

WOJCIECH BYCHAWSKI
WITOLD MIZERSKI

528.718:528.721.12(084.15)

Analityczne opracowanie pojedynczego stereogramu dowolnie zwróconych zdjęć naziemnych

WSTĘP

Metody fotogrametryczne, aczkolwiek znacznie bardziej ekonomiczne od wszelkich metod geodezyjnych, wymagają jednak posiadania szeregu informacji możliwych do uzyskania jedynie na drodze pomiarów geodezyjnych.

Współczesna myśl techniczna tworzy, z dużym powodzeniem, różnorodne sposoby opracowań pozwalające ograniczyć ilość informacji uzyskiwanych pomiarem geodezyjnym w polu, przenosząc ciężar prac z terenu do pracowni kameralnej. Taki kierunek rozwoju fotogrametrii wynika z rachunku ekonomicznego, praktyczne zaś realizowanie rozwiązań teoretycznych umożliwia elektroniczna technika rachunku.

Szczególne efekty na tym polu notuje fotogrametria lotnicza. Wykorzystując zależności geometryczne między zdjęciami tworzącymi szeregi i bloki uzyskano wielokrotne zmniejszenie ilości prac polowych bez utraty dokładności produktu finalnego, jakim zwykle bywa mapa.

Mniej korzystnie przedstawia się ta sprawa przy opracowaniach zdjęć naziemnych. Tu w dalszym ciągu opracowuje się je w oparciu o pełną osnoę każdego stereogramu, wyznaczoną pomiarem geodezyjnym.

Przyczyny takiego stanu rzeczy wywodzą się wprost ze specyfiki fotogrametrii naziemnej, pośrednio zaś z historii rozwoju tej dziedziny techniki. Przy wykonywaniu zdjęć naziemnych stosunkowo łatwo można uzyskać dużą ilość danych o elementach orientacji kamer pomiarowych bezpośrednio z pomiaru w terenie. Nawiasem mówiąc, możliwość ta spowodowała swego czasu burzliwy rozwój fotogrametrii naziemnej, później zaś, co jest swego rodzaju paradoksem, wpłynęła na wieloletni zastój a nawet regres jej rozwoju. Już dość dawno fotogrametria naziemna w zastosowaniach topograficznych uznana została za metodę dostatecznie poznaną, bez istotnej potrzeby modyfikacji i unowocześnienia sprzętu oraz procesu produkcyjnego. Dość powiedzieć, że współcześnie produkowany i używany fototeodolit Zeissa niewiele różni się od swego poprzednika z roku 1903,

zaś stereoautograf Zeissa 1318 zachował istotę działania i konstrukcji swego poprzednika z 1914 roku.

Ten stan rzeczy spowodowany był tym, że dla opracowań drobnoskalowych dokładność pomiaru elementów orientacji zewnętrznej w terenie była wystarczająca, bez potrzeby posiadania osnowy terenowej. Dla opracowań w większych skalach, wobec skromnych możliwości automatyzacji procesów rachunkowych oraz stosunkowo małych obszarów obejmowanych zdjęciami naziemnymi łatwiej było (a nawet i taniej) uzbrajać każdy stereogram w pełną osnowę, której punkty wyznaczane były pomiarem geodezyjnym, niż poszukiwać możliwości ograniczenia prac polowych z przeniesieniem ich ciężaru do prac kameralnych.

Od kilku lat notuje się ponowny wzrost zainteresowania fotogrametrią naziemną z jednoczesnym rozszerzeniem zakresu stosowności, szczególnie w pomiarach inżynieryjno-przemysłowych. Zainteresowanie to wywodzi się wprost z nieopłacalności stosowania fotogrametrii lotniczej dla zdjęć małych obszarów szczególnie tam, gdzie w grę wchodzi pomiar powtarzalny w stosunkowo krótkich odstępach czasu. W niektórych przypadkach zaistniała potrzeba opracowania zupełnie nowych sposobów wykorzystania zdjęć naziemnych, w innych zaś wystarczyło sięgnąć do nieco zapomnianych, lecz wypróbowanych metod stereoautogrametrycznych. Do tych drugich należą między innymi prowadzone na szeroką skalę prace związane z określaniem ilości wydobywanych mas w kopalnictwie odkrywkowym, zdjęcia geologiczne, badanie ruchów mas ziemnych sztucznych usypisk itp.

Opracowania stereoautogrametryczne zdjęć naziemnych przyniosły w tych przypadkach pokaźne zyski natury technicznej, organizacyjnej i ekonomicznej w stosunku do konwencjonalnych metod pomiaru.

Rzecz jednak w tym, że z nielicznymi wyjątkami, proces reaktywowania, na szerszą skalę, metody stereoautogrametrycznej skierowany został po linii najmniejszego oporu i opierał się na wiernej adaptacji całości cyklu produkcyjnego sporządzania mapy, z całym bagażem niedogodności wynikających z określania pełnej osnowy każdego stereogramu pomiarem terenowym. Dobrodziejstwo elektronicznej techniki rachunku wykorzystywane jest połowicznie i polega jedynie na automatyzacji obliczeń współrzędnych punktów osnowy w oparciu o kompletne pomiary geodezyjne.

Z teoretycznego punktu widzenia fotogrametria lotnicza i naziemna, w istocie swej, nie różni się między sobą.

Wiedza fotogrametryczna oznacza się bogactwem niezwykle efektywnych opracowań teoretycznych i rozwiązań praktycznych problemu określania elementów orientacji zdjęć lotniczych i kameralnego dogęszczania osnów. Mogłoby się wydawać, że nic nie stoi na przeszkodzie aby zaadoptować te rozwiązania dla potrzeb fotogrametrii naziemnej. W praktyce na-

potyka się jednak na zasadnicze trudności. Wynikają one z odmiennego charakteru rozkładu punktów na fotogramie.

W sensie geometrycznym metody wyznaczania elementów orientacji polegają na rozwiązywaniu zadania przestrzennego wcięcia wstecz w oparciu o znane współrzędne pewnej ilości punktów odfotografowanych na zdjęciu. Dlatego też punkty te rozmieszczone muszą być w obrębie fotogramu w specjalny sposób. Na zdjęciu naziemnym, w ogromnej większości przypadków zastosowań topograficznych, opracowany teren odfotografowuje się nie na całym fotogramie. Z konieczności więc punkty o znanych współrzędnych usytuowane mogą być na fotogramie jedynie w stosunkowo wąskim pasie, wzdłuż osi odciętych tłów. Przy takim rozkładzie punktów nie można liczyć na prawidłową konstrukcję przestrzennego wcięcia wstecz, a więc i na dostatecznie dokładne określenie elementów orientacji.

W tym stanie rzeczy podjęliśmy próbę opracowania takiego sposobu wyznaczania elementów orientacji zdjęć i określania współrzędnych, który uwzględni i wykorzystuje specyfikę zdjęć naziemnych.

Celem niniejszej pracy jest umożliwienie określania współrzędnych punktów stereogramu z taką dokładnością, aby można było na ich podstawie wykonywać opracowania numeryczne bądź analogowe (graficzne) w skali 1 : 1000 i mniejszej.

Najbardziej istotnym momentem proponowanego sposobu jest to, że uzupełniające pomiary geodezyjne wykonywane są tylko z końców baz fotografowania, a nie jak dotychczas z przynajmniej trzech innych punktów rozmieszczonych w specjalny sposób i znacznie nieraz od siebie oddalonych. Innym zasadniczym walorem jest to, że punkty wyznaczane nie muszą być specjalnie sygnalizowane.

Spodziewamy się obniżenia pracochłonności prac polowych o ok. 50% przy takich opracowaniach jak np. sporządzanie map sytuacyjno-wysokościowych zwałowisk mas ziemnych, pomiarów kamieniołomów, odkrywek geologicznych, określania objętości wydobytej masy kopaliny w górnictwie odkrywkowym itp.

1. Wyprowadzenie wzorów dla przypadku uogólnionego zdjęć naziemnych

Łatwość nadawania pożądanej orientacji kamerom pomiarowym w chwili wykonywania zdjęcia naziemnego spowodowała, że w praktyce stosuje się zwykle szczególne usytuowanie osi kamer, a mianowicie takie, w którym są one do siebie równoległe. Rozróżnia się, jak wiadomo, dwa przypadki:

1. Przypadek normalny tj. taki, w którym osie kamer są poziome i prostopadłe do kierunku bazy zdjęć;

2. Przypadek zdjęć zwróconych tj. taki, w którym osie kamer są poziome lecz tworzą z kierunkiem bazy pewien kąt.

Wykonywanie zdjęć normalnych lub zwróconych uzasadnione jest przede wszystkim prostotą wzorów określających współrzędne terenowe na podstawie współrzędnych tłowych i ich różnic (tj. paralaks). Prostota tych wzorów tak zafascynowała swego czasu fotogrametrów, że nawet sprzęt fotogrametryczny produkcji Zeissa (a tylko taki, praktycznie rzecz biorąc, jest dostępny) ogranicza w poważnym stopniu wykonywanie zdjęć o innej orientacji. Fototeodolitem Zeiss 19/1318 nie można wykonywać zdjęć nachylonych (ze znajomością kąta nachylenia) zaś na stereoautografie Zeissa 1318 ewentualna konwergencja osi kamer ograniczona jest do kilku zaledwie gradów.

Warto dodać, że podstawowe wzory fotogrametrii naziemnej zachowują pełną wartość użytkową tylko wówczas, gdy opracowywany obiekt mieści się w zasięgu jednego stereogramu. Związane to jest z przyjętym tam układem współrzędnych, którego jedna z osi pokrywa się z kierunkiem osi kamery pomiarowej ustawionej na lewym punkcie bazowym. Jeżeli wielkość obiektu przekracza zasięg jednego stereogramu, wówczas współrzędne określone wzorami podstawowymi przestają być produktem finalnym, gdyż bez rachunków transformujących traci się możliwość powiązania opracowań poszczególnych stereogramów. W takim przypadku konieczność uzbrojenia stereogramów w odpowiednią ilość punktów o znanych współrzędnych uzasadniona jest dwoma względami; korekcją orientacji zdjęć (strojenie) i transformacją.

Wobec tego, że podstawowym celem niniejszej pracy jest wyeliminowanie prac polowych polegających na wyznaczaniu współrzędnych punktów osnowy, w pierwszej kolejności należało ominąć niedogodności wynikające ze stosowania wzorów podstawowych. W dostępnych publikacjach z tego zakresu unika się na ogół operowania wzorami ogólnymi, ze względu na ich wielocłonowość i mało komunikatywną postać rachunkową. Z tego też względu w znacznym stopniu ogranicza się stosowanie bardzo korzystnych (z punktu widzenia dokładności wyników) zdjęć zbieżnych.

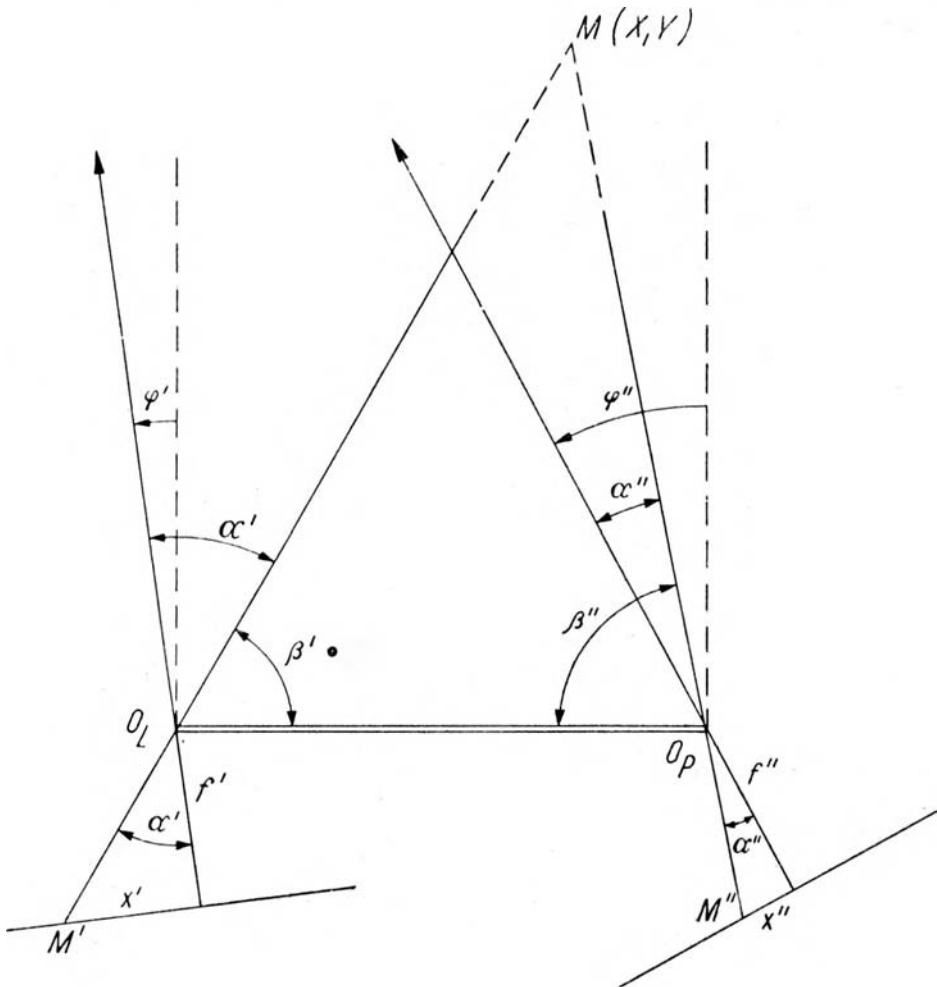
Niżej podajemy wyprowadzenie i ostateczną postać wzorów dla obliczenia współrzędnych terenowych na podstawie zdjęć wykonanych kamerami o osiach poziomych, dowolnie zwróconych (zbieżnych lub rozbieżnych), bez stawiania warunków wstępnych co do układu współrzędnych, w którym prowadzony będzie rachunek.

Wcięcie w przód nie przestaje być geometryczną interpretacją fotogrametrycznego sposobu określania współrzędnych również wtedy, gdy

zrezygnuje się z warunku równoległości osi kamer w płaszczyźnie poziomej. Obrazuje to rysunek 1.

Czynimy założenie, że znane są współrzędne środków rzutów $O_L (X_L, Y_L, Z_L)$ i $O_P (X_P, Y_P, Z_P)$ wyrażone w jakimkolwiek prostokątnym układzie współrzędnych.

Współrzędne punktu M (rys. 1) odfotografowanego na obu zdjęciach



Rys. 1

można określić przy znajomości kątów β' i β'' oraz współrzędnych punktów bazowych (środków rzutów) znanych z założenia.

Stosując oznaczenia przyjęte na rysunku 1, wobec tego, że punkt M jest punktem wciętym w przód, można napisać:

$$X = \frac{X_P \operatorname{ctg} \beta' + X_L \operatorname{ctg} \beta'' + (Y_P - Y_L)}{\operatorname{ctg} \beta' + \operatorname{ctg} \beta''} \quad (1)$$

$$Y = \frac{Y_P \operatorname{ctg} \beta' + Y_L \operatorname{ctg} \beta'' - (X_P - X_L)}{\operatorname{ctg} \beta' + \operatorname{ctg} \beta''}. \quad (2)$$

Z rysunku 1 widać że:

$$\beta' = 100^g + (\varphi' - \alpha'), \quad (3)$$

$$\beta'' = 100^g - (\varphi'' - \alpha''), \quad (4)$$

więc:

$$\operatorname{ctg} \beta' = -\operatorname{tg} (\varphi' - \alpha'), \quad (5)$$

$$\operatorname{ctg} \beta'' = \operatorname{tg} (\varphi'' - \alpha''), \quad (6)$$

skąd:

$$\operatorname{ctg} \beta' = -\frac{\operatorname{tg} \varphi' - \operatorname{tg} \alpha'}{1 + \operatorname{tg} \varphi' \operatorname{tg} \alpha'}, \quad (7)$$

$$\operatorname{ctg} \beta'' = \frac{\operatorname{tg} \varphi'' - \operatorname{tg} \alpha''}{1 + \operatorname{tg} \varphi'' \operatorname{tg} \alpha''}. \quad (8)$$

Z rysunku 1 wynikają zależności:

$$\operatorname{tg} \alpha' = \frac{x'}{f'}, \quad (9)$$

$$\operatorname{tg} \alpha'' = \frac{x''}{f''}. \quad (10)$$

Wobec tego:

$$\operatorname{ctg} \beta' = \frac{x' - f' \operatorname{tg} \varphi'}{x' \operatorname{tg} \varphi' + f'}, \quad (11)$$

$$\operatorname{ctg} \beta'' = -\frac{x'' - f'' \operatorname{tg} \varphi''}{x'' \operatorname{tg} \varphi'' + f''}. \quad (12)$$

Po uwzględnieniu wzorów (11) i (12) we wzorach (1) i (2) można uzyskać rozwiniętą postać wzorów dla przypadku uogólnionego zdjęć naziemnych. Postępowanie takie doprowadziłoby do utraty przejrzystości wzorów. Dlatego też zdecydowaliśmy posłużyć się formami rachunkowymi prof. Hausbrandta, tak ze względu na prostotę zapisu, jak również z uwagi na powszechne stosowanie ich w praktyce obliczeń geodezyjnych w Polsce oraz rosnące zainteresowanie zagranicą.

Wykorzystujemy pojęcia iloczynu wyznacznikowego, iloczynu kolumnowego oraz ilorazu głównego formy, co w zapisie ogólnym przedstawia się następująco:

Jeżeli forma ma postać tabeli

$$F \equiv \begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ c_1 & d_1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} a_2 & b_2 \\ c_2 & d_2 \end{vmatrix} \cdot \cdot \cdot \begin{vmatrix} a_n & b_n \\ c_n & d_n \end{vmatrix};$$

to iloczynem wyznacznikowym będzie wyrażenie

$$F_1 = \sum_1^n (a_i d_i - b_i c_i).$$

Iloczyn kolumnowy można zapisać jako

$$F_2 = \sum_1^n (a_i c_i + b_i d_i).$$

Iloraz główny wyraża się wzorem

$$F_0 = \frac{F_1}{F_2}.$$

W naszym przypadku zestawiamy formy:

$$F' \equiv \begin{vmatrix} x' & f' \\ \operatorname{tg} \varphi' & 1 \end{vmatrix}; \quad (13)$$

$$F'' \equiv \begin{vmatrix} x'' & f'' \\ \operatorname{tg} \varphi'' & 1 \end{vmatrix}. \quad (14)$$

Wzory (11) i (12) można teraz zapisać jako:

$$\operatorname{ctg} \beta' = \frac{F'_1}{F'_2} = F'_0, \quad (15)$$

$$\operatorname{ctg} \beta'' = -F''_0. \quad (16)$$

Łącząc wzory (1) i (2) z wyrażeniami (15) i (16) otrzymuje się:

$$X = \frac{X_P F'_0 - X_L F''_0 + (Y_P - Y_L)}{F'_0 - F''_0} \quad (17)$$

$$Y = \frac{Y_P F'_0 - Y_L F''_0 - (X_P - X_L)}{F'_0 - F''_0}. \quad (18)$$

Na podstawie wzorów (17) i (18) można obliczyć współrzędne terenowe (X , Y) dowolnego punktu odfotografowanego na dwóch zdjęciach, wykonanych z dwóch różnych punktów o znanych współrzędnych, przy znajomości współrzędnych łowych określanego punktu i danych wielkościach kątów zwrotu osi kamer w stosunku do bazy zdjęć.

Nie stawia się, jak widać, warunku równoległości osi kamer ani też nie

występuje konieczność stosowania kamer o jednakowej odległości obrazu. Ponadto, współrzędne obliczone z tych wzorów wyrażone będą w takim układzie współrzędnych, w jakim dane będą współrzędne punktów bazowych. Uzyskuje się więc pełną swobodę wyboru układu współrzędnych, której brak było w podstawowych wzorach fotogrametrii naziemnej dla przypadku zdjęć normalnych i zwróconych.

Obliczenie trzeciej współrzędnej punktu M (tj. Z), przy znajomości współrzędnych (X, Y) tego punktu obliczonych z wzorów (17) i (18), wysokości punktu $O_L (Z_L)$ lub $O_P (Z_P)$ oraz współrzędnych tłowych punktu M nie nastręcza większych trudności.

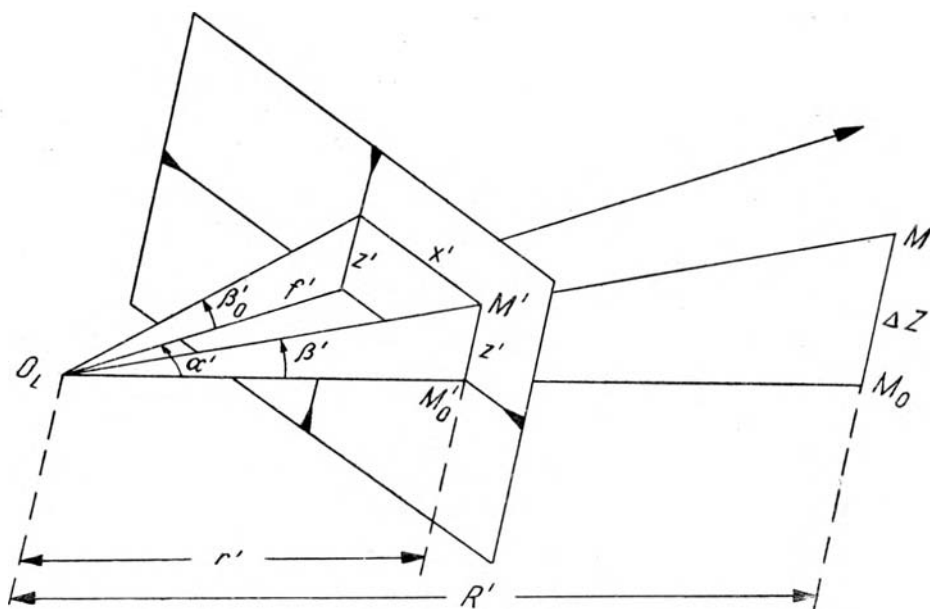
Szukaną wielkość można zapisać wzorem

$$Z = Z_L + \Delta Z' = Z_P + \Delta Z''. \quad (19)$$

Wielkość $\Delta Z'$ jest przewyższeniem punktu M względem O_L , podobnie jak $\Delta Z''$ względem O_P . Wobec identyczności postępowania w obu tych przypadkach rozpatrujemy postać

$$\Delta Z' = R' \operatorname{tg} \beta'. \quad (20)$$

Zależność ta widoczna jest na rysunku 2.



Rys. 2

Kąt pionowy β' można wyrazić w funkcji współrzędnych tłowych i odległości obrazu a mianowicie

$$\operatorname{tg} \beta' = \frac{z'}{\sqrt{(x')^2 + (f')^2}}. \quad (21)$$

Wobec tego:

$$\Delta Z' = \frac{R'}{\sqrt{(x')^2 + (f')^2}} z', \quad (22)$$

lub też:

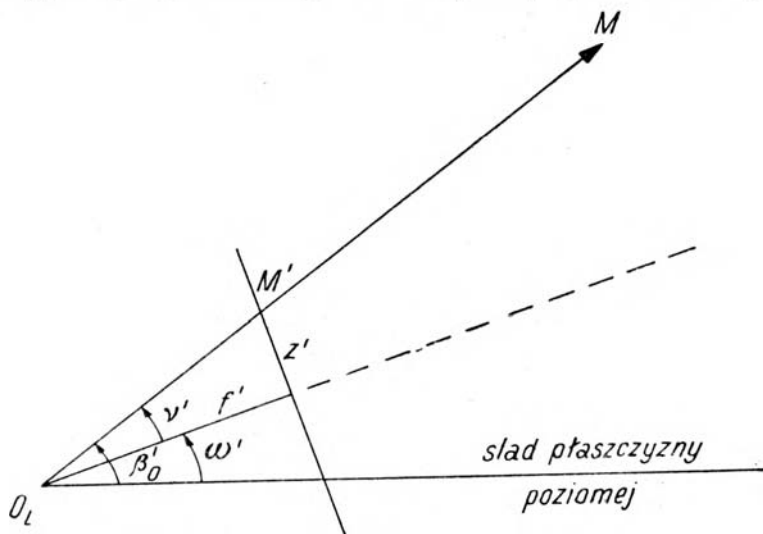
$$\Delta Z' = \frac{R'}{r'} z', \quad (23)$$

gdzie: R' — odległość od środka rzutów do punktu M obliczona z współrzędnych,

r' — odległość od środka rzutów do obrazu punktu M ,

x', z' — pomierzone współrzędne tłowe punktu M' .

Jeżeli kamera została nachylona, w płaszczyźnie pionowej zawierającej oś kamery, o kąt ω' , wówczas powstanie sytuacja pokazana na rysunku 3.



Rys. 3

Z rysunku widać, że

$$\beta'_0 = \omega' + \nu'. \quad (24)$$

Miedzy kątami β' i β'_0 zachodzi, widoczna na rysunku 2, zależność

$$\operatorname{tg} \beta' = \operatorname{tg} \beta'_0 \cos \alpha'. \quad (25)$$

Wobec tego wyrażenie (20) przyjmie postać

$$\Delta Z' = R' \operatorname{tg} \beta'_0 \cos \alpha'. \quad (26)$$

Opierając się na wzorze (24) można napisać

$$\operatorname{tg} \beta'_0 = \operatorname{tg}(\omega' + \nu') = \frac{\operatorname{tg} \omega' + \operatorname{tg} \nu'}{1 - \operatorname{tg} \omega' \operatorname{tg} \nu'}. \quad (27)$$

Ponieważ jednak

$$\operatorname{tg} \nu' = \frac{z'}{f'}, \quad (28)$$

to po przekształceniach będzie

$$\operatorname{tg} \beta'_0 = \frac{f' \operatorname{tg} \omega' + z'}{f' - z' \operatorname{tg} \omega'}. \quad (29)$$

Z rysunku 2 widać, że

$$\cos \alpha' = \frac{f'}{r'}. \quad (30)$$

Łącząc wzory (26), (29) i (30) otrzymuje się wzór na wielkość przewyższenia w przypadku nachylenia kamery o kąt ω'

$$\Delta Z' = \frac{R' f'}{r'} \left(\frac{f' \operatorname{tg} \omega' + z'}{f' - z' \operatorname{tg} \omega'} \right), \quad (31)$$

gdzie: ω' — kąt nachylenia osi kamery w płaszczyźnie pionowej przechodzącej przez środek rzutów lewego stanowiska (O_L) i oś rzędnych tłowych, mierzony od płaszczyzny poziomej zawierającej środek rzutów w kierunku odwrotnym do ruchu wskazówek zegara.

Przy wyprowadzaniu wzoru (31) nie stawialiśmy warunków co do wielkości kąta ω' lecz warunek taki istnieje. Wynika on z tego, że dla obliczenia przewyższenia wykorzystuje się współrzędne X i Y określone przy założeniu, iż osie kamer są w poziomie. Mówiąc o kącie nachylenia (ω') rozumie się, że nie jest to kąt zadany (jak przy zdjęciach nachylonych), lecz jest miarą nachylenia przypadkowego w granicach możliwości spoziomowania fototeodolitu. Jeżeli tak, to warto zwrócić uwagę, iż wyrażenie $z' \operatorname{tg} \omega'$, występujące w mianowniku wzoru (31), nawet dla (z') max osiąga wielkość poniżej dokładności obserwacji rzędnych tłowych i może być zaniedbywalne. Wobec tego wzór (31) przyjmie postać:

$$\Delta Z' = \frac{R'}{r'} (z' + f' \operatorname{tg} \omega'). \quad (32)$$

Wyrażenie $f' \operatorname{tg} \omega' = \text{const}$ dla wszystkich punktów fotogramu, może więc być traktowane jako stała poprawka do pomierzonych rzędnych tłowych.

2. Opis proponowanego sposobu określania współrzędnych

W obecnie stosowanych metodach rekonstrukcja kształtu wiązki promieni oraz jej usytuowanie w przestrzeni dokonywane są z wykorzystaniem związków, jakie zachodzą między znanymi współrzędnymi pewnej ilości punktów (fotopunkty) a ich współrzędnymi tłowymi. Wielkościami niewiadomymi są elementy orientacji zewnętrznej (rzadziej i wewnętrznej).

Proces ten, nieunikniony w przypadku zdjęć lotniczych, w metodach terrofotogrametrycznych stosowany jest ze względu na prostotę pojęciową jak również z uwagi na, omówione we wstępie, powszechne stosowanie wzorów dla przypadku zdjęć o osiach równoległych wymagających, jak wiadomo, prowadzenia rachunków transformujących.

Znajomość wzorów (17), (18) i (32), tj. zależności umożliwiających obliczanie współrzędnych w dowolnym układzie bez potrzeby transformacji, pozwala na zupełnie odmienne podejście do zagadnienia prawidłowej orientacji i kształtu wiązki w przestrzeni z wykorzystaniem specyficznych możliwości fotogrametrii naziemnej.

Wiedząc, iż błędy elementów orientacji powodują zmianę kształtu i położenia wiązki, wystarczy skoncentrować się w trakcie pomiarów terenowych na zdefiniowaniu tych parametrów. W przypadku fotogrametrii naziemnej łatwiej jest w terenie określić wprost dane dotyczące wiązki niż wyznaczać współrzędne niezbędnej ilości punktów, które w procesie rachunku posłużą do jej określania. Danymi tymi są kąty (lub kierunki) obserwowane w terenie, ze środka rzutów kamery pomiarowej między punktami terenowymi, które odfotografują się na fotogramie wykonanym z tego miejsca. Obserwacje te połączone z obserwacjami współrzędnych tłowych tych punktów umożliwiają przeprowadzenie cyklu rachunkowego, który w efekcie pozwoli wyznaczyć elementy orientacji wewnętrznej i wielkość kąta zwrotu kamery w chwili wykonywania zdjęcia.

Parametry te pozwalają odtworzyć wiązkę w przestrzeni przyjętego układu współrzędnych.

Odtworzenie wiązek obu fotogramów tworzących stereogram pozwala na realizację wcięg w przód dowolnej ilości punktów stereogramu, co rozwiązuje postawione zadanie.

2.1. Określenie parametrów wiązki

Kształt wiązki określają elementy orientacji wewnętrznej; odległość obrazu i położenie punktu głównego oraz dystorsja obiektywu kamery pomiarowej.

Położenie wiązki w przestrzeni określają elementy orientacji zewnętrznej; współrzędne środków rzutów oraz orientacja płaszczyzny tłowej względem osi układu tj. kąty zwrotu (φ), nachylenia (ω) i skręcenia (κ).

2.1.1. Określenie kształtu wiązki

Pod tym pojęciem rozumie się znalezienie takich parametrów, które pozwolą na odtworzenie najbardziej prawdopodobnego kształtu wiązki w stosunku do tej, która stworzyła obraz na płaszczyźnie tłowej w momencie ekspozycji.

Wiadomo, że błędy wynikające z różnego położenia płaszczyzny kliszy względem płaszczyzny ramki tłowej zniekształcają wiązkę i mają charakter błędów systematycznych. Zmniejszenie wpływu tych błędów może być dokonane różnymi sposobami, bądź na drodze mechanicznej korektury fototeodolitu, bądź na drodze analitycznej.

Z wielu sposobów analitycznych na szczególną uwagę zasługuje metoda przetwarzania płaszczyzny kliszy na płaszczyznę tłową oparta na związkach geometrii rzutowej. Sposób ten, propagowany przez prof. M. B. Pia-seckiego, znalazł praktyczne zastosowanie w eksperymencie przeprowadzonym na Politechnice Warszawskiej (A. Majde, M. Niepokólczycki, „Wykorzystanie fototeodolitu Photo 19/1318 do dokładnych opracowań naziemnych” — Przegląd Geodezyjny 10/1965).

W ramach prac obliczeniowych prowadzonych dla ilustracji niniejszego opracowania również badaliśmy walory tego sposobu. Mimo otrzymania znacznej poprawy wyników zdecydowaliśmy, w tym konkretnym przypadku, odstąpić od propagowania metody przetwarzania rzutowego. Skłoniły nas do tego względy praktyczne takie, jak konieczność wykonywania wzorca rozmieszczenia znaczków tłowych w płaszczyźnie tłowej („etalon”), konieczność zmiany sposobu obserwacji, brak kontroli i możliwości określania błędu przetwarzania (brak elementów nadliczbowych).

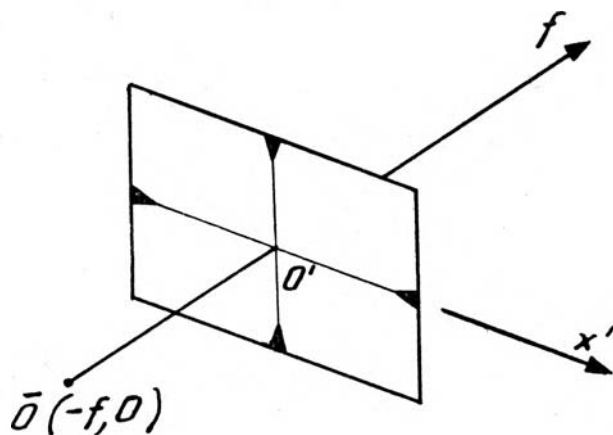
Decyzja taka przyszła tym łatwiej, że kierunki, obserwowane w zasadzie dla określenia elementów orientacji zewnętrznej, dostarczają wystarczającej ilości danych również dla korektury wpływów elementów orientacji wewnętrznej.

Zastosowany przez nas sposób prowadzi do określenia najprawdopodobniejszej wielkości odległości obrazu oraz składowej położenia punktu głównego wzdłuż osi odciętych tłowych.

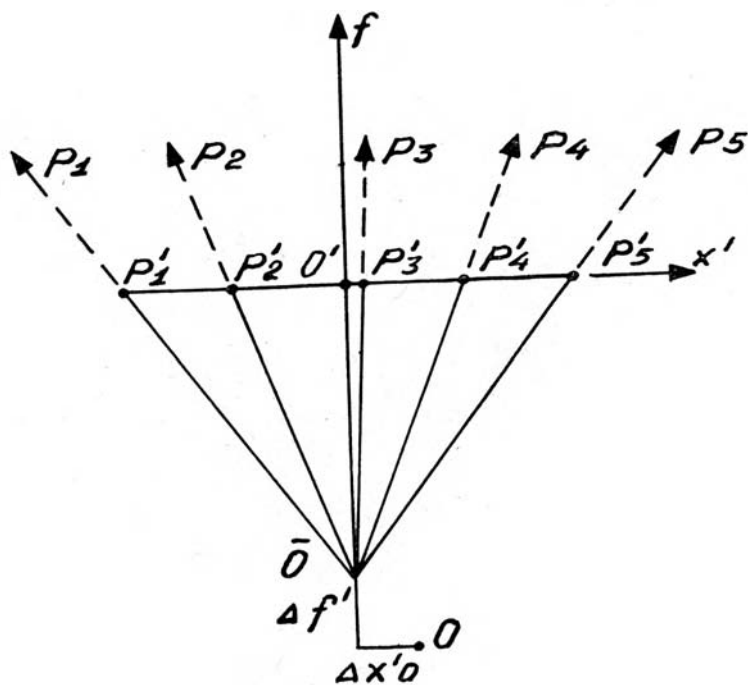
Sposób ten polega na obliczeniu współrzędnych środka rzutów wielokrotnym wcięciem wstecz z wyrównaniem metodą spostrzeżeń pośredniczących. Rachunek prowadzony jest w lokalnym układzie współrzędnych związanym z kierunkiem osi ociętych tłowych, niezależnie dla każdego fotogramu. Układ ten pokazany jest na rysunku 4.

Zakładamy, że w płaszczyźnie fotogramu dysponujemy np. obrazami pięciu punktów, między którymi pomierzono w terenie kąty poziome z punktu O (środek rzutów). Wówczas można rozpatrywać przypadek pokazany na rysunku 5.

Punktami danymi wcięcia są rzuty obrazów punktów P_i na oś odcię-



Rys. 4



Rys. 5

tych tłowych, które w przyjętym, na rysunku 4, układzie mają współrzędne $P_i'(O, x_i')$. Dane są również kąty (lub kierunki) pomierzone między tymi punktami ze środka rzutów.

Poszukuje się współrzędnych środka rzutów, których przybliżenie określone jest wielkościami $(-f, O)$, gdzie f jest fabrycznie daną odległością obrazu kamery pomiarowej.

W wyniku rachunku, przeprowadzonego wg znanych zasad wyrównania metodą sprostżeń pośredniczących, otrzymuje się poprawki do współrzędnych przybliżonych środka rzutów, wyrażone składowymi wzdłuż osi przyjętego układu (rys. 4), czyli wielkości $\Delta f'$ i $\Delta x'_0$ pokazane na rysunku 5.

W konsekwencji takiego postępowania otrzymuje się odległość obrazową

$$f' = f - \Delta f' \quad (33)$$

oraz możliwość poprawienia pomierzonych odciętych tłowych o wielkość $\Delta x'_0$.

Cała operacja prowadzi do sytuacji, w której suma kwadratów różnic między kątami pomierzonymi a obliczonymi z sum kątów określonych z wzoru

$$\alpha'_i = \arctg \frac{x'_i - \Delta x'_0}{f'} \quad (34)$$

jest najmniejsza. Sytuacja taka pozwala odtworzyć wiązkę, której kształt jest najbardziej zbliżony do faktycznego.

Takie określenie kształtu wiązki, będące nawiasem mówiąc tylko formalną odmianą znanego z podręczników sposobu, sprawdzone zostało na licznych przykładach i zdaje egzamin przydatności z tym jednak, że trzeba mieć na względzie dwie uwagi natury praktycznej a mianowicie:

1. Kąty (lub kierunki) mierzone w terenie z punktu fotografowania muszą być zredukowane ze względu na mimośród, jaki występuje między osią obrotu teodolitu a środkiem rzutów kamery pomiarowej ustawionej na tej samej spodarcie.

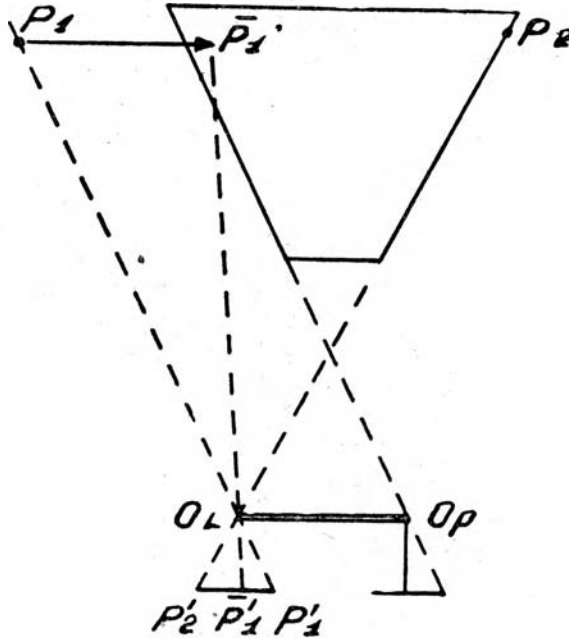
2. Obrazy punktów, między którymi wykonywane są obserwacje kąto-we, muszą być rozmieszczone w obrębie fotogramu w określony sposób.

Dla określenia poprawek z tytułu mimośrodu trzeba znać odległości od punktu fotografowania do punktu nacelowania. Ponieważ odległości te służą do obliczania wyrazów poprawkowych, dokładność określenia tych odległości nie musi być wysoka (nawet rzędu kilku metrów). Gdyby punkty te były punktami stereogramu, określenie odległości do nich nie wymagałoby wykonywania pomiarów dodatkowych (obliczenie w oparciu o współrzędne przybliżone określone fotogrametrycznie).

Powstaje jednak pytanie, czy przyjęcie punktów tylko w obrębie ste-

reogramu nie osłabi konstrukcji wcięcia wstecz, jakie jest realizowane przy określaniu poprawek do odległości obrazu i położenia punktu głównego.

Intuicyjnie jest zrozumiałe, że konstrukcja wcięcia jest tym lepsza, im bardziej rozwarty jest pęk celowych wcinających natomiast operowanie punktami stereogramu powoduje zwężenie pęku, co widać na rysunku 6.



Rys. 6

Rozpatrując rozkład punktów np. na lewym fotogramie, chcąc mieć możliwie najbardziej rozwarty pęk celowych, punkty skrajne powinny być umieszczone w pobliżu linii ograniczającej zasięg fotogramu, czyli tam, gdzie na rysunku 6 umieszczone są punkty P_1 i P_2 .

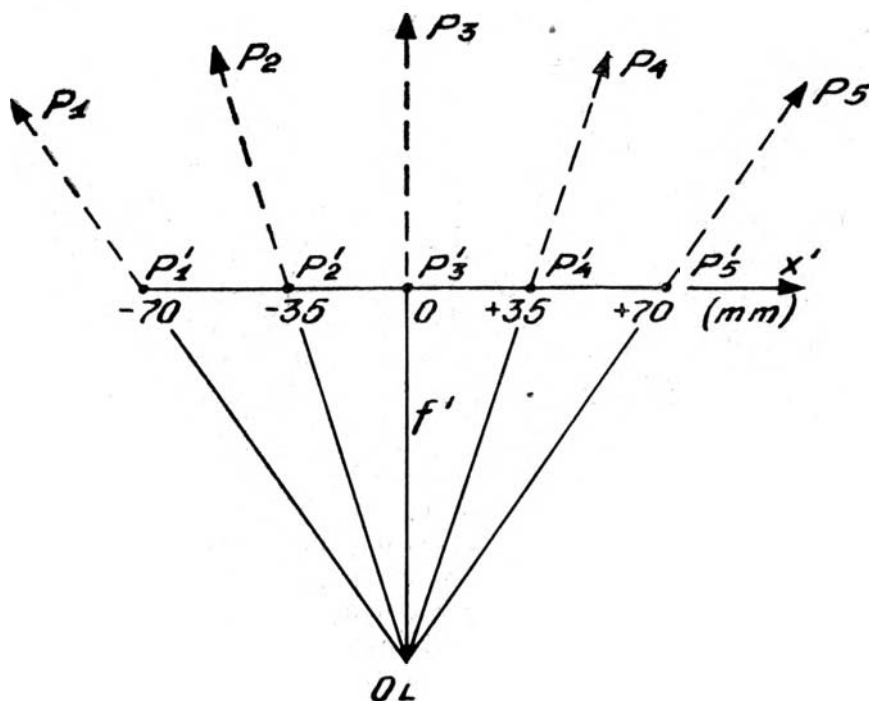
Chcąc łatwo znaleźć odległość do punktu P_1 (dla redukcji mimośrodów) trzeba by było umieścić go w zasięgu stereogramu, czyli przesunąć w terenie z położenia P_1 do $\bar{P}_1$ (ryc. 6). Wówczas jednak kształt pęku celowych ulega zmianie, zwęża się, więc konstrukcja wcięcia wstecz zmienia się na niekorzyść.

Przeprowadziliśmy badanie wpływu sposobu rozmieszczenia punktów P' na płaszczyźnie tłowej na wielkość średnich błędów wartości określanych w procesie wyrównania wielokrotnego wcięcia wstecz metodą spostrzeżeń pośredniczących. Badanie takie przeprowadziliśmy dla różnych wariantów rozmieszczenia punktów śledząc każdorazowo zmianę wielkości współczynników wagowych liczonych z odwrotności pierwiastka kanonicz-

nego tabeli kwadratów krakowianu współczynnika. Dzięki temu uzyskaliśmy możliwość wyciągnięcia praktycznych wniosków co do sposobu rozmieszczenia punktów, między którymi należy mierzyć kąty oraz rozwiązaliśmy dylemat czy, i w jakich warunkach, może nastąpić przesunięcie punktów skrajnych na fotogramie dla umieszczenia ich w zasięgu stereogramu.

Dla uzasadnienia, sprecyzowanych w dalszej treści, wniosków podajemy wyniki badania konstrukcji wcięć trzech charakterystycznych wariantów rozmieszczenia punktów.

Wariant 1: Punkty rozmieszczone regularnie na całym fotogramie (rys. 7) z wykorzystaniem maksymalnego zasięgu fototeodolitu Zeiss 19/1318 (± 70 mm).



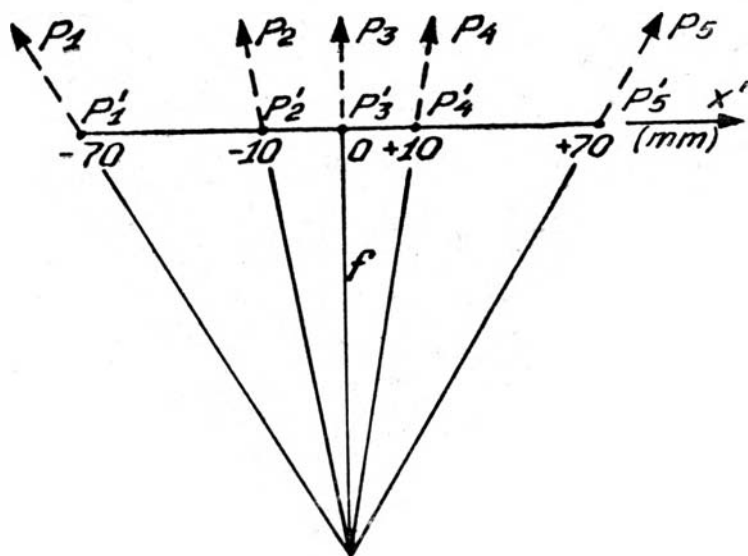
Rys. 7

Z rachunku, o którym była mowa, otrzymuje się:

$$m_f = \pm 0,000592 \, m_0,$$

$$m_{\Delta x_0} = \pm 0,002857 \, m_0.$$

Wariant 2: Punkty skrajne pozostawiono na granicy zasięgu fotogramu natomiast punkty środkowe przesunięte zostały bliżej osi kamery (rys. 8)



Rys. 8

Z rachunku otrzymuje się odpowiednio:

$$m_f = \pm 0,000666 m_0,$$

$$m_{\Delta x_0} = \pm 0,002450 m_0.$$

Warto zwrócić uwagę, iż przy niewielkim spadku dokładności wyznaczenia odległości obrazu, wzrosła dokładność wyznaczenia składowej położenia punktu głównego.

Wariant 3: Przyjeliśmy, że wszystkie punkty leżą w zasięgu stereogramu w odległości nie mniejszej niż dwudziestokrotna długość bazy fotografowania. Wówczas rozkład punktów na obu fotogramach będzie taki jak na rysunku 9.

Widać, że na obu fotogramach dysponujemy takim samym pękiem celowych, a więc dla zbadania jakości konstrukcji wystarczy rozpatrzyć wcięcie na jednym z nich. Po wykonaniu rachunku otrzymuje się:

$$m_t = \pm 0,000744 m_0.$$

$$m_{\Delta x_0} = \pm 0,002754 m_0.$$

Porównywanie wyników analizy tych trzech wariantów potwierdza przypuszczenie, iż trzeci z nich ma najsłabszą konstrukcję lecz jednocześnie wyraźnie widoczna jest nieznaczna tylko zmiana wielkości współczynników wagowych. Jeszcze lepiej jest to widoczne po wprowadzeniu do rozważań wartości liczbowej błędu obserwacji kątowych (m_0). Przyjmując, iż bez

większych trudności można w terenie wykonać pomiary kątowe z błędem nie większym od $\pm 20^{\text{cc}}$ otrzymuje się:

Wariant 1

$$m_f = \pm 0,01 \text{ mm},$$

$$m_{\Delta x_0} = \pm 0,06 \text{ mm}.$$

Wariant 2

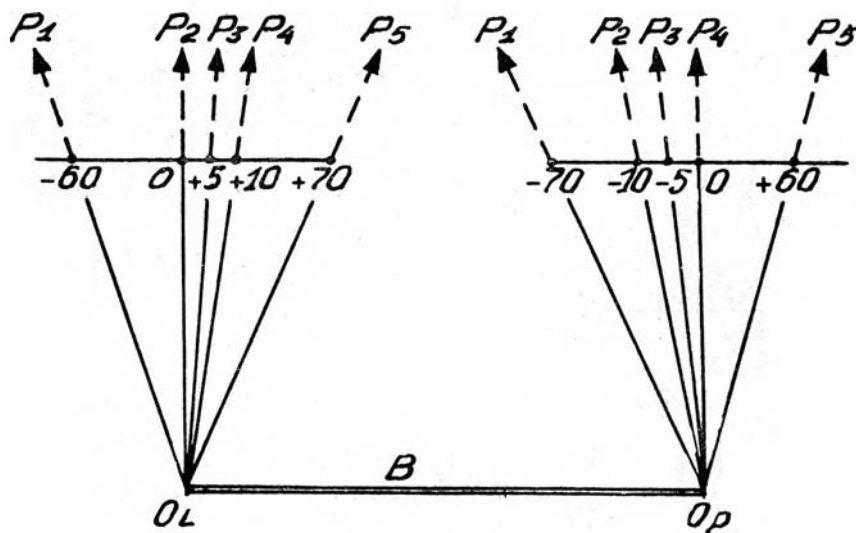
$$m_f = \pm 0,01 \text{ mm},$$

$$m_{\Delta x_0} = \pm 0,05 \text{ mm}.$$

Wariant 3

$$m_f = \pm 0,01 \text{ mm},$$

$$m_{\Delta x_0} = \pm 0,06 \text{ mm},$$



Rys. 9

Trzeci wariant, praktycznie rzecz biorąc równodokładny poprzednim, jest szczególnie korzystny z punktu widzenia praktyki gdyż:

1. Zmniejsza ilość punktów, między którymi trzeba mierzyć kierunki z siedmiu do pięciu.

2. Umożliwia, bez żadnych pomiarów dodatkowych, zredukowanie obserwacji kątowych ze względu na mimośród.

Powyższe stwierdzenia traktujemy jako uzasadnienie propagowania wielokrotnego wcięcia wstecz z wyrównaniem jako środka do eliminowania wpływów błędów elementów orientacji wewnętrznej.

Pozostawiamy otwarty problem wpływu dystorsji obiektywu na kształt wiązki. Do czasu opublikowania wyników, prowadzonych na Politechnice Warszawskiej, prac naukowych porządkujących ten problem w odniesieniu do obiektywów kamer naziemnych, zadawaliśmy się następującym rozumowaniem:

Krzywa dystorsji jest symetryczna względem osi łowych. Ponieważ wykorzystujemy przypadek względnie symetrycznego rozkładu punktów skrajnych (rys. 9) wpływ dystorsji spowoduje równomierne przemieszczenie się obu ramion kąta, a zatem powstanie zjawisko bardzo podobne do zmiany tego kąta z tytułu zmiany odległości obrazu. Ta zmiana jest jednak uwzględniona omówionym sposobem. Można więc twierdzić, że w procesie wyrównania wielokrotnego wcięcia wstecz, o którym była mowa, uwzględniony zostanie nie tylko wpływ nieprzylegania kliszy do ramki łowej lecz w dużej mierze również wpływ dystorsji.

2.1.2. Orientacja wiązki

Orientację wiązki w przestrzeni przyjętego układu (XY) dokonujemy, niezależnie dla każdego fotogramu, z wykorzystaniem współrzędnych punktów bazowych, pomierzonych w terenie kierunków oraz kątów obliczonych ze współrzędnych łowych.

Wyjaśnienie sposobu postępowania ułatwi rysunek 10, na którym przedstawiony jest przykładowo lewy fotogram stereogramu. Orientacja wiązki prawego fotogramu wykonywana jest w identyczny sposób.

W terenie zaobserwowany został kąt β (rys. 10) tj. kąt między kierunkiem do wybranego punktu M a kierunkiem o znanym azymucie. W najprostszym przypadku, kierunkiem o znanym azymucie niech będzie kierunek bazy fotografowania.

Kształt wiązki doprowadzony już został do postaci najbardziej zbliżonej do rzeczywistego, o czym była mowa w rozdziale 2.1.1. Wobec tego kąt α (rys. 10) obliczony z wzoru (34) może być traktowany tak, jak gdyby był pomierzony w terenie. Azymut osi kamery ustalający położenie wiązki w przestrzeni może być obliczony z wzoru

$$A_L = A_0 - (\alpha + \beta) \quad (35)$$

gdzie α jest kątem obliczonym ze współrzędnych łowych (34), zaś β został pomierzony w terenie.

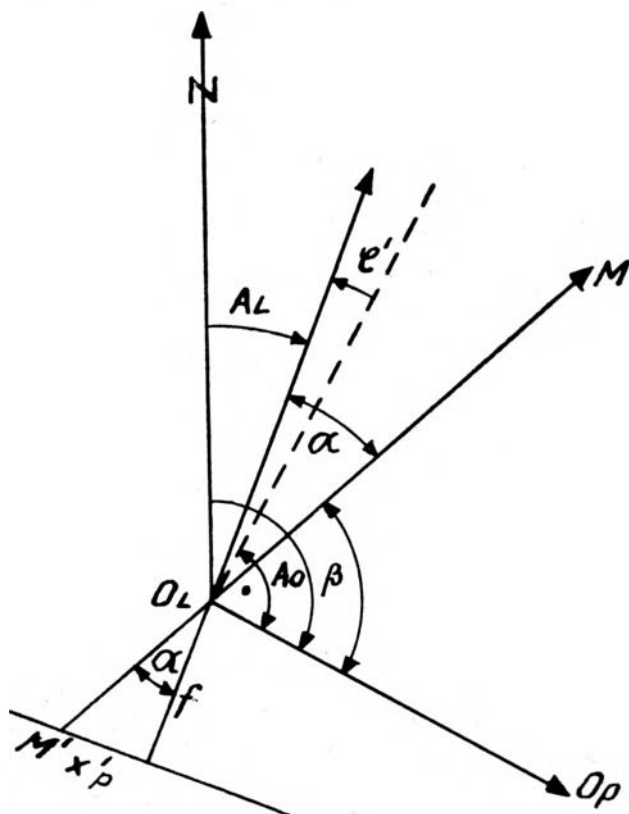
Z wzorów (17) i (18) widać, że azymut osi nie jest ich parametrem, natomiast występują kąty zwrotu φ' i φ'' . Jest to uzasadnione tym, że występujące tam współrzędne środków rzutów sprawiają, iż współrzędne liczone z (17) i (18) dane będą w takim układzie, w jakim dane są środki rzutów.

Nie było zatem potrzeby operowania pojęciem azymutu.

Z rysunku 10 widać, że

$$\varphi' = A_0 - (A_L + 100^g). \quad (36)$$

Znajomość jednego kąta β i współrzędnych tlowych jednego punktu, który leży na ramieniu kąta β , pozwalają jednoznacznie określić kąt zwrotu osi kamery.



Rys. 10

Operowanie tak obliczonym kątem zwrotu miałoby się jednak z celem, gdyż byłaby to wielkość równie mało dokładna jak i odłożona w terenie urządzeniem kątomierzem fototeodolitu.

W algorytmie obliczeń podanym w załączniku do niniejszej pracy przewidujemy możliwość określania wielkości kąta zwrotu jako średniej arytmetycznej z wielu wyznaczeń licząc się z tym, że tak ilość punktów M (więc i kątów β), jak również ilość kierunków o znanym azymucie może być dowolna.

Pozostawienie tak dużej swobody uważamy za konieczne z dwóch zasadniczych względów;

1. Kąt zwrotu liczony z wielu punktów (rys. 10), użyty następnie do obliczania współrzędnych punktów wyznaczanych z wzorów (17) i (18) powoduje bardziej równomierny rozkład błędów szczegółowych opracowania.

2. Wprowadzenie do obliczeń innych, niż tylko na drugi koniec bazy, kierunków o znanym azymucie pozwala w pewnym stopniu złagodzić kryteria dokładności centrowania nad stabilizacją punktów bazowych, pozwala również wyeliminować ewentualne omyłki przy identyfikowaniu punktów danych przy określaniu współrzędnych punktów bazowych, oraz podnosi dokładność opracowania.

W praktyce prac polowych pozostawienie swobody (lecz nie obowiązku) przyjmowania większej ilości kierunków o znanym azymucie traktować należy jako udogodnienie nie podnoszące, w istotny sposób, pracochłonności prac polowych. Wystarczy tylko łączyć kątowne pomiary geodezyjne prowadzone dla wyznaczania współrzędnych punktów bazowych w jedną całość z obserwacjami punktów P (rys. 9).

Uważamy za wskazane jeszcze raz podkreślić obowiązek redukcji obserwacji kątowych ze względu na mimośród środka rzutów względem punktu bazowego zdjęć. W algorytmie obliczeń czynność ta jest przewidziana. Omawianie jej w tekście uważamy za zbędne, ze względu na elementarny charakter sposobu rachowania mieszczący się w zakresie ogólnej wiedzy geodezyjnej.

2.2. Określanie współrzędnych punktów wyznaczanych

Po przeprowadzeniu operacji opisanych w rozdziałach 2.1.1. i 2.1.2. jesteśmy w posiadaniu elementów orientacji wewnętrznej obu fotogramów, które pozwalają na obliczenie z wzoru (33) kątów ze współrzędnych tłowych dowolnego punktu stereogramu. Posiadamy również elementy orientacji zewnętrznej tj. współrzędne środków rzutów i kąty zwrotu. Podkreślamy również, że obowiązuje założenie, iż osie kamer i osie odciętych tłowych są poziome.

Chcąc określić współrzędne X i Y dowolnego punktu od sfotografowanego na obu zdjęciach wystarczy:

1. Zaobserwować współrzędne tłowe na obu fotogramach.
2. Poprawić wielkości x' i x'' odpowiednio o $\Delta x'_0$ i $\Delta x''_0$ obliczone uprzednio zgodnie z programem czynności opisanych w 2.1.1.
3. Zrealizować wzory (17) i (18).

W ten sposób można otrzymać współrzędne X , Y dowolnej ilości punktów stereogramu przy czym:

1. Wybór punktów może być dokonany na podstawie obserwacji modelu stereoskopowego a nie w terenie.

2. Współrzędne wyrażone będą od razu w pożądanym układzie współrzędnych.

Określenie trzeciej współrzędnej (Z), w przypadku gdy osie kamer są w poziomie, nie nastręcza żadnych trudności. Znajomość rzędnych tłowych oraz współrzędnych (XY) pozwala zrealizować wzór (23) czyli określić przewyższenie w stosunku do osi kamery lewego bądź prawego zdjęcia. Wobec zakładanej znajomości rzędnych punktów bazowych, dla obliczenia rzędnych punktów wyznaczanych wystarczy pomierzyć w terenie wysokości ustawienia fototeodolitu nad punktami bazowymi.

Nachylenie osi kamery (ω), które jest uwidocznione we wzorze (32) rozumiane jest jako wielkość przypadkowa w granicach błędu poziomowania fototeodolitu. W przypadku gdy stanowisko fototeodolitu jest dostatecznie stabilne i pozwala utrzymać libelę w granicach 2 działek, wpływ powstałego w ten sposób kąta nachylenia jest dostatecznie mały dla opracowań w skali 1 : 1000 i może być pominięty w dalszych rozważaniach. Gdyby jednak wystąpiły trudności z utrzymaniem libeli w tych granicach, uwzględnienie wpływu nachylenia osi może być dokonane przez pomiar kątów pionowych. Wówczas wystarczy wykonać obliczenia średniego kąta nachylenia wg zasad określania średniej wartości kąta zwrotu, o czym była mowa w rozdziale 2.1.2. Pamiętać tylko trzeba, że pomierzone kąty pionowe muszą być zredukowane ze względu na dwa mimośrodowo środki rzutów (pionowy i poziomy).

3. Próbné zastosowanie proponowanego sposobu wyznaczania współrzędnych

Pełna analiza dokładności proponowanej metody może być przeprowadzona od strony teoretycznej, w oparciu o związki funkcyjne zespołu wyprowadzonych wzorów przy założeniu spodziewanych wielkości parametrów, może być jednak zilustrowana odpowiednio bogatym i różnorodnym materiałem doświadczalnym.

W tym przypadku wybraliśmy ten drugi sposób przedstawienia możliwości metody mając na uwadze jego większą komunikatywność.

Prace doświadczalne oparliśmy na materiałach fotogrametrycznych i geodezyjnych pola doświadczalnego założonego przez Zakład Fotogrametrii IGiK w 1967 r.

Pole to obejmuje około 80 punktów sygnalizowanych. Współrzędne ich wyznaczono wielokrotnymi wcięciami w przód, w lokalnym układzie, ze średnim błędem położenia ± 4 cm oraz średnim błędem wysokości ± 3 cm.

Materiały fotogrametryczne pola zawierają 10 fotogramów zdjęć naziemnych wykonanych fototeodolitem Zeissa 19/1318 z punktów o znanych współrzędnych. W obrębie każdego fotogramu mieszczą się wszystkie

punkty sygnalizowane. Fotogramy te pozwalają zestawiać różne kombinacje stereogramów zdjęć normalnych, zwróconych lub zbieżnych w wielu wariantach stosunków bazowych (odległość fotografowania $80 \div 400$ m).

W naszym przypadku przyjęliśmy dwa stereogramy zdjęć normalnych i dwa stereogramy zdjęć zwróconych w prawo o kąt 35° . Wybór podyktowany był typowymi, dla opracowań stereoautogrametrycznych, stosunkami bazowymi ($1 : 6 \div 1 : 14$) oraz możliwością wykorzystania istniejących obserwacji kątowych na punktach bazowych.

Obserwacje współrzędnych tłowych wykonaliśmy na stekometrze, w jednej serii.

W sumie dysponowaliśmy współrzędnymi tłowymi 273 punktów o znanych współrzędnych geodezyjnych.

Program prac eksperymentalnych przewidywał przeprowadzenie obliczeń różnymi sposobami dla możliwie pełnego sprawdzenia proponowanej metody pod względem uzyskiwanych dokładności.

W pierwszym rzędzie wykonaliśmy obliczenie współrzędnych punktów pola przy założeniu, że na każdym stereogramie znajduje się pięć punktów o znanych współrzędnych (fotopunktów) rozmieszczonych zgodnie z wymaganiami opracowań stereoautogrametrycznych. Obliczenie to miało określić wielkość średniego błędu wyznaczenia współrzędnych dla tych konkretnych warunków z wykorzystaniem wszystkich możliwości korektury błędów orientacji jakie dają obecnie stosowane metody pomiaru i obliczeń.

W drugiej wersji przeprowadziliśmy rachunek współrzędnych przy założeniu, iż nie dysponujemy fotopunktami, lecz znamy tylko współrzędne punktów bazowych i nominalne wielkości kątów zwrotu. W sensie pracochłonności prac polowych przypadek ten zbliżony jest do wymagań proponowanej metody. Warto dodać, że wyniki rachunku współrzędnych w tej wersji (tj. bez fotopunktów czyli bez możliwości transformacji) porównywalne są ze współrzędnymi geodezyjnymi tylko z uwagi na wykorzystywanie wyprowadzonych w tej pracy wzorów (17) i (18). Celem tego rachunku było zorientowanie się w wielkości średniego błędu wyznaczenia współrzędnych w przypadku minimalnej ilości prac polowych.

W końcu przeprowadziliśmy rachunek współrzędnych wg. zasad określonych w niniejszej pracy tj. bez znajomości fotopunktów, lecz z wykorzystaniem obserwacji kątowych wykonanych na punktach bazowych zdjęć.

W tablicy 1 przedstawiamy wielkości średnich błędów współrzędnych (w cm) oraz średnich błędów położenia liczonych z różnic między współrzędnymi obliczonymi a geodezyjnymi.

Przy analizie otrzymanych wyników na pierwszy plan wysuwamy zmianę wielkości średnich błędów w zależności od sposobu rachowania.

Tablica 1

Sposób określania współrzędnych	Stereogram 1				Stereogram 2				Stereogram 3				Stereogram 4			
	m_x (cm)	m_y (cm)	m_z (cm)	m_P (cm)	m_x	m_y	m_z	m_P	m_x	m_y	m_z	m_P	m_x	m_y	m_z	m_P
Z fotopunktami i transformacją	4	13	2	14	2	8	3	8	6	5	2	8	6	9	3	11
Bez fotopunktów, z nastawień nominalnych	4	25	2	25	3	21	3	21	13	15	2	20	7	9	3	11
Proponowaną metodą	3	8	2	8	2	6	2	6	6	6	2	8	5	8	2	9

Ponieważ we wszystkich trzech przypadkach rachunki były prowadzone w oparciu o identyczne współrzędne tłowe, widoczne zmiany wielkości średnich błędów są spowodowane wyłącznie odmiennością przyjętego sposobu rachunku. To właśnie było głównym celem eksperymentu.

Z tablicy 1 wyraźnie widać, że średnie błędy określenia współrzędnych proponowaną przez nas metodą są mniejsze od uzyskanych innymi sposobami rachunku.

Porównując wielkości średnich błędów położenia można stwierdzić, że proponowana metoda daje wzrost dokładności:

1. W stosunku do stereogramu z pełną osnową określoną pomiarem geodezyjnym, przeciętnie o 22%.

2. W stosunku do stereogramu bez osnowy geodezyjnej, przeciętnie o 54%.

Zważywszy ponadto, że prace polowe konieczne dla metody tu proponowanej są o ok. 50% mniej pracochłonne od tych, które trzeba wykonać dla uzbrojenia stereogramu w pełną osnowę geodezyjną, walory metody opisanej w tej pracy zdają się być udokumentowane.

Zupełnie osobnym zagadnieniem jest sprecyzowanie odpowiedzi na pytanie, czy dokładność wyznaczenia współrzędnych jest wystarczająca dla opracowań w określonej skali.

Odpowiedź ta może być dana po uwzględnieniu w tablicy 1 wielkości średnich błędów współrzędnych geodezyjnych. Zestawienie takie zawiera tablica 2.

Analizując tę tabelę, można na pierwszy plan wysunąć wielkości uzyskanych błędów. Przyjmując, iż dla opracowań w skali 1:1000 średnie błędy położenia punktu nie powinny być większe od 0,15 mm w skali zauważymy, że tak pierwszy jak i trzeci sposób rachunku zabezpieczają wymaganą dokładność.

Sposób drugi, rzecz jasna, nie pozwala na otrzymanie wymaganej dokładności. Wyniki te, nawiasem mówiąc, są uzasadnieniem konieczności korygowania wpływów elementów orientacji zdjęć. Innymi słowy, gdyby model stereoskopowy nie był korygowany, opracowanie wykonane na podstawie takiego modelu („surowego”) byłoby obarczone błędami wykazanymi w drugim wierszu tablicy 2.

Wielkości średnich błędów rzędnej (Z) uzasadniają możliwość pominięcia czynności prowadzonych do korygowania wpływów nachylenia osi (ω).

4. Zakres stosowania proponowanej metody

Generalnie rzecz biorąc reprezentujemy pogląd, że przedstawiona tu metoda jest szczególnie przydatna wszędzie tam, gdzie opracowywany obszar przekracza zasięg jednego stereogramu lub nawet mieści się w nim,

lecz obowiązuje z góry zadany układ współrzędnych oraz tam, gdzie wyznaczenie współrzędnych punktów bazowych nie następuje istotnych trudności w terenie. Warto podkreślić, że przypadki takie nie są wyjątkami. Należą do nich np: opracowanie map sytuacyjno-wysokościowych terenów odkrytych, górskich i pofałdowanych, sporządzanie podkładów dla badania ruchów naturalnych i sztucznych usypisk, skarp i urwisk, określa-

Tablica 2

Sposób obliczenia	$(m_p)_F$ cm	Stereogram Nr			
		1	2	3	4
Z fotopunktami i transformacją		± 13	± 7	± 7	± 10
Bez fotopunktów, z nastawień nominalnych		± 25	± 20	± 19	± 10
Proponowaną metodą		± 7	± 5	± 7	± 8

nie objętości mas ziemnych i skalnych w kopalnictwie odkrywkowym, sporządzanie profilów terenu, badanie przemieszczeń terenu pod wpływem eksploatacji górniczej, erozji itp.

Metoda sama w sobie nie powoduje różnicowania postępowania w zależności od tego, czy opracowanie wykonywane będzie numerycznie czy analogowo.

Uważamy jednak, że wskazane jest podkreślenie przydatności tej metody przy opracowaniach stereoautogrametrycznych, gdzie upatrujemy szczególne efekty ekonomiczne.

Wkroczenie z tą metodą powoduje, że proces opracowań stereoautogrametrycznych ulega zasadniczej zmianie w sensie proporcji prac polowych i kameralnych.

Zamiast sygnalizowania i wyznaczania współrzędnych fotopunktów wystarczy określić współrzędne punktów bazowych i pomierzyć z tych punktów kierunki od linii o znanych azymutach do celowych skierowanych do możliwie daleko położonych, wyraźnych szczegółów sytuacyjnych rozmieszczonych na fotogramach w sposób podany na rysunku 9.

Pomiar ten zastępuje wszelkie dotąd wykonywane pomiary geodezyjne prowadzone dla określenia współrzędnych fotopunktów. Warto dodać, że prace polowe dla określenia współrzędnych fotopunktów pochłaniają obecnie 80÷85% ogółu czasu trwania prac polowych koniecznych dla opracowań stereoautogrametrycznych.

Po wykonaniu zdjęć i obróbce fotochemicznej, zdjęcia tworzące stereogram są podstawą do wyboru potrzebnej ilości punktów, których współ-

rzędne, określone proponowaną metodą, będą stanowiły pełnowartościową podstawę dla opracowania tego stereogramu na stereoautografie.

Istotną cechą tego sposobu określania fotopunktów jest również to, że wybór ich wykonywany jest na tym samym modelu stereoskopowym, który będzie obserwowany na stereoautografie. Wobec tego fotopunkty mogą być definiowane przez obserwatora na jakichkolwiek szczegółach sytuacyjnych (np. latarnie, maszty, elementy taśmociągu, szczegóły budowli itp.). W przypadkach drastycznego braku szczegółów sytuacyjnych, fotopunktami mogą być nawet punkty nie istniejące w terenie lecz tylko nakłute na fotografiach.

Tak duża swoboda, rzecz jasna, zwalnia od obowiązku sygnalizowania fotopunktów w terenie co w znakomity sposób upraszcza prace polowe. Ponadto, wybór fotopunktów na podstawie modelu stereoskopowego pozwala uzyskać najkorzystniejszy ich rozkład z punktu widzenia zasad strojenia zdjęć w stereoautografie, co z kolei znacznie przyspiesza proces strojenia.

Wobec tego, że stosowanie proponowanej metody wymaga wprowadzenia pewnych zmian w procesie technologicznym prac polowych i częściowo kameralnych, w załączniku do niniejszej pracy podajemy zestawienie uwag natury praktycznej. Prace obliczeniowe wymagają stosowania elektronicznej techniki rachunku. Z tego też względu podajemy również w załączniku cykl rachunkowy zapisany w formie algorytmu, który stanowi wystarczającą postać do opracowania programu dla dowolnego typu maszyny cyfrowej.

W zakończeniu pragniemy złożyć podziękowanie Zarządowi Polskiego Towarzystwa Fotogrametrycznego za pomoc udzieloną nam przy opracowywaniu przykładów ilustrujących przedstawianą metodę.

5. Wskazówki technologiczne

5.1. Wywiad terenowy

W trakcie sytuowania w terenie punktów bazowych oraz projektowania zwrotów należy mieć na uwadze, aby w zasięgu stereogramu znalazło się pięć punktów, możliwie daleko położonych (nie bliżej niż dwudziestokrotna długość bazy), z których trzy środkowe odfotografują się blisko punktów głównych obu zdjęć zaś dwa pozostałe na granicy zasięgu wzdłuż osi odciętych tłowych (rys. 9).

Wybrane punkty, zwane w dalszej treści „punktami dostosowania”, mogą być szczegółami obiektów terenowych (maszty, kominy, latarnie itp.).

5.2. Prace geodezyjne

5.2.1. Wyznaczenie współrzędnych punktów bazowych

Może być dokonane jakąkolwiek metodą (wcięciami lub poligonizacją) z tym jednak, że długość bazy fotografowania musi być pomierzona z najwyższą starannością, pamiętając, że długość ta jest elementem określającym skalę modelu stereoskopowego.

5.2.2. Obserwacje kierunków z punktów bazowych

Na obu tych punktach należy ustawić spodarki na statywach, centrycznie nad stabilizacją. Położenie spodarek pozostaje niezmiennie podczas obserwacji kierunków i wykonania zdjęć.

Obserwacje należy wykonać z obu punktów bazowych teodolitem Zeiss Theo 010 w dwóch seriach metodą kierunkową.

W serii należy obserwować:

- Kierunki do wszystkich punktów dostosowania.
- Kierunki do wszystkich mir.

Pod pojęciem „miry” rozumie się punkty nacelowania kierunku o znanym azymucie.

Jedną mirą jest zawsze drugi koniec bazy. Należy dołożyć starań, aby w serii, oprócz kierunku na drugi koniec bazy, obserwowana była przynajmniej jeszcze jedna mira.

5.3. Wykonywanie zdjęć

Po zakończeniu obserwacji kierunków na miejscu teodolitu ustawia się fototeodolit Zeiss 19/1318.

Przed wykonaniem zdjęć należy sprawdzić libele fototeodolitu i przeprowadzić korektę poziomowania. Dopuszcza się wychylenie najwyżej jednej działki libeli fototeodolitu. Orientacja i ekspozycja wykonywane są według znanych zasad. Przed zdjęciem fototeodolitu ze spodarki należy pomierzyć wysokość obiektu nad stabilizacją.

5.4. Fotogrametryczne prace kameralne

Rozróżnia się dwa przypadki: opracowanie metodą numeryczną i opracowanie za pomocą stereoautografu.

5.4.1. *Opracowania numeryczne*

Negatywy zakłada się do stereokomparatora lub stekometru i po zestrojeniu wzdłuż osi odciętych tłowych obserwuje się współrzędne tłowe i paralaksy:

- znaczków tłowych,
- punktów dostosowania,
- wszystkich punktów stereogramu będących przedmiotem opracowania.

Po zakończeniu tych obserwacji można przystąpić do czynności rachunkowych opisanych w algorytmie, w wyniku których otrzymuje się współrzędne punktów będących przedmiotem opracowania.

5.4.2. *Opracowania stereoautogrametryczne*

W tym przypadku celem prac jest dostarczenie osnowy dla zestrojenia zdjęć w stereoautografie.

Negatywy zakłada się do stereokomparatora lub stekometru i po zestrojeniu wzdłuż osi odciętych tłowych dokonuje się najpierw wyboru fotopunktów. Wybór ten dokonywany jest na podstawie modelu stereoskopowego z wykorzystaniem widocznych szczegółów sytuacyjnych w tych rejonach, gdzie posiadanie fotopunktów jest pożądane z punktu widzenia zasad strojenia zdjęć w stereoautografie. Położenie wybranych szczegółów należy naszkicować w celu prawidłowej identyfikacji w trakcie prac na stereoautografie. W przypadku wykorzystywania stekometru, wybrany fotopunkt może być zarejestrowany fotograficznie.

Gdy brak jest dostatecznie jednoznacznych szczegółów sytuacyjnych (przypadek szczególny) położenie fotopunktów może być oznaczone nakłuciami emulsji na fotogramach.

Po dokonaniu wyboru fotopunktów należy zaobserwować współrzędne tłowe i paralaksy:

- znaczków tłowych,
- punktów dostosowania,
- fotopunktów,

a następnie przystąpić do czynności rachunkowych opisanych w algorytmie, w wyniku których otrzyma się współrzędne fotopunktów.

Współrzędne te, po naniesieniu na planszę, są podstawą do dalszego opracowania na stereoautografie.

6. **Algorytm obliczeń**

Przed przystąpieniem do obliczeń należy przygotować dane w oparciu o prace polowe i kameralne opisane w rozdziale 5.

Dane należy przygotować według następującego schematu:

- m — ilość punktów dostosowania,
- l — ilość mir dla lewego punktu bazowego,
- p — ilość mir dla prawego punktu bazowego,
- n — ilość punktów wyznaczanych,
- f — odległość obrazu kamery pomiarowej,
- φ — kąt zwrotu,
- i_L — wysokość środka rzutów nad lewym punktem bazowym,
- i_P — wysokość środka rzutów nad prawym punktem bazowym,
- e — mimośród środka rzutów względem osi obrotu instrumentu,
- X_A, Y_A, Z_A — współrzędne lewego punktu bazowego,
- X_B, Y_B, Z_B — współrzędne prawego punktu bazowego,
- x'_o, z'_o, p_o, q_o — współrzędne tłowe punktów głównych,
- T_o — zbiór odczytów współrzędnych tłowych punktów obserwowanych $(\bar{x}', \bar{z}', \bar{p}', \bar{q}')$ w kolejności; od pierwszego do m -tego punktu dostosowania i od pierwszego do n -tego punktu wyznaczanego,
- KL — zbiór kierunków obserwowanych z lewego punktu bazowego do mir i punktów dostosowania $(\bar{\beta}'_1, \dots, \bar{\beta}'_{m+l})$
- KP — zbiór kierunków obserwowanych z prawego punktu bazowego do mir i punktów dostosowania $(\bar{\beta}''_1, \dots, \bar{\beta}''_{m+p})$
- M — zbiór współrzędnych mir (X, Y) .

6.1. Obliczenie współrzędnych tłowych wszystkich punktów obserwowanych

$$\text{Wzory:} \quad x' = \bar{x}' - x'_o, \quad (37)$$

$$z' = \bar{z}' - z'_o, \quad (38)$$

$$x'' = x' - \bar{p} + p_o, \quad (39)$$

$$z'' = z' - \bar{q} + q_o. \quad (40)$$

Po zrealizowaniu wzorów od (37) do (40) powstanie zbiór współrzędnych tłowych T z zachowaniem kolejności zbioru T_o .

6.2. Obliczenie współrzędnych przybliżonych punktów dostosowania (XY)

$$\text{Wzory:} \quad F' \equiv \begin{vmatrix} x' & f \\ \text{tg } \varphi & 1 \end{vmatrix}; \quad F'' \equiv \begin{vmatrix} x'' & f \\ \text{tg } \varphi & 1 \end{vmatrix} \quad (41)$$

$$X = \frac{X_E F'_0 - X_A F''_0 + (Y_B - Y_A)}{F'_0 - F''_0}, \quad (42)$$

$$Y = \frac{Y_B F'_0 - Y_A F''_0 - (X_B - X_A)}{F'_0 - F''_0}, \quad (43)$$

gdzie: x' , x'' — współrzędne tłowe pierwszych punktów ze zbioru T (6.1.).

6.3. Obliczenie współrzędnych środków rzutów

Wzory: Azymut bazy

$$A_0 = \arctg \frac{Y_B - Y_A}{X_B - X_A}. \quad (44)$$

$$\text{Azymut osi } A_L = A_0 - 100^\circ - \varphi \quad (45)$$

Współrzędne środka rzutów lewej kamery:

$$X_L = X_A + e \cos A_L, \quad (46)$$

$$Y_L = Y_A + e \sin A_L, \quad (47)$$

$$Z_L = Z_A + i_L. \quad (48)$$

Współrzędne środka rzutów prawej kamery:

$$X_P = X_B + e \cos A_L, \quad (49)$$

$$Y_P = Y_B + e \sin A_L, \quad (50)$$

$$Z_P = Z_B + i_P. \quad (51)$$

6.4. Obliczenie odległości do mir i punktów dostosowania (dla redukcji mimośrodów)

Uwaga: Podane wzory odnoszą się do lewego stanowiska. Obliczenia dla prawego stanowiska należy prowadzić zmieniając we wzorze (52) X_L , Y_L , na X_P , Y_P .

$$D = \sqrt{(X - X_L)^2 + (Y - Y_L)^2}, \quad (52)$$

gdzie: X , Y — współrzędne mir ze zbioru M oraz punktów dostosowania obliczone z wzorów (42) i (43).

6.5. Obliczenie redukcji mimośrodu

Uwagi: 1. Podane wzory odnoszą się do kierunków pomierzonych z lewego punktu bazowego. Kierunki pomierzone z prawego punktu bazowego redukuje się analogicznie, zmieniając odpowiednie oznaczenia.

2. Podane wzory realizować należy dla każdego kierunku pomierzonego. Wzory: Azymut kierunku obserwowanego

$$A = \arctg \frac{Y - Y_L}{X - X_L}, \quad (52a)$$

gdzie: X, Y — współrzędne mir ze zbioru M oraz współrzędne punktów dostosowania obliczone z (42) i (43).

$$\delta = A - A_L, \quad (53)$$

gdzie: A_L obliczone z wzoru (45)

$$\gamma = \frac{e \sin \delta}{D} \varrho^{cc}, \quad (54)$$

gdzie: D obliczone z wzoru (52)

$$\beta' = \bar{\beta}' + \delta, \quad (55)$$

gdzie: $\bar{\beta}'$ ze zbioru KL .

6.6. Poprawienie elementów orientacji wewnętrznej

Uwaga: Podane wzory odnoszą się do fotogramu lewego. Obliczenia dla fotogramu prawego prowadzi się analogicznie zmieniając odpowiednio oznaczenia.

Wzory: Dla m punktów dostosowania obliczyć:

$$\alpha'_i = \arctg \frac{x'_i}{f_l}, \quad (56)$$

gdzie: x' — odcięte tłowe obliczone z wzoru (37)

$$K'_i = \alpha'_i - \beta'_i, \quad (57)$$

gdzie: β'_i — obliczone z wzoru (55)

Dla fotogramu obliczyć

$$K'_0 = \frac{1}{m} \sum_1^m K'_i. \quad (58)$$

Dla m punktów dostosowania obliczyć

$$\Theta_i = \beta'_i + K'_0, \quad (59)$$

gdzie β'_i obliczone z wzoru (55)

$$l_i = \alpha'_i - \Theta_i \quad (60)$$

$$a_i = + \frac{x'_i}{(x'_i)^2 + f^2} \varrho^{cc}, \quad (61)$$

$$b_i = - \frac{f}{(x'_i)^2 + f^2} \varrho^{cc}. \quad (62)$$

Dla fotogramu obliczyć:

$$A = \frac{1}{\sqrt{m}} \sum_{i=1}^m a_i \quad (63)$$

$$B = \frac{1}{\sqrt{m}} \sum_{i=1}^m b_i. \quad (64)$$

Zestawić układ równań normalnych:

$$([aa] - A^2)df' + ([ab] - AB)dx'_o + [al] = 0; \quad (65)$$

$$([ab] - AB)df' + ([bb] - B^2)dx'_o + [bl] = 0. \quad (66)$$

Rozwiązać układ (65), (66) wyznaczając: df' , dx'_o , odchyłki po wyrównaniu oraz wielkości średnich błędów niewiadomych.

6.7. Określenie orientacji osi (zwroty)

Uwaga: Podane wzory odnoszą się do obliczenia zwrotu osi lewej kamery. Obliczanie zwrotu osi prawej kamery prowadzi się analogicznie zmieniając odpowiednie oznaczenia.

Wzory:

Dla m punktów dostosowania obliczyć

$$\alpha'_j = \arctg \frac{x'_j - dx'_o}{f - df'}, \quad (67)$$

Obliczyć dla $j = 1, 2, \dots, m$ (ilość punktów dostosowania), dla każdego $i = 1, 2, \dots, l$ (ilość mir)

$$A_{ij} = A_i + (\beta'_j - \beta'_i) - \alpha'_j, \quad (68)$$

gdzie: A_i — azymuty mir obliczone wzorem (52a),

$\beta'_{i,j}$ — kierunki do mir i punktów dostosowania obliczone z wzoru (55).

Dla fotogramu obliczyć

$$A_L = \frac{1}{m \cdot l} \sum_{i=1}^{m \cdot l} A, \quad (69)$$

gdzie: A — obliczone z wzoru (68)

$$\varphi' = A_o - A_L - 100^g, \quad (70)$$

gdzie: A_o — obliczone z wzoru (44),

A_L — obliczone z wzoru (69).

6.8. Obliczenia dla fotogramu prawego zgodnie z algorytmem podanym w punktach 6.4., 6.5., 6.6., 6.7.

6.9. Obliczenia współrzędnych punktów obserwowanych

Dla n punktów zestawień formy:

$$F' \equiv \begin{vmatrix} x' - dx'_0 & f - df' \\ \operatorname{tg} \varphi' & 1 \end{vmatrix} \quad (71)$$

$$F'' \equiv \begin{vmatrix} x'' - dx''_0 & f - df'' \\ \operatorname{tg} \varphi'' & 1 \end{vmatrix} \quad (72)$$

i obliczyć

$$X = \frac{X_P F'_0 - X_L F''_0 + (Y_P - Y_L)}{F'_0 - F''_0} \quad (73)$$

$$Y = \frac{Y_P F'_0 - Y_L F''_0 - (X_P - X_L)}{F'_0 - F''_0} \quad (74)$$

$$Z_1 = Z_L + \sqrt{\frac{(X - X_L)^2 + (Y - Y_L)^2}{(x' - dx'_0)^2 + (f - df')^2}} z' \quad (75)$$

$$Z_2 = Z_P + \sqrt{\frac{(X - X_P)^2 + (Y - Y_P)^2}{(x'' - dx''_0)^2 + (f - df'')^2}} z'' \quad (76)$$

$$Z = \frac{Z_1 + Z_2}{2}. \quad (77)$$

Recenzował: dr inż. Andrzej Majde

Rękopis złożono w Redakcji w sierpniu 1970 r.

ВОЙЦЕХ БЫХАВСКИ
ВИТОЛЬД МИЗЕРСКИ

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ОТДЕЛЬНОЙ СТЕРЕОПАРЫ ПРОИЗВОЛЬНО ОРИЕНТИРОВАННЫХ НАЗЕМНЫХ СНИМКОВ

Резюме

Хотя фотограмметрические методы являются значительно более экономические чем любые геодезические методы, однако они требуют некоторых данных получаемых путем геодезических измерений.

Современная техническая мысль создает, с большим успехом, различные способы обработки, позволяющие ограничить количество информации получаемых в результате геодезических измерений в поле и переносить основную тяжесть из полевых работ на камеральные. Особых эффектов на этом поприще достигла аэрофотограмметрия, которая, благодаря применению в аэротриангуляции аналитических методов, многократно уменьшила объем необходимых полевых работ.

Менее благополучно обстоит это дело при обработке наземных снимков. Здесь по-прежнему производится обработку снимков используя для каждой стереопары полную геодезическую основу получаемую в результате геодезических измерений.

В статье представляется способ аналитической обработки отдельной стереопары, позволяющий уменьшить количество полевых работ примерно на 50%. Это вытекает из того, что вместо необходимого определения координат фотопунктов на каждой стереопаре измеряются направления к нескольким четким деталям контура. Причем эти направления измеряются исключительно из пунктов фотографирования.

Коректуры элементов внешней и внутренней ориентации ведется учитывая изменение вида лучка определяемого на основе измеренных направлений, независимо для каждой стереопары.

WOJCIECH BYCHAWSKI
WITOLD MIZERSKI

ANALYTICAL EXAMINATION OF SINGLE STEREOGRAMME OF ARBITRARILY DIRECTED GROUND SURVEYS

Summary

In spite of being much more economical than any kind of geodetic methods, photogrammetric methods presuppose possession of a number of informational data which can only be obtained by geodetic surveys.

Modern engineering thought has most successfully developed a variety of methods of procedure which have reduced the amount of data obtainable only by field surveying, and thus have transferred the bulk of work to the office. Aerial photogrammetry can boast of particular progress in this field, because due to the application of analytical aerotriangulation methods the indispensable field work has been enormously reduced.

Less favorable are matters when it comes to work out surveys made on the surface of the Earth. Here, as before, the work is accomplished on the basis of the full content of each stereogramme established by geodetic surveying.

The authors present in their paper a method of how by analytical working up of a single stereogramme geodetic field work can be reduced by about 50%. To accomplish this the authors replaced the heretofore indispensable determination of the coordinates of photopoints for each stereogramme by measuring directions upon a number of distinct landscape details, provided that these directions are measured solely from the stations from which the photographs were taken.

A correction of the elements of external and internal orientation is on the basis of changes in the shape of the bundle of rays as established by the measured directions — for each photogramme separately.