawisko paralaksy czasowej może wystąpić tylko na zdjęciu naziemnym, gdyż tylko na takim zdjęciu

można wykonać dwie ekspozycje bez zmiany orientacji. O paralaksie czasowej można mówić również wówczas, gdy wykona się dwa lub więcej zdjęć przemieszczającego się punktu pod warunkiem, że orientacja bezwzględna tych zdjęć nie ulegnie zmianie.

Wystąpienie paralaksy czasowej jest równoznaczne ze stwierdzeniem faktu przemieszczenia punktu kontrolowanego natomiast jej brak nie oznacza wcale, że punkt nie zmienił swego położenia w przestrzeni. Mógł on się bowiem przemieścić wzdłuż promienia rzucającego. Ta wieloznaczność nie przeszkadza w dość powszechnym wykorzystywaniu paralaksy czasowej do określania przemieszczeń w przypadku, gdy wektory przemieszczeń mają widoczną tendencję do komplanarności. Wszędzie jednak tam, gdzie nie można wyróżnić uprzywilejowanego kierunku wektorów przemieszczeń, a więc tam, gdzie przemieszczenia dokonują się nie w płaszczyźnie, lecz w przestrzeni, wykorzystywanie zjawiska paralaksy czasowej nie jest tak oczywiste.

W praktyce paralaksę czasową rejestruje się z reguły na dwóch zdjęciach. Dochodzi zatem problem eliminowania zniekształceń paralaksy czasowej wywołanych niezamierzoną zmianą elementów orientacji zdjęć.

Mimo tych zastrzeżeń wykorzystywanie zjawiska paralaksy czasowej wydaje się być uzasadnione oczywistymi, widocznymi nawet na pierwszy rzut oka walorami, a mianowicie:

— Pomiar paralaksy czasowej jest bardzo łatwy. Obserwator spoglądając obuocznie na dwa bardzo podobne, nieomal identyczne zdjęcia nie ma trudności z identyfikowaniem na nich jednoimiennych punktów kontrolowanych. Ewentualny błąd identyfikacji wpływa na wielkość przemieszczenia tylko tyle, ile wynosi różnica przemieszczeń dwóch blisko siebie położonych punktów kontrolowanych.

— Określenie przemieszczeń w przestrzeni w oparciu o zjawisko paralaksy czasowej umożliwia wykorzystywanie środkowych części zdjęć zbieżnych.

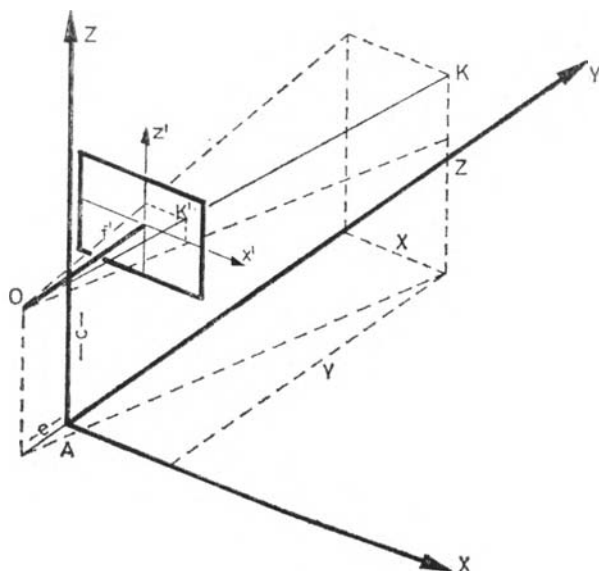
2. Koncepcja metody eliminowania wpływów zmiany orientacji fotogrametrycznych zdjęć naziemnych i określania przemieszczeń w przestrzeni z wykorzystaniem zjawiska paralaksy czasowej

2.1. Założenia wstępne oraz idea metody

Przyjmuję, że z punktu O (rysunek 1) wykonane zostało zdjęcie kamerą pomiarową o odległości obrazu f' .

Przyjmuję terenowy, prawoskrętny, przestrzenny układ współrzędnych X, Y, Z , który nazywać będę *układem zdjęcia pierwszego*. Oś Y tego układu jest prostopadła do płaszczyzny tłowej zdjęcia, natomiast oś Z pokrywa

się z pionową osią obrotu kamery pomiarowej. Początek tego układu leży w punkcie A (rysunek 1) i jest tak wybrany, że środek rzutów ma współrzędne $X_0 = 0$, $Y_0 = -e$, $Z_0 = c$. Wartości e i c , zwane dalej mimośrodkami środka rzutów (poziomym i pionowym), traktuję jako wielkości stałe i znane.



Rys. 1

Przyjmuję, że po pewnym czasie, w którym punkt K mógł być przemieszczony o pewną wielkość, zostało wykonane drugie zdjęcie o zbliżonej orientacji do zdjęcia pierwszego. Wzajemne usytuowanie obu tych zdjęć pokazują na rysunkach 2 i 3 w rzutach na dwie płaszczyzny układu współrzędnych pierwszego zdjęcia.

Układ oznaczony na rysunkach 2 i 3 osiami (X) , (Y) , (Z) , zdefiniowany jest względem drugiego zdjęcia tak, jak układ X , Y , Z , względem zdjęcia pierwszego. Początek układu drugiego zdjęcia A^{II} jest przesunięty względem początku układu zdjęcia pierwszego o wielkości ΔX , ΔY , ΔZ i jest on równocześnie środkiem obrotu w przestrzeni zdjęć względem siebie.

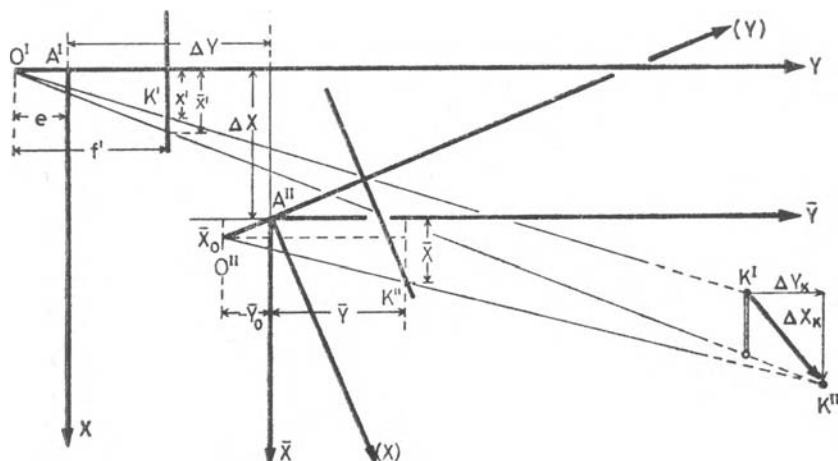
Zakładam, że punkt K (rysunek 2) przemieścił się w czasie, jaki upłynął między wykonaniem zdjęć z położenia pierwotnego K^I do wtórnego K^{II} . Składowe wektora przemieszczenia wyrażone w układzie zdjęcia pierwszego określam symbolami ΔX_K , ΔY_K , ΔZ_K .

Po wykonaniu obu zdjęć sytuacja jest następująca:

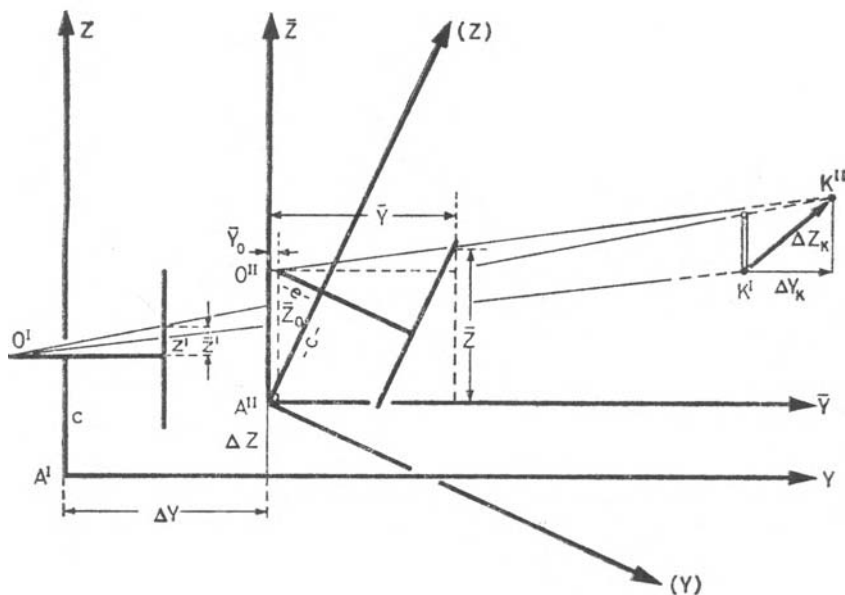
Na zdjęciu pierwszym znajduje się obraz pierwotnego położenia punktu K . Współrzędne tłów tego obrazu oznaczam przez x' , z' .

Na zdjęciu drugim jest obraz wtórnego położenia punktu K . Współrzędne tłowe tego obrazu oznaczam przez x'' , z'' .

W ogólnym przypadku wielkości współrzędnych tłowych x' i x'' oraz z' i z'' różnią się między sobą. Różnice te wywołane są przemieszczeniem punktu kontrolowanego K z położenia K^I do K^{II} (paralaksy czasowe), zmianą elementów orientacji zdjęcia drugiego względem pierwszego oraz systematycznymi i przypadkowymi błędami obserwacji współrzędnych tłowych i ich różnic.



Rys. 2



Rys. 3

Celem, do którego zmierzam jest określenie takich współrzędnych tłowych $\bar{x}'$, $\bar{z}'$, jakie byłyby na zdjęciu pierwszym, gdyby odfotografowało się na nim wtórne położenie punktu kontrolowanego. Wówczas bowiem określone byłyby w układzie zdjęcia pierwszego kierunki zarówno pierwotne, jak i wtórne, wcinające położenie punktu kontrolowanego ($O^I - K^I$ i $O^{II} - K^{II}$ na rysunku 2). Jeżeli taką samą sytuację uzyska się na zdjęciu pierwszym wykonanym z innego stanowiska, to gdy tylko znana będzie orientacja wzajemna dwóch pierwszych zdjęć, problem określania przemieszczeń w przestrzeni będzie — rzecz prosta — rozwiązany.

Współrzędne tłowe x'' , z'' obrazu wtórnego położenia punktu na zdjęciu drugim można wyrazić w układzie tłowym zdjęcia pierwszego, jeżeli znane będą elementy orientacji wzajemnej tych zdjęć. Operację przekształcenia można wówczas przeprowadzić w następujących etapach:

1. Wyrażenie wektora punktu zdjęcia drugiego w układzie zgodnie równoległym do układu zdjęcia pierwszego

$$\begin{bmatrix} \bar{X} - \bar{X}_0 \\ \bar{Z} - \bar{Z}_0 \\ \bar{Y} - \bar{Y}_0 \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} x'' \\ z'' \\ f' + \Delta f \end{bmatrix}, \quad (1)$$

gdzie $\mathbf{R}$ jest macierzą obrotu o kąty $\Delta\alpha$, $\Delta\varphi$, $\Delta\omega$, kolejno wokół osi (Y), (Z), (X).

2. Określenie takich współrzędnych tłowych na zdjęciu pierwszym, jakie byłyby, gdyby odfotografował się na nim punkt przemieszczony.

Z rysunku 2 wynikają następujące proporcje:

$$\frac{X + \Delta X_K - \Delta X - \bar{X}_0}{Y + \Delta Y_K - \Delta Y - \bar{Y}_0} = \frac{\bar{X} - \bar{X}_0}{\bar{Y} - \bar{Y}_0} \quad (2)$$

oraz

$$\bar{x}' = f' \frac{X + \Delta X_K}{Y + e + \Delta Y_K}. \quad (3)$$

Łącząc wyrażenia (2) i (3), po przekształceniach otrzymujemy:

$$\bar{x}' = \frac{f'}{Y + e + \Delta Y_K} \left[\frac{(\bar{X} - \bar{X}_0)}{\bar{Y} - \bar{Y}_0} (\bar{Y} - \Delta Y - \bar{Y}_0 + \Delta Y_K) + \Delta X + \bar{X}_0 \right]. \quad (4)$$

Z rysunku 3 wynika, że słuszne są proporcje:

$$\frac{Z + \Delta Z_K - \Delta Z - \bar{Z}_0}{Y + \Delta Y_K - \Delta Y - \bar{Y}_0} = \frac{\bar{Z} - \bar{Z}_0}{\bar{Y} - \bar{Y}_0} \quad (5)$$

oraz

$$\bar{z}' = f' \frac{Z - c + \Delta Z_K}{Y + e + \Delta Y_K}. \quad (6)$$

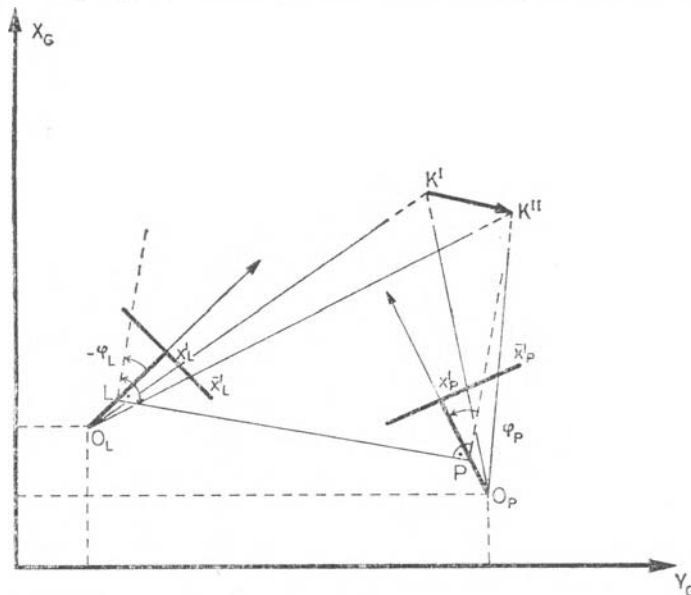
Uwzględniając we wzorze (6) wyrażenie (5) otrzymuję

$$z' = \frac{f'}{Y + e + \Delta Y_K} \left[\frac{(\bar{Z} - \bar{Z}_0)}{(\bar{Y} - \bar{Y}_0)} (Y - \Delta Y - \bar{Y}_0 + \Delta Y_K) + \Delta Z + \bar{Z}_0 - c \right]. \quad (7)$$

Występujące we wzorach (4) i (7) współrzędne środka rzutów drugiego zdjęcia w układzie równoległym do układu zdjęcia pierwszego można określić wzorem:

$$\begin{bmatrix} \bar{X}_0 \\ \bar{Z}_0 \\ \bar{Y}_0 \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} 0 \\ c \\ -e \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Znajomość współrzędnych obrazu wtórnego położenia punktu kontrolowanego w układzie tłowym zdjęcia pierwszego rozwiązuje problem określania przemieszczeń w przestrzeni pod warunkiem, że punkt kontrolowany fotografowany będzie dwukrotnie z dwóch różnych stanowisk.



Rys. 4

Ze stanowisk L i P (rysunek 4) wykonuje się pierwsze zdjęcia, na których odwzorowuje się pierwotne położenie punktu kontrolowanego K^I . Po pewnym czasie wykonuje się z obu stanowisk drugie zdjęcia obiektu. Na zdjęciach tych odwzorowuje się wtórny stan obiektu K^{II} .

Przyjmuję, że jeżeli znane są elementy orientacji zarówno pary zdjęć wykonanych ze stanowiska lewego, jak też i pary zdjęć wykonanych z prawego stanowiska, to można — wykorzystując wzory (4) i (7) — wy-

razić współrzędne tłowe na zdjęciach drugich w układach zdjęć pierwszych, otrzymując $\bar{x}'_L$, $\bar{z}'_L$, $\bar{x}'_P$, $\bar{z}'_P$. Teraz wystarczy znać współrzędne środków rzutów zdjęć pierwszych w jakimkolwiek układzie geodezyjnym (X_G , Y_G , Z_G) i kąty zwrotu kamer φ_L , φ_P , aby można było obliczyć współrzędne terenowe punktu kontrolowanego w geodezyjnym układzie współrzędnych.

Poszukiwane wielkości przemieszczeń w przestrzeni można określić wzorami:

$$\begin{aligned}\Delta X_G &= X_G^{\text{II}} - X_G^{\text{I}} \\ \Delta Y_G &= Y_G^{\text{II}} - Y_G^{\text{I}}, \\ \Delta Z_G &= Z_G^{\text{II}} - Z_G^{\text{I}}\end{aligned}\tag{9}$$

gdzie X_G^{II} , Y_G^{II} , Z_G^{II} zostaną obliczone z wzorów na fotogrametryczne wcięcie w przód po wstawieniu tam wielkości $\bar{x}'_L$, $\bar{z}'_L$, $\bar{x}'_P$, $\bar{z}'_P$, zamiast wielkości x'_L , z'_L , x'_P , z'_P , które służą do obliczania współrzędnych stanu pierwotnego.

Zaprezentowana w ideowym skrócie metoda dopiero wówczas będzie miała praktyczne znaczenie, gdy znane będą elementy orientacji wzajemnej zdjęć rejestrujących paralaksy czasowe.

2.2. Koncepcja sposobu wyznaczania zmian elementów orientacji zdjęć wtórnego stanu obiektu względem zdjęć stanu pierwotnego

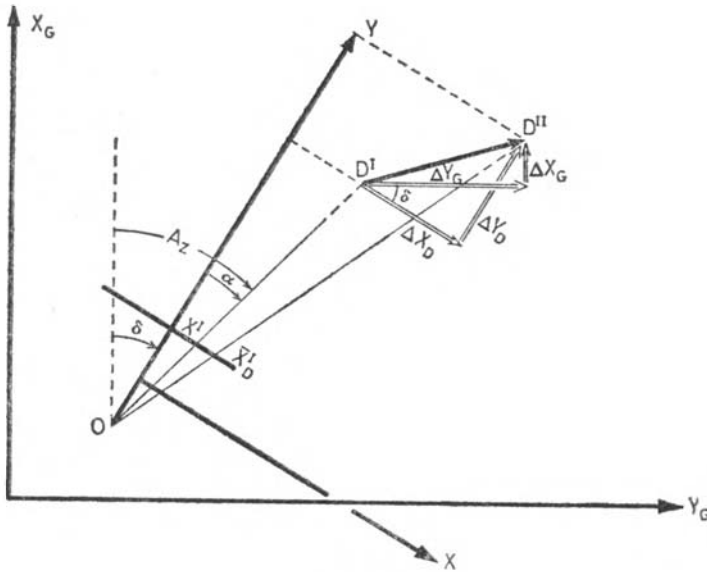
Dla każdego punktu, którego stan pierwotny odfotografował się na zdjęciu pierwszym, a stan wtórny na drugim można zestawić dwa równania zapisane wzorami (4) i (7).

Jeżeli znane będą wielkości przemieszczeń obserwowanego punktu, to równania te mogą być wykorzystane do określania zmian elementów orientacji.

Punkty, których przemieszczenia są znane, nazywać będą punktami dostosowania.

Przyjmuję, że przemieszczenia punktów dostosowania są pomierzone w terenie i że są dane w postaci trzech składowych ΔX_G , ΔY_G , ΔZ_G , w zdefiniowanym układzie współrzędnych. Układ ten, w ogólnym przypadku jest przesunięty i skręcony względem układu pierwszego zdjęcia. Na rysunku 5 przedstawiam sytuację, jaka może zaistnieć w płaszczyźnie poziomej.

Przyjmuję, że oprócz składowych przemieszczenia punktu dostosowania D znany jest kąt skręcenia A_z układu pierwszego zdjęcia względem układu geodezyjnego, w którym dane są składowe przemieszczenia. Sposób, w jaki kąt skręcenia układów będzie określony, pozostawiam inwencji geodety wykonującego prace polowe.



Rys. 5

Znajomość wielkości kąta skręcenia układów pozwala wyrazić składowe przemieszczeń punktu dostosowania w układzie pierwszego zdjęcia:

$$\begin{aligned}\Delta X_D &= \Delta Y_G \cos \delta - \Delta X_G \sin \delta, \\ \Delta Y_D &= \Delta X_G \cos \delta + \Delta Y_G \sin \delta,\end{aligned}\quad (10)$$

gdzie $\delta = A_z - \arctg \frac{x'}{f'}$.

Poszukiwaną wielkość odciętej tłowej obrazu przemieszczonego punktu dostosowania $\bar{x}'_D$ można określić z proporcji uzasadnionych rysunkiem 5:

$$\frac{\bar{x}'_D}{f'} = \frac{X + \Delta X_D}{Y + e + \Delta Y_D}, \quad X = \frac{(Y + e)}{f'} x',$$

skąd, po uwzględnieniu (10), otrzymuję

$$\bar{x}'_D = \frac{x' (Y + e) + f' [\Delta Y_G \cos \delta - \Delta X_G \sin \delta]}{Y + e + \Delta X_G \cos \delta + \Delta Y_G \sin \delta}. \quad (11)$$

Na rysunku 6 przedstawiam sytuację, jaka jest po przemieszczeniu punktu dostosowania w płaszczyźnie pionowej.

Wykorzystując widoczne na rysunku 6 zależności można zapisać:

$$\frac{\bar{z}'_D}{f'} = \frac{Z + \Delta Z_G - c}{Y + e + \Delta Y_D}, \quad Z = \frac{z'}{f'} (Y + e) + c$$

punktu stałego wynika, że $\Delta X_D = \Delta Y_D = \Delta Z_D = 0$, to aby zestawić równania dostosowania dla punktów stałych wystarczy te cechy punktów stałych uwzględnić w równaniach (14).

3. Opis metody wyznaczania zmian elementów orientacji

3.1. Wyznaczanie współrzędnych tłowych

Przyjmuję, że posługuję się stereokomparatorem Zeiss 1818 lub innym, lecz o tak samo skierowanych osiach pomiaru współrzędnych tłowych i paralaks. Posługiwanie się inaczej skonstruowanym stereokomparatorem nie zmienia istoty dalszego wywodu, lecz wymaga dostosowania znaków w poszczególnych operacjach rachunkowych.

Związki, jakie zachodzą między współrzędnymi w układzie tłowym zdjęcia pierwszego x' , z' i w układzie zdjęcia drugiego x'' , z'' , a odczytywanymi wielkościami paralaks podłużnej (p) i poprzecznej (q), można zapisać wzorami:

$$\begin{aligned} x'' &= [x' - (p)] \cos(KSP) - [z' - (q)] \sin(KSP), \\ z'' &= [z' - (q)] \cos(KSP) + [x' - (p)] \sin(KSP), \end{aligned} \quad (15)$$

gdzie (KSP) — kąt skręcenia prawego nośnika zdjęć względem lewego.

Wielkości określone wzorami (15) są tymi, które występują we wzorze (1).

3.2. Postać jawna równań dostosowania

Równania dostosowania (14) są nieliniowe względem niewiadomych. Dla zlinearyzowania tych równań przyjmuję, że poszukiwane elementy orientacji są wielkościami małymi. Upoważnia to do operowania macierzą małego obrotu.

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & -\Delta\alpha & \Delta\varphi \\ \Delta\alpha & 1 & -\Delta\omega \\ -\Delta\varphi & \Delta\omega & 1 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

jak również do pominięcia iloczynów niewiadomych, jako wielkości małych wyższego rzędu.

Współrzędne wektora punktu drugiego zdjęcia oraz współrzędne środka rzutów w układzie zgodnie równoległym do układu zdjęcia pierwszego, wykorzystując wzory (1), (8), (15) i (16), można przedstawić w postaci:

$$\begin{bmatrix} \bar{X} - \bar{X}_0 \\ \bar{Z} - \bar{Z}_0 \\ \bar{Y} - \bar{Y}_0 \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} x' - (p) - [z' - (q)] \Delta(KSP) + p_0 \\ z' - (q) + [x' - (p)] \Delta(KSP) + q_0 \\ f' + \Delta f \end{bmatrix}. \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{X}_0 \\ \bar{Z}_0 \\ \bar{Y}_0 \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} 0 \\ c \\ -e \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Wartości zapisane wzorami (17) i (18) występują w postaci ogólnej równań dostosowania (14). Postać jawna równań dostosowania (20) powstaje po podstawieniu do wzorów (14) wyrażeń określonych wzorami (17) i (18). Dla zachowania przejrzystości zapisu wprowadzam oznaczenie

$$Y'' = Y + \Delta X_G \cos \delta + \Delta Y_G \sin \delta = Y + \Delta Y_D. \quad (19)$$

Zachowuję również symbole $\bar{x}'_D$ i $\bar{z}'_D$, które oznaczają liczby określone na podstawie wzorów (11) i (12).

$$\begin{aligned} p_0 + \left[\frac{[x' - (p)]\bar{x}_D}{f'} + \frac{Y''f'}{Y'' + e} \right] \Delta \varphi - \left[\frac{[z' - (q)]\bar{x}_D}{f'} + \frac{[x' - (p)]c}{Y'' + e} \right] \Delta \omega - \\ - \left[z' - (q) + \frac{cf'}{Y'' + e} \right] \Delta x - [z' - (q)] \Delta (KSP) - \frac{\bar{x}_D}{f'} \Delta f + \\ + \frac{f'}{Y'' + e} \Delta X - \frac{[x' - (p)]}{Y'' + e} \Delta Y = \bar{x}_D - x' + (p); \\ q_0 + \frac{[x' - (p)]\bar{z}_D}{f'} \Delta \varphi - \left[\frac{[z' - (q)]\bar{z}_D}{f'} + \frac{[z' - (q)]c}{X'' + e} + \frac{Y''f'}{Y'' + e} \right] \Delta \omega + \\ + [x' - (p)] \Delta x + [x' - (p)] \Delta (KSP) - \frac{\bar{z}_D}{f'} \Delta f - \frac{[z' - (q)]}{Y'' + e} \Delta Y + \\ + \frac{f'}{Y'' + e} \Delta Z = \bar{z}_D - z' + (q). \end{aligned} \quad (20)$$

3.3. Wyznaczanie zmian elementów orientacji zdjęć

Równania dostosowania (20) zostały wprowadzone przy założeniu, że niewiadome są wielkościami małymi. Inne ograniczenia lub uproszczenia nie były jak dotąd wprowadzane. Okazuje się jednak, że pewne ograniczenia powinny być brane pod uwagę. Wynika to stąd, że współczynniki przy niektórych niewiadomych w równaniach dostosowania mało się różnią między sobą.

Wpływ składowych położenia punktu głównego (p_0 , q_0) na paralaksy czasowe jest bardzo podobny do wpływu zmiany położenia stanowiska fotografowania (ΔX , ΔZ). Dla wszystkich punktów położonych w tej samej odległości od stanowiska kamery współczynniki przy niewiadomych ΔX i ΔZ są sobie równe, a więc w układzie równań dostosowania spełniają tę samą rolę co wyrażenia p_0 i q_0 , występujące również ze współczynnikami równymi sobie. Podobna zależność może wystąpić między wpływami

zmiennych Δf i ΔY . Wpływ skrócenia fotogramu Δx , jakie może nastąpić w trakcie prac polowych jest bardzo podobny do wpływu skrócenia fotogramu $\Delta(KSP)$ w trakcie obserwacji. W równaniu podłużnej paralaksy czasowej współczynniki przy tych zmiennych różnią się jedynie mało znaczącym wyrazem $\frac{cf'}{Y''+e}$, natomiast w równaniach paralaksy poprzecznej współczynniki są takie same.

W ogólności można powiedzieć, że istnieje takie rozmieszczenie punktów dostosowania, przy którym równania dostosowania (20) są zależne liniowo. To stwierdzenie nakazuje ograniczenie liczby niewiadomych w równaniach zapisanych tymi wzorami.

Jeżeli równania (20), po już uzasadnionym wyeliminowaniu zmiennej $\Delta(KSP)$, przedstawi się w postaci skróconej:

$$\begin{aligned} p(\Delta\omega, \Delta\varphi, \Delta x, p_0, \Delta f, \Delta X, \Delta Y) &= p, \\ q(\Delta\omega, \Delta\varphi, \Delta x, q_0, \Delta f, \Delta Z, \Delta Y) &= q, \end{aligned} \quad (21)$$

to ograniczenie liczby niewiadomych, zgodnie z wykazanim podobieństwem wpływów liniowych elementów orientacji zewnętrznej i wewnętrznej na paralaksy czasowe, prowadzi do alternatywy:

1. Elementy orientacji zewnętrznej wyznacza się z równań:

$$\begin{aligned} p(\Delta\omega, \Delta\varphi, \Delta x, \Delta X, \Delta Y) &= p, \\ q(\Delta\omega, \Delta\varphi, \Delta x, \Delta Z, \Delta Y) &= q, \end{aligned} \quad (22)$$

albo

2. Zamiast wyznaczania liniowych elementów orientacji zewnętrznej wyznacza się elementy orientacji wewnętrznej z równań:

$$\begin{aligned} p(\Delta\omega, \Delta\varphi, \Delta x, p_0, \Delta f) &= p, \\ q(\Delta\omega, \Delta\varphi, \Delta x, q_0, \Delta f) &= q. \end{aligned} \quad (23)$$

Wybór jednego z tych wariantów zależy od cech opracowywanego obiektu, od warunków terenowych i posiadanego sprzętu.

Wariant 1, w którym określane są elementy orientacji zewnętrznej z równań (22), jest przydatny bardziej wówczas, gdy obiekt charakteryzuje się znacznym zróżnicowaniem odległości fotografowania jak też i wówczas, gdy istnieje obawa mało dokładnego odtworzenia stanowiska kamery przy wykonywaniu drugiego zdjęcia.

Wariant 2, w którym zamiast liniowych elementów orientacji zewnętrznej określane są elementy orientacji wewnętrznej (23) przydatny jest wówczas, gdy odległości od środka rzutów do punktów dostosowania nie są zbyt zróżnicowane oraz gdy nie budzi obaw stałość stanowiska fotografowania. Zyskuje się wówczas większą swobodę w trakcie obserwacji, jak też

możliwość wykonywania drugich zdjęć nie koniecznie tą samą kamerą pomiarową, co ma znaczenie w warunkach produkcyjnych.

Przedstawione tu kryteria wyboru wariantu nie są zbyt precyzyjne, a to głównie dlatego, że dla określania małych zmian elementów orientacji — a takie są tu brane pod uwagę — skuteczność obu tych sposobów jest zbliżona.

Względy praktyczne skłaniają raczej do stosowania wariantu pierwszego tzn. tego, w którym wykorzystywać należy wzory (22). Preferowanie tego wariantu uzasadnione jest ogólnym dążeniem do łagodzenia kryteriów prac polowych, nawet kosztem podniesienia stopnia trudności prac kameratechnicznych. Przyjmując zmienność składowych przemieszczenia stanowiska (ΔX , ΔY , ΔZ) uwzględnia się nie tylko ewentualny wpływ jego niestałości, lecz również zyskuje się większą swobodę przy terenowym odtwarzaniu położenia środka rzutów zdjęcia pierwszego przed wykonaniem drugiego zdjęcia. Ponadto, ponieważ każda zmiana stanowiska fotografowania może spowodować zmianę wielkości katowych elementów orientacji, zwłaszcza gdy miarą będzie drugi punkt bazowy, łączne usuwanie tych wpływów wydaje się być bardziej uzasadnione od rozłącznego, o którym jest mowa w wariantie 2. Przyjęcie wariantu 1 (22) oznacza, że elementy orientacji wewnętrznej (p_0 , q_0 , Δf) traktowane są jako niezmiennie. Nakłada to obowiązek wykonywania pierwszych i drugich zdjęć tą samą kamerą oraz zmusza do dużej staranności przy określaniu wielkości p_0 i q_0 podczas obserwacji paralaks czasowych.

W wyniku przeprowadzonej dyskusji można zapisać ostateczną, roboczą postać równań dostosowania, na podstawie których należy określać zmianę orientacji drugiego zdjęcia względem pierwszego. Równania te otrzymujemy uwzględniając w równaniach (22) odpowiednie zależności przedstawione wzorami (20).

$$\begin{aligned} & \left[\frac{[x' - (p) + p_0] \bar{x}_D}{f'} + \frac{Y'' f'}{Y'' + e} \right] \Delta \varphi - \left[\frac{[z' - (q) + q_0] \bar{x}_D}{f'} + \frac{[x' - (p) + p_0] c}{Y'' + e} \right] \Delta \omega - \\ & - \left[[z' - (q) + q_0] + \frac{c f'}{Y'' + e} \right] \Delta \kappa + \frac{f'}{Y'' + e} \Delta X - \frac{[x' - (p) + p_0]}{Y'' + e} \Delta Y = \\ & = \bar{x}_D - x' + (p) - p_0; \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} & \frac{[x' - (p) + p_0] \bar{z}_D}{f'} \Delta \varphi - \left[\frac{[z' - (q) + q_0] \bar{z}_D}{f'} + \frac{[z' - (q) + q_0] c}{Y'' + e} + \frac{Y'' f'}{Y'' + e} \right] \Delta \omega + \\ & + [x' - (p) + p_0] \Delta \kappa - \frac{[z' - (q) + q_0]}{Y'' + e} \Delta Y + \frac{f'}{Y'' + e} \Delta Z = \bar{z}_D - z' + (q) - q_0. \end{aligned}$$

Równania zapisane wzorami (24) mogą służyć do określania zmian elementów orientacji dwóch podobnie zorientowanych zdjęć, jeżeli na obu tych zdjęciach odfotografują się te same punkty dostosowania w liczbie

nie mniejszej od czterech. Wówczas można zestawić układ 8 równań z 6 niewiadomymi i określić najbardziej prawdopodobne wielkości niewiadomych.

4. Opis metody wyznaczania wielkości składowych przemieszczeń punktów kontrolowanych

Składowe przemieszczenia punktów kontrolowanych mogą być wyznaczone, gdy znane będą współrzędne tłowe $(\bar{x}', \bar{z}')$ odpowiadające wtórnemu położeniu punktu kontrolowanego na pierwszych zdjęciach wykonanych z dwóch różnych stanowisk. Wartości takich współrzędnych określone są równaniami zapisanymi w ogólnej postaci wzorami (4) i (7). Rozwinięta postać tych równań zapisana jest wzorami (24). Mogą one służyć również do obliczania poszukiwanych współrzędnych tłowych wtórnego położenia punktów kontrolowanych.

Chcąc z równań (24) wyznaczać wielkości $\bar{x}'$ i $\bar{z}'$, trzeba pamiętać, że równania te są nieliniowe względem tych wartości. Trzeba więc liczyć się z ewentualnością prowadzenia rachunku iteracyjnego.

Po obliczeniu współrzędnych tłowych wszystkich punktów kontrolowanych na podstawie pary zdjęć wykonanych z lewego punktu bazowego $(x'_L, z'_L, \bar{x}'_L, \bar{z}'_L)$ należy powtórzyć obliczenia wykorzystując parę zdjęć wykonanych z prawego punktu bazowego otrzymując wielkości $x'_P, z'_P, \bar{x}'_P, \bar{z}'_P$. Dane te umożliwiają obliczenie wielkości składowych przemieszczeń w przestrzeni na podstawie wzorów (9).

5. Wskazówki technologiczne

1. Punkty bazowe muszą być tak usytuowane względem obiektu, aby promienie wcinające fotogrametrycznych wcięć w przód przecinały się w przybliżeniu pod kątem prostym. W praktyce można dopuścić, aby kąty przecięcia się tych promieni (γ) zawierały się w granicach

$$65^\circ \leq \gamma \leq 135^\circ$$

Warunek ten jest równoznaczny warunkowi utrzymania stosunku bazowego (k) w granicach

$$0,6 \leq k \leq 1,8.$$

Kryteria te obowiązują zwłaszcza przy konstruowaniu wcięć punktów kontrolowanych. Fotogrametryczne wcięcia punktów dostosowania, potrzebne tylko do wyznaczenia odległości fotografowania, mogą mieć konstrukcję znacznie gorszą.

2. Punkty dostosowania muszą być tak usytuowane względem obiektu, aby przestrzenny zbiór punktów kontrolowanych znajdował się wewnątrz bryły, jaką można utworzyć łącząc skrajne punkty dostosowania.

3. Należy dążyć do tego, aby punktami dostosowania były punkty stałe. Jako punkt stały można uważać taki punkt, którego ewentualne przemieszczenie nie będzie miało widocznego wpływu na zmianę położenia obrazu punktu na zdjęciu. Punkt można uznać jako stały, jeżeli wielkości składowych przemieszczeń wyrażone w układzie zdjęcia będą spełniać warunki:

$$\begin{aligned} |\Delta X_D| = |\Delta Z_D| &< 0,003 \frac{Y}{f}, \\ |\Delta Y_D| &< 0,003 \frac{Y}{x'}, \\ |\Delta Y_D| &< 0,003 \frac{Y}{z'}. \end{aligned} \quad (25)$$

4. Stałe punkty dostosowania mogą być zmieniane — w sensie fizycznym — przy opracowywaniu kolejno wykonywanych zdjęć. Nie dotyczy to przemieszczanych punktów dostosowania. Dlatego też, jeżeli jest brak dostatecznej liczby punktów stałych, to należy dążyć do tego, aby zmiennymi punktami dostosowania były skrajne punkty kontrolowane.

5. Zdjęcia należy wykonywać kamerą pomiarową wyposażoną w obiektyw normalnokątny ($f = 200$, format 18×13). Kąty zwrotu należy tak dobrać, aby obiekt odwzorował się w środkowej części fotogramu. Zdjęcia wykonywane z różnych stanowisk mogą być wykonywane innymi kamerami.

6. Jeżeli zachodzi konieczność przyjęcia przemieszczanych punktów dostosowania, wówczas kryteria zapisane wzorami (25) określają dopuszczalne wielkości średnich błędów wyznaczania składowych przemieszczeń punktów dostosowania w układzie zdjęcia.

Przemieszczenia punktów dostosowania można zatem określać geodezyjnym wcięciem w przód ze stanowisk fotografowania o ile $\gamma > 65^\circ$

$$|m_\alpha| < 10^{CC}.$$

7. Należy dążyć do tego, aby te same punkty dostosowania mogły być wykorzystywane do określania zmian elementów orientacji zdjęć wykonanych z obu punktów bazowych. Jeżeli to nie jest możliwe, należy wykonać uzupełniający stereogram zdjęć, na podstawie którego należy określić odległości od punktów bazowych do punktów dostosowania.

8. Punkty bazowe należy zastabilizować w taki sposób, aby można było odtworzyć położenie środka rzutów z dokładnością rzędu kilku centymetrów i kąty zwrotu z dokładnością do 1° .

9. Najbardziej racjonalne jest wyznaczanie przemieszczeń w lokalnym układzie bazy fotografowania. Dopuszczalną wielkość błędu względnego pomiaru długości bazy określa wzór:

$$\frac{|m_b|}{b} \leq \frac{Y}{f} - \frac{|m_p|}{5|\Delta X_K|},$$

gdzie: m_b — średni błąd pomiaru bazy,

b — długość bazy,

m_p — średni błąd pomiaru poziomej paralaksy czasowej,

ΔX_K — największa spodziewana wielkość składowej przemieszczenia punktu kontrolowanego.

W Zakładzie Fotogrametrii Instytutu Geodezji i Kartografii został opracowany program obliczeń dla EMC ODRA 1204, obejmujący zarówno obliczenia wielkości zmian elementów orientacji zdjęć opisywaną metodą, jak też obliczenia wielkości przemieszczeń punktów kontrolowanych wraz z oceną dokładności. Autorem programu jest mgr inż. Witold Mizerski. Metoda ta jest wykorzystywana w praktyce produkcyjnej Okręgowego Przedsiębiorstwa Geodezyjno-Kartograficznego w Rzeszowie.

6. Przykłady zastosowań

Pierwsze zastosowanie metody paralaks czasowych dla określenia przemieszczeń w przestrzeni miało miejsce przy badaniu przemieszczeń i odkształceń bryły rufy statku w trakcie łączenia jej z kadłubem na pochylni. Badanie takie wykonałem na przełomie lat 1969/70, jeszcze w okresie wstępnego formułowania koncepcji zaprezentowanej w tej pracy. Otrzymałem wówczas średni błąd określenia przemieszczeń w przestrzeni rzędu $\pm 1,5$ mm ($\pm 0,015$ mm w skali zdjęcia). Po raz drugi metoda została wykorzystana przy badaniu trajektorii fragmentu kadłuba statku przesuwanego po pochylni na odległość kilkudziesięciu metrów. Uzyskałem wówczas dokładność rzędu $\pm 0,01$ mm w skali zdjęcia.

W tej pracy pragnę zaprezentować inny przykład. Do opracowania wykorzystałem zdjęcia i materiały wykonane przez b. Rzeszowskie Okręgowe Przedsiębiorstwo Miernicze.

Przedmiotem opracowania był fragment zapory w Solinie wraz z częścią budynku siłowni. Zdjęcia wykonane zostały dwoma fototeodolitami Zeiss Photo 19/1318 z dwóch punktów bazowych odległych od siebie o 158,2 metra. Zbieżność osi kamer wynosiła 85°.

Na powierzchni obiektu zasygnalizowano 3 punkty kontrolowane, których położenie zmieniono w czasie między wykonaniem zdjęć. Wielkość tych przemieszczeń pomierzono bezpośrednio. Przed rozpoczęciem kameeralnego opracowania wybrałem 13 punktów stałych, wykorzystując szcze-

góry sytuacyjne widoczne na zdjęciach. Skala lewego zdjęcia wynosiła od 1 : 480 do 1 : 930, a prawego od 1 : 425 do 1 : 840. Kąty przecięcia się promieni wcinających zawierały się w granicach od 63° do 110°. Stosunek bazowy mieścił się w przedziale od 0,5 do 0,9.

Spośród 16 punktów obiektu, sześć wykorzystałem jako stałe punkty dostosowania. Pozostałe dziesięć traktowałem jako punkty kontrolowane z tym, że siedem z nich było a priori punktami stałymi.

Obserwacje współrzędnych tłowych i paralaks czasowych wykonałem na stereokomparatorze Zeiss 1818. Przeciętna wielkość średniego błędu pomiaru paralaks czasowych wynosi $\pm 0,003$ mm.

Dostosowanie zdjęć wykonałem wykorzystując po 5 punktów dostosowania. Pozwoliło to zestawiać układy 10 równań z 6 niewiadomymi. W tabelicy 1 zestawilem wyniki uzyskane po rozwiązaniu układów równań dostosowania, przedstawione w postaci odchyłek V_x , V_z , które są miarą wpasowania współrzędnych tłowych punktów dostosowania określonych na zdjęciach drugich do układu współrzędnych tłowych zdjęć pierwszych. Wielkości tych odchyłek mogą być traktowane jako błędy prawdziwe dostosowania zdjęć. Świadczą one głównie o tym, w jakim stopniu zaproksymowana funkcja sześciu zmiennych eliminuje wpływ zmian orientacji zdjęć.

Tablica 1

Numer punktu dostosowania	Zdjęcie ze stanowiska lewego		Zdjęcie ze stanowiska prawego	
	$V_{x'L} = \bar{x}'_L - x'_L$ mm	$V_{z'L} = \bar{z}'_L - z'_L$ mm	$V_{x'P} = \bar{x}'_P - x'_P$ mm	$V_{z'P} = \bar{z}'_P - z'_P$ mm
11	0,000	0,000	0,000	+0,001
13	0,000	0,000	—	—
120	—	—	+0,002	+0,004
122	0,000	-0,001	0,000	-0,002
125	+0,001	+0,001	-0,007	-0,003
128	-0,001	-0,002	+0,005	0,000
$m_D = \sqrt{\frac{[vv]}{n}}$	0,000	$\pm 0,001$	$\pm 0,001$	$\pm 0,003$

Wielkości średnich błędów po dostosowaniu (m_D) są rzędu wielkości średnich błędów pomiaru paralaks czasowych. Oznacza to, że dostosowanie wykonane zostało na tyle dokładnie, że nie obarcza opracowania ponad to, co wynika z błędów obserwacji.

Następnie, zgodnie z procesem technologicznym, obliczyłem współrzędne tłowe punktów kontrolowanych ($\bar{x}'$, $\bar{z}'$) takie, jakie byłyby na pierwszych zdjęciach, gdyby mogły się na nich odfotografować punkty prze-

mieszczone. W tablicy 2 zestawiam wielkości paralaks czasowych punktów kontrolowanych, już nie obciążone wpływem zmian orientacji zdjęć.

W pierwszej części tablicy 2 zestawilem stałe punkty kontrolowane. Ponieważ paralaksy czasowe takich punktów powinny być równe zeru, to wielkości zapisane w tablicy 2 mogą być wykorzystane do obliczenia błędów prawdziwych wyznaczenia paralaks czasowych punktów kontrolowanych (m_K). Jak widać, błędy te są tego samego rzędu wielkości, co błędy dostosowania i błędy obserwacji paralaks czasowych.

Tablica 2

Numer punktu kontrolowania		Zdjęcie ze stanowiska lewego		Zdjęcie ze stanowiska prawego	
		$p_L = x'_L - x_L$	$q_L = z'_L - z_L$	$p_P = x'_P - x_P$	$q_P = z'_P - z_P$
Punkty stałe	12	+0,001	-0,001	0,000	+0,003
	15	0,000	-0,001	+0,004	+0,001
	16	+0,004	-0,003	+0,004	-0,001
	121	+0,001	-0,002	0,000	+0,001
	123	-0,004	+0,005	-0,006	-0,004
	124	-0,003	+0,001	+0,002	+0,001
	127	0,000	-0,002	+0,005	-0,008
Punkty przemieszczone	$m_K = \pm 0,002 \text{ mm}$		$\pm 0,003$	$\pm 0,004$	$\pm 0,004$
	110	+0,096	+0,013	+0,008	+0,011
	112	+0,148	+0,007	+0,091	+0,054
	113	-0,207	+0,009	-0,237	-0,059

Ostatnią czynnością było obliczenie wielkości składowych przemieszczeń. Wyniki tych obliczeń przedstawiam w tablicy 3.

W pierwszej części tablicy 3 zestawilem różnice terenowych współrzędnych punktów dostosowania, w drugiej części składowe przemieszczenia stałych punktów kontrolowanych, a w trzeciej składowe punktów przemieszczonych. Wielkości ΔX_K , ΔY_K , $(\Delta Z_K)_{\xi_T}$ liczone na punktach dostosowania i stałych punktach kontrolowanych umożliwiają obliczenie błędów prawdziwych wyznaczenia przemieszczeń w przestrzeni. Błędy te są ostatecznym wykładnikiem dokładności opracowania omawianą w tej pracy metodą.

Dodatkowym sprawdzianem uzyskanych dokładności określenia pionowych składowych przemieszczeń jest różnica δ_z z dwukrotnego ich obliczenia, raz ze stanowiska lewego i drugi raz z prawego. Wielkości tych różnic również zostały przedstawione w tablicy 3. Średnia arytmetyczna połowy wartości bezwzględnych tych różnic świadczy o otrzymanej dokładności. Wielkość tej średniej (1,2 mm) potwierdza otrzymaną wielkość błędu

Tablica 3

Nr punktu	$\Delta X_K = X^{II} - X^I$ mm	$\Delta Y_K = Y^{II} - Y^I$ mm	$(\Delta Z_K)_L = Z_L^{II} - Z_L^I$	$(\Delta Z_K)_P = Z_P^{II} - Z_P^I$	δZ (4) - (5)	$(\Delta Z_K)_{sr}$ mm
1	2	3	4	5	6	7
11	0,0	0,0	0,0	+0,6	-0,6	+0,3
13	+0,8	+0,5	-0,2	-0,9	+0,7	-0,6
120	-3,2	-1,0	-4,7	+3,7	-8,4	-0,5
122	0,0	0,0	-0,8	-1,6	+0,8	-0,4
125	+1,9	+2,6	+0,5	-1,3	+1,8	-0,4
128	-1,6	-1,9	-1,4	0,0	-1,4	-0,7
12	+0,5	-0,4	-0,5	+1,6	-2,1	+0,6
15	-1,1	-1,8	-0,3	-0,6	+0,3	-0,4
16	+1,4	-2,2	-1,8	-0,8	-1,0	-1,3
121	+0,9	-0,2	-1,8	+0,5	-2,3	-0,6
123	+0,8	+3,9	+1,7	-2,3	+4,0	-0,3
124	-2,0	0,0	+0,8	+0,9	-0,1	+0,8
127	-1,0	-2,2	-1,1	-4,5	+3,4	-2,8
m_Δ	$\pm 1,4$	$\pm 1,8$				$\pm 1,0$
110	+30,5	-35,0	+7,8	+1,1	+6,7	+4,4
112	+115,2	-112,0	+6,6	+5,1	-1,5	+5,8
113	-89,1	+145,0	-0,9	-3,8	+2,7	-2,4

$$\frac{1}{2n} \sum_1^n |\delta z| = \pm 1,2 \text{ mm}$$

prawdziwego wyznaczenia pionowej składowej przemieszczenia ($m_{\Delta z} = \pm 1,0 \text{ mm}$).

Kontrolę terenową metody przeprowadzono porównując otrzymane wielkości przemieszczeń punktów 110, 112, 113 z pomierzonymi bezpośrednio (przymiarem liniowym i niwelatorem) z błędem mniejszym od $\pm 1 \text{ mm}$. Uzyskano następujące różnice:

Punkt 110 $\delta_{\Delta x} = +0,2 \text{ mm}$; $\delta_{\Delta y} = -0,5 \text{ mm}$; $\delta_{\Delta z} = +0,2 \text{ mm}$

Punkt 112 $\delta_{\Delta x} = -0,7 \text{ mm}$; $\delta_{\Delta y} = +1,9 \text{ mm}$; $\delta_{\Delta z} = -1,3 \text{ mm}$

Punkt 113 $\delta_{\Delta x} = +1,3 \text{ mm}$; $\delta_{\Delta y} = -3,5 \text{ mm}$; $\delta_{\Delta z} = +1,1 \text{ mm}$

Wielkości te potwierdzają oszacowaną dokładność opracowania.

7. Wnioski

1. Przedstawiona w tej pracy metoda pozwala wyznaczać fotogrametrycznie składowe przemieszczeń w przestrzeni z dokładnością przeciętnie

trzykrotnie wyższą od otrzymanej stosowanymi obecnie metodami fotogrametrycznymi. Można przyjąć, że metoda paralaks czasowych pozwala wyznaczać składowe przemieszczeń w przestrzeni z dokładnością rzędu $1 : 50\,000 \div 1 : 70\,000$ odległości fotografowania. Dokładność ta odpowiada takiej, jaką można uzyskać geodezyjnym wcięciem w przód pod warunkiem, że kąty mierzone będą z dokładnością $\pm 6'' (\pm 2'')$ ze stanowisk, których współrzędne dane będą z błędem nie większym od ± 1 mm. Są to bardzo trudne do spełnienia warunki, wymagające dużego nakładu pracy i użycia kosztownych środków.

2. Uzyskanie tak wysokich dokładności jest możliwe w głównej mierze dzięki wykorzystaniu zjawiska paralaksy czasowej. Paralaksa ta jest funkcją wielkości poszukiwanych przemieszczeń z pominięciem sumy błędów, które powstają przy identyfikowaniu punktów obserwowanych i geometryzowaniu modeli stereoskopowych. Zaprezentowana metoda eliminuje wpływ błędów identyfikacji oraz pozostawia swobodę doboru wielkości kąta zbieżności osi kamer pomiarowych i ułatwia wykonanie obserwacji.

3. Podstawowym wymaganiem metody jest posiadanie w zasięgu fotogramu przynajmniej czterech właściwie rozmieszczonych punktów dostosowania. Najlepsze wyniki uzyskuje się wówczas, gdy punktami dostosowania są punkty stałe. Dopuszcza się również wykorzystywanie takich punktów dostosowania, których znane są wielkości przemieszczeń.

4. Prezentowana metoda należy do najbardziej ekonomicznych metod wyznaczania przemieszczeń przy użyciu fotogrametrycznych zdjęć naziemnych. Wynika to z wyeliminowania prac geodezyjnych, potrzebnych przy wyznaczaniu współrzędnych fotopunktów niezbędnych w dotychczas stosowanych metodach. Z posiadanych doświadczeń wynika, że metoda paralaks czasowych pozwala obniżyć pracochłonność opracowań o ok. 50% w stosunku do metod stereometrycznych.

L I T E R A T U R A

- [1] *Bychawski W., Mizerski W.*: Analityczne opracowanie pojedynczego stereogramu dowolnie zwróconych zdjęć naziemnych. Pr. IGIK nr 1/1970.
- [2] *Bychawski W., Nowosielski A.*: Obliczanie współrzędnych terenowych punktów wyznaczanych metodą fotogrametrii naziemnej z wykorzystaniem punktów o znanych współrzędnych geodezyjnych. Pr. IGIK nr 1/1968.
- [3] *Bychawski W.*: Wyznaczanie przemieszczeń i odkształceń obiektów przemysłowych przy użyciu fotogrametrii naziemnej. Inf. IGIK nr 3/1970.
- [4] *Fotogrametria Analityczna*. Praca zbiorowa. PPWK 1972.
- [5] *Laudyn I.*: Zastosowanie fotogrametrii naziemnej jednoobrazowej do wyznaczania odkształceń elementów budowlanych. Zesz. Nauk. Politech. Warsz. Geodezja nr 15/1965.
- [6] *Laudyn I.*: Wyznaczanie przemieszczeń poziomych zasuwy jazu stopnia wodnego metodą fotogrametrii naziemnej. Rękopis. Warszawa 1968.
- [7] *Majde A.*: Podstawy fotogrametrii analitycznej. WPW, Warszawa 1973.
- [8] *Majde A.*: Kilka uwag o osnowie terenowej dla fotogrametrycznych pomiarów obiektów inżynierskich. Rękopis. Warszawa 1970.
- [9] *Majde A., Niepokólczycki M.*: Wykorzystanie fototeodolitu Photo 19/1318 do dokładnych opracowań naziemnych. Prz. Geod. nr 10/1965.
- [10] *Majde A., Niepokólczycki M.*: Niestaołość elementów orientacji wewnętrznej w fototeodolicie Photo 19/1318 — przyczyny i sposoby usunięcia. Prz. Geod. nr 12/1965.
- [11] *Serdiukow W. M.*: Osnownyje formuly dla ocenki tocznosti opriedielenija prostranstwiennych koordinat pri fototieodolitnoj sjemkie. Podstawowe wzory do oceny dokładności określenia współrzędnych przestrzennych przy zdjęciach fototeodolitem. Inż. Geod. Mezw. Resp. nauc., Sb. 1973 nr 13.
- [12] *Sokołow W. I.*: Opyt ispolzowanija naziemnoj stieriefogrametrii w inżyniernych rabotach. Doświadczenia wykorzystywania stereofotogrametrii naziemnej w pracach inżynierskich. Geod. i Kartograf., Moskwa 1970, t. 15, nr 7.
- [13] *Totomanov I., Ivanov I. S.*: Edin nacin za analitica obrabotka na ziemni stereosnimki. Sposób analitycznego opracowania naziemnych stereogramów. Geod. Kartogr. Zemeustr. 1970 t. 10, nr 2.
- [14] *Valev G.*: Geodeziceskata zasacka napred i fotogrametricnoto zasicane. Geodezyjne wcięcie w przód i wcięcia fotogrametryczne. Geod. Kartogr. Zemeustr. 1970, t. 10, nr 3.

Rękopis złożono w Redakcji w październiku 1975 r.

ВОЙЦЕХ ВЫХАВСКИ

МЕТОД ИСКЛЮЧЕНИЯ (УСТРАНЕНИЯ) ВЛИЯНИЯ СМЕН ЭЛЕМЕНТОВ ОРИЕНТИРОВКИ ПРИ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОМ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Резюме

В работе рассмотрен новый метод устранения влияний смен элементов ориентировки наземной фотограмметрической съемки, а также способ определения перемещений в пространстве с использованием явления параллакса времени. Метод основан на многократном фотографировании из двух базисных точек комплекта (набора) опорных точек и контрольных точек. Опорными точками могут быть постоянные опорные пункты или пункты с известной величиной перемещения. На основе измеренного параллакса времени опорных точек устраняются деформации параллакса времени контрольных точек, появляющиеся ненамеренной сменой ориентировки съемки. Исправленные величины параллакса времени контрольных точек используются для определения составляющих величин перемещений в пространстве.

Метод разрешает трехкратно повысить точность фотограмметрических работ выполняемых в тех же самых условиях стереометрическим методом, при снижении трудоемкости полевых работ на около 50%.

WOJCIECH BYCHAWSKI

METHOD OF ELIMINATION OF ORIENTATION ELEMENTS
CHANGES EFFECTS IN PHOTOGRAMMETRIC DETERMINATION
OF SHIFTS

Summary

A new method of eliminating of orientation elements changes effects in the ground photogrammetric photographs and a method of shifts' determination in a space with the use of time parallax phenomenon are discussed in this paper. The method is based on taking a few photographs of a collection of readjustment and controlled points. The readjustment points can be the constant points or the points of known values of shifts. Due to the measured time parallaxes of the readjustment points the deformation of time parallaxes of the controlled points caused by unintended change of orientation of the photographs is eliminated.

Corrected values of the time parallaxes of the controlled points are used to determine the component values of shifts in a space.

The method allows to raise the accuracy of photogrammetric elaborations carried out in the same conditions by stereometric method lowering at the same time the labour consumption of the field works in about 50%.