

ZARYS MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA FOTOGRAMETRYCZNYCH METOD POMIARU W BADANIACH ROLNICZYCH I LEŚNYCH

Andrzej Majde

Instytut Fotogrametrii i Kartografii Politechniki Warszawskiej

Kamery fotograficzne i filmowe weszły już wprawdzie do wyposażenia laboratoriów i pracowni naukowych, jednakże stopień i sposób ich wykorzystania w pracach badawczych nie jest z pewnością zadowalający. Jedną z przyczyn tego stanu jest niewątpliwie zbyt mała popularność lub wręcz nieznajomość sposobów odczytywania, interpretacji i opracowania informacji, zarejestrowanej i utrwalonej technikami fotograficznymi i filmowymi.

CO TO JEST FOTOGRAMETRIA?

Fotogrametria, jak to zresztą wynika z jej nazwy, była kiedyś wyłącznie nauką o sposobach wykonywania pomiarów sfotografowanych uprzednio obiektów. Powstała ona około 100 lat temu jako nowy wówczas sposób produkcji mapy topograficznej w trudno dostępnych terenach górskich. W wyniku ogólnego postępu technicznego punkty wykonywania zdjęć zostały przeniesione z ziemi na balon, samolot, a wreszcie na statek kosmiczny, co znacznie rozszerzyło zakres zadań możliwych do wykonania metodami fotogrametrycznymi. Wprawdzie do dziś głównym (w sensie ilościowym i ekonomicznym) zadaniem fotogrametrii pozostają w dalszym ciągu pomiary topograficzne i geodezyjne, lecz w ostatnim dwudziestolecu w tej dziedzinie nastąpiły bardzo poważne zmiany.

Rozważając przebieg fotogrametrycznych prac pomiarowych, nie trudno przewidzieć, że ich realizacja musi być zawsze poprzedzona odczytaniem na zdjęciach treści, poddawanych późniejszemu pomiarowi. Dopóki „czytanie” zdjęć traktowane jest jako swego rodzaju wstęp do prac pomiarowych, można mówić o tzw. fotogrametrii metrycznej. Wieloletnie prace fotogrametryczne, prowadzone w oparciu o zdjęcia lotni-

cze, wykazały jednak, że dla celów pomiarowo-mapowych wykorzystywano stosunkowo niewiele najłatwiej czytelnych treści zdjęcia. Skojarzono ten fakt z ciągle rosnącym zapotrzebowaniem na nowe, niekonwencjonalne w stosunku do treści klasycznej mapy, rodzaje informacji o terenie, jakich potrzebują coraz częściej geologowie, gleboznawcy, rolnicy, leśnicy, wojskowi i inni. W konsekwencji pojawiła się nowa dziedzina fotogrametrii, tzw. fotointerpretacja, zajmująca się doбором takich sposobów rejestracji obrazu terenu i jego odczytywania, które dostarczyć mogą różnorodnych, lecz zawsze sprecyzowanych, nowych informacji o terenie.

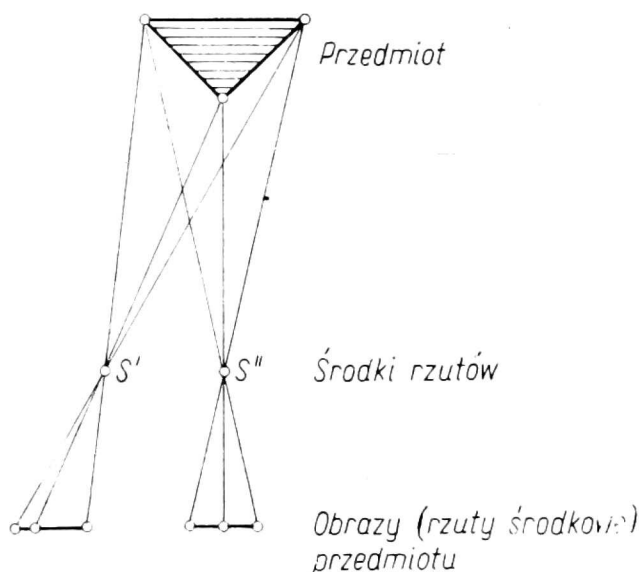
Równocześnie jednak w ostatnich latach obserwujemy burzliwy rozwój fotogrametrii w innych, niż geodezyjne, zastosowaniach. Okazało się bowiem, i było to odkryciem nie tylko dla specjalistów z innych dziedzin, lecz i wielu fotogrametrów, że przy jej pomocy można dokładnie pomierzyć (a zatem również poznać i opisać) wiele nieuchwytnych dla innych metod pomiarowych zjawisk i procesów fizycznych, mechanicznych, przyrodniczych, technicznych i innych. Decydującymi w tym względzie cechami fotogrametrii są: z jednej strony — możliwość uchwycenia i zarejestrowania dowolnie skomplikowanych stanów chwilowych, a przy wykorzystaniu kamer filmowych (ze zdjęciami szybkimi włącznie) nawet przebiegu procesów, z drugiej strony — możliwość obserwacji i pomiaru całych skomplikowanych obiektów, bez konieczności wcześniejszego selekcjonowania „reprezentatywnych” ich elementów.

EFEKT STEREOSKOPOWY

Przeciętny człowiek obserwując otoczenie dostrzega bez trudu jego „trójwymiarowość”. Mechanizm takiego postrzegania świata polega na tym, że człowiek posiada dwoje oczu, z których każde obserwuje otoczenie z innego punktu przestrzeni, a ośrodek wzroku w centralnym systemie nerwowym, przystosowany do równoczesnej analizy i syntezy dwóch obrazów, przetwarza je na jednolitą informację o otaczającej nas przestrzeni. Wynika stąd wniosek, że niemożność syntezy dwóch obrazów jest równoznaczna z brakiem zdolności widzenia przestrzennego. Zdolności tej pozbawiona jest, np. kura, która ze względów anatomicznych ogląda każdym okiem zupełnie inny wycinek przestrzeni. Nie posiada tej zdolności człowiek pozbawiony jednego oka lub posiadający takie wady wzroku, które uniemożliwiają centralnemu ośrodkowi wzroku dokonanie syntezy dwóch obrazów (zez, astygmatyzm, duża różnica siły wzroku nie skorygowana okularami).

Budowę oka i sposób tworzenia się w nim obrazu można porównać z budową i działaniem aparatu fotograficznego. Obiektywem jest so-

czewka oczna, materiałem światłoczułym — siatkówka. Z geometrycznego punktu widzenia uzyskane obrazy są rzutami środkowymi. Za rzeczywistą przyczynę odbierania wrażeń przestrzennych należy uznać drobne różnice między obrazami uzyskiwanymi w jednym i drugim oku. Na rysunku 1 nietrudno zauważyć, że dwa dalsze punkty „tła” są równoległe na obydwóch obrazach, natomiast punkt bliższy jest wyraź-



Rys. 1. Geometria widzenia przestrzennego

nie względem nich przemieszczony. Wielkość tego przemieszczenia decyduje o wrażeniu głębi.

Przy fotografowaniu należy uważać, aby zdjęcia wykonane zostały w zbliżonych do pracy oczu warunkach geometrycznych, a przy obserwacji — aby właściwy obraz dotarł do właściwego oka, a ponadto — aby sposób obserwacji nie skaził geometrycznego układu zdjęć.

Oczy nasze umieszczone są na jednym poziomie w odległości około 6,5 cm, a zatem przy obserwacji bliskich przedmiotów ich osie są lekko zbieżne, a w miarę oddalania punktu obserwacji stają się coraz bardziej równoległe. Najbliższa odległość obserwacji — tzw. odległość dobrego widzenia — wynosi około 25 cm, a zatem jest czterokrotnie większa od bazy obserwacyjnej. Najmniejsze zmęczenie oczu obserwacją występuje przy patrzeniu na dalekie przedmioty, gdyż regulujące ostrość obrazu mięśnie gałki ocznej znajdują się wówczas w stanie najmniejszego napięcia. Między systemami sterowania akomodacją i zbieżnością istnieje fizjologiczne sprzężenie zwrotne. Pole widzenia przestrzennego na siatkówce (tzw. żółta plamka) jest ograniczone, co uniemożliwia obserwację przedmiotów o dużej głębi bez „przenoszenia” wzroku w przestrzeni.

Z uwag powyższych wynikałoby więc, że naturalny efekt stereoskopowy uzyskamy — wykonując dwa zdjęcia aparatami o równoległych osiach, umieszczonymi w odległości 6,5 cm, a następnie obserwując je

przez pomocniczy układ optyczny, przenoszący obrazy w nieskończoność z zachowaniem równoległości osi obu oczu. Najprostsze (amatorskie) tego typu urządzenia, to aparat do zdjęć stereoskopowych — dwuobiektywowy (rys. 2) lub jednoobiektywowy ze stereoskopową nasadką pryzmatyczną i stereoskopem mostkowym (rys. 3) lub pudełkowym (rys. 4).

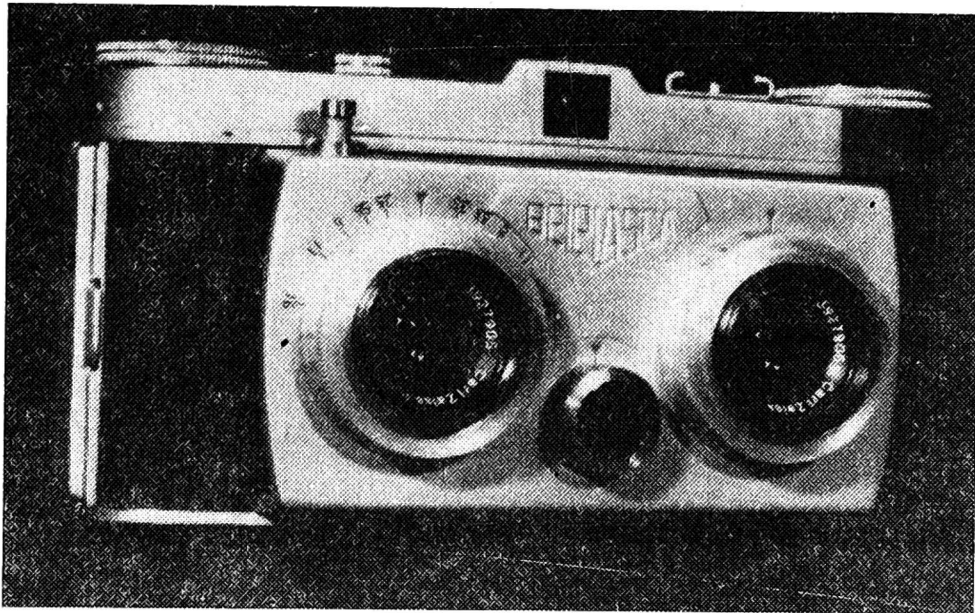
W pracach fotogrametrycznych na ogół unikamy naturalnego efektu stereoskopowego, gdyż daje on — co łatwo zauważyć przy bezpośredniej obserwacji otoczenia — szybkie zmniejszanie wrażenia głębi wraz z oddalaniem się od obserwowanego przedmiotu. Wynika to — z jednej strony — z proporcjonalnego do odległości zmniejszania się obrazu (skala), z drugiej strony — ze zmniejszania się względnych różnic obydwóch obrazów. Tę drugą przyczynę wyjaśnia rysunek 5, na którym — ze względu na sposób umieszczenia obydwóch przedmiotów — należy porównywać jedynie rzuty z punktów S'' i S''' . Pokazane na tym rysunku efekty nie są obarczone wpływem skali ze względu na odpowiedni dobór wielkości przedmiotów A i B .

Z analizy rysunku 5 wynika, że przy stałej bazie obserwacyjnej plastyka przedmiotu jest tym lepsza, im bliżej (lecz nie za blisko — por. względy fizjologiczne) obserwatora znajduje się ten przedmiot (por. A'' i B''). Natomiast przy stałej odległości plastyka jest tym lepsza, im większa (lecz znów bez przesady) jest baza obserwacyjna (por. A'' i A'''). Równoważne zaś efekty uzyskamy wówczas, gdy przy obserwacji przedmiotów podobnych w sensie geometrycznym zachowany zostanie ten sam stosunek długości bazy obserwacyjnej do jej odległości od przedmiotu (por. B'' i A''').

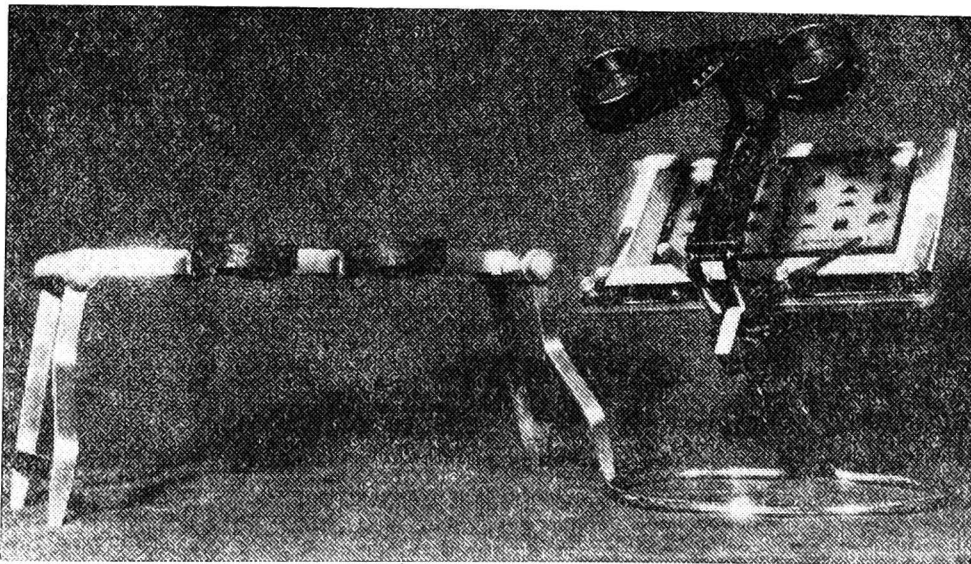
Reasumując możemy więc stwierdzić, że celem zwiększenia plastyki modelu stereoskopowego należy wydłużyć bazę oraz możliwie mało zmniejszyć obrazy. Przy obserwacji bezpośredniej rolę tę spełnia, np. lorneta pryzmatyczna lub nożycowa, przy obserwacji pośredniej (tzn. poprzez zdjęcia) — odpowiednie ustawienie aparatów, zastosowanie obiektywów o długich ogniskowych oraz powiększających systemów optycznych w układach obserwacyjnych.

SPOSOBY OBSERWACJI STEREOSKOPOWEJ

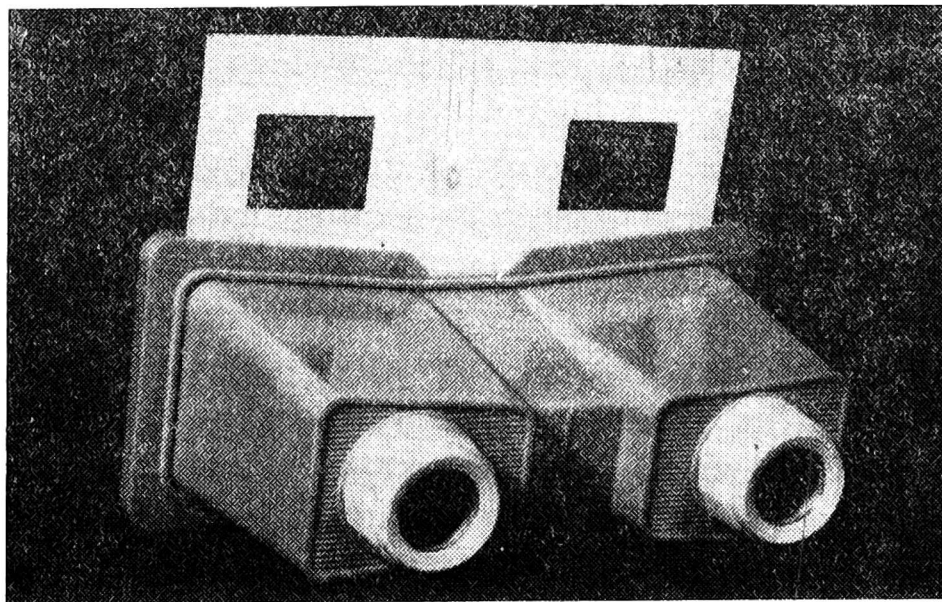
Jak wspomniano uprzednio, nieodzownym warunkiem pośredniej obserwacji stereoskopowej jest doprowadzenie w postaci gwarantującej dobre widzenie odpowiedniego obrazu do każdego oka. Szczególną uwagę należy zwrócić na właściwe skręcenia obrazów fotograficznych oraz na równoległość bazy obserwacyjnej do bazy fotografowania, ponieważ poprzeczne (prostopadłe do bazy) przesunięcia obrazów uniemożliwiają



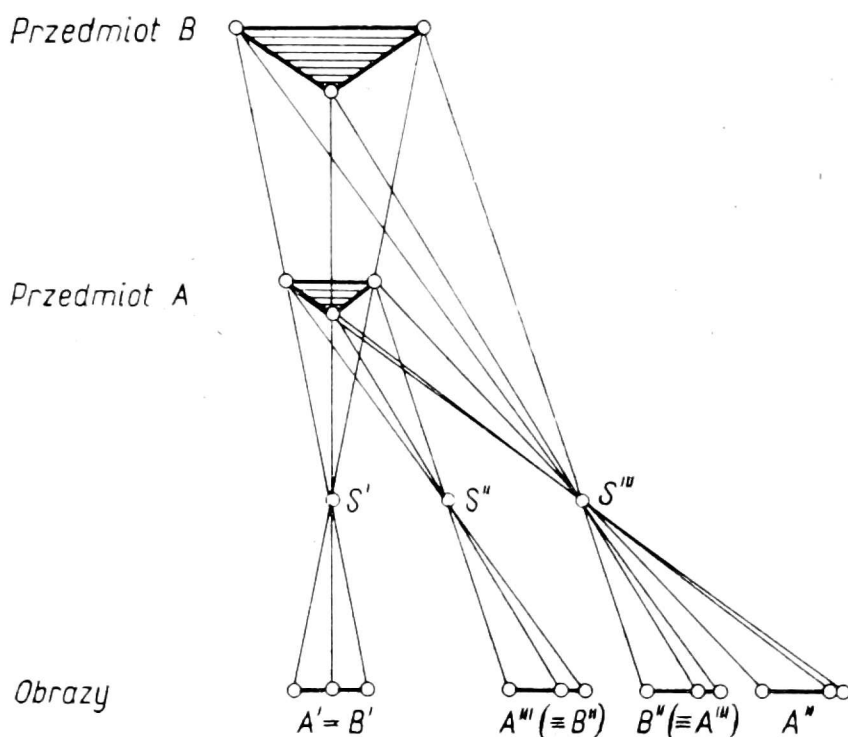
Rys. 2. Dwuobiektywowy aparat do zdjęć stereoskopowych



Rys. 3. Stereoskopy mostkowe



Rys. 4. Dziecinny stereoskop pudełkowy

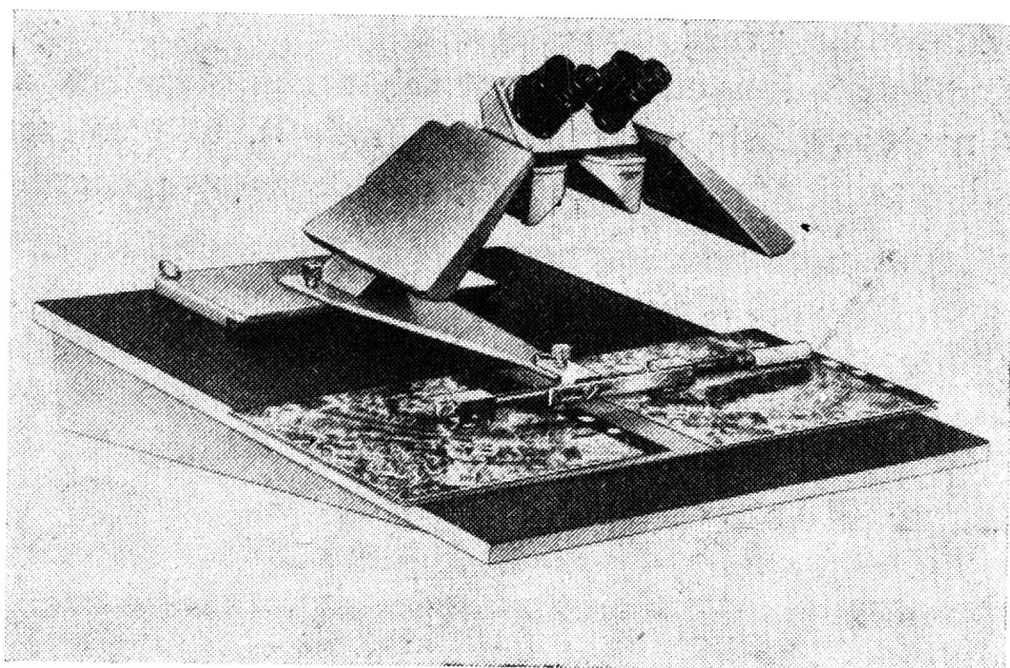


Rys. 5. Zależność plastyki obrazu przestrzennego od geometrii układu obserwacyjnego

uzyskanie efektu stereoskopowego. Samą obserwację można prowadzić jednym z podanych sposobów.

B e z p o ś r e d n i a o b s e r w a c j a z d j ę c . Przy pewnej wprawie można obejść się bez pomocniczych przyrządów. Należy wówczas ułożyć zdjęcia, uważając, aby odległość jednoimiennych punktów obydwóch zdjęć nie przekraczała 6 cm. Następnie należy skoncentrować wzrok na jakimś wyraźnym szczególe obydwóch zdjęć i starać się ściągnąć obydwie te obrazy na siebie. Ponieważ podstawowa trudność tego sposobu polega na konieczności rozkojarzenia naturalnych mechanizmów fizjologicznych, można sobie pomóc przez rozdzielenie obydwóch obrazów pionowo ustawioną kartką papieru lub okularami dla krótkowidza.

S t e r e o s k o p o w e u k ł a d y o p t y c z n e . W tej metodzie również przygotowuje się oddzielny obraz dla każdego oka, a następnie lokalizuje się je w miejscach i pozycjach odpowiadających właściwościom używanego systemu optycznego. Nie wymagają one rozkojarzenia systemów zbieżności i akomodacji, gdyż podstawowym ich elementem są soczewki bądź układy soczewek, przesuujące obrazy do nieskończoności. Oprócz pokazanych na rysunkach 3 i 4 stereoskopów mostkowych i pudełkowych należy tu wymienić stereoskopy zwierciadlane (rys. 6), które dzięki rozsuwającemu pole widzenia układowi lusterek pozwalają na obserwację obrazów o znacznie większych wymiarach, czy wreszcie bardziej jeszcze skomplikowane układy mikroskopów, występujące w większości przyrządów fotogrametrycznych.



Rys. 6. Stereoskop zwierciadlany

Anaglify¹. Przygotowany dowolny obraz, np. wyłącznie w czerwonym kolorze, oglądamy trzema następującymi sposobami:

- okiem uzbrojonym — zobaczymy po prostu czerwony obraz;
- okiem uzbrojonym w czerwony filtr — przy właściwie dobranym odcieniu filtru zobaczymy tylko czerwoną płaszczyznę, gdyż zarówno od białego tła, jak i od czerwonego obrazu docierają do oka dokładnie takie same fale świetlne;

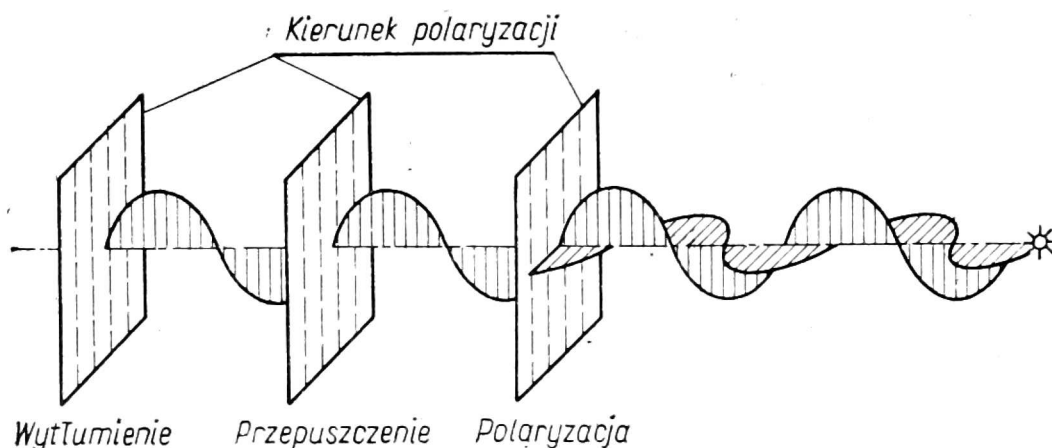
- okiem uzbrojonym w niebieski lub zielony filtr — ze względu na dodanie dwóch barw zobaczymy obraz w odcieniu brunatnym, oczywiście na niebieskim (zielonym) tle.

Jeżeli zatem przygotujemy metodą druku lub fotografii barwnej nałożone na siebie dwa obrazy — np. lewy w zielonym (niebieskim), a prawy w czerwonym kolorze, to dla oczu nie uzbrojonych będzie on nieczytelny. Natomiast po założeniu dwukolorowych okularów: lewego szkła czerwonego, a prawego zielonego (niebieskiego) zobaczymy po prostu przestrzenny model obiektu. Na tej samej zasadzie zorganizować można projekcję obrazów przestrzennych, rzutując z dwóch odpowiednio ustawionych rzutników obrazy przez filtry i oglądając je przez kolorowe okulary.

Filtry polaryzujące. Światło spolaryzowane, to światło uporządkowane w ten sposób, że płaszczyzny wszystkich fal świetlnych są równoległe od jakiegoś jednego kierunku. Uporządkowanie takie można

¹ Zarówno ten, jak i wszystkie dalsze sposoby, różnią się od poprzednio opisanych tym, że obydwa obrazy są nałożone na siebie, jednak zawsze tak, aby możliwe było ich rozdzielenie w procesie obserwacji.

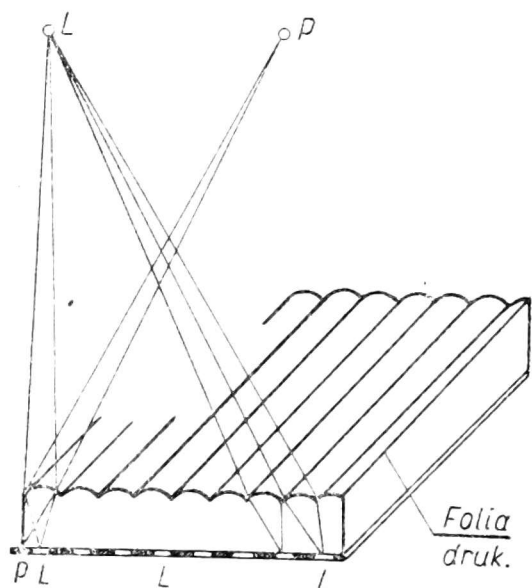
uzyskać wstawiając przed dowolne źródło światła filtr polaryzacyjny, który odcina fale o innych płaszczyznach drgań. Jeżeli w światło takie wstawimy następny filtr polaryzacyjny (rys. 7), to przy zgodności kierunków polaryzacji przepuści on całą dotychczasową energię, natomiast



Rys. 7. Zasada działania filtrów polaryzacyjnych

przy skręceniu ich o 90° wytłumi ją całkowicie. Jeżeli zatem przy podwójnej projekcji obrazów stereoskopowych wykorzystamy filtry i okulary polaryzacyjne, to — pod warunkiem posiadania specjalnego (nie polaryzującego) ekranu — uzyskamy efekt stereoskopowy na zasadach zbliżonych do metody anaglifowej.

P o c z t ó w k i t r ó j w y m i a r o w e. Jeszcze inny sposób obserwacji stereoskopowej zastosowano w druku trójwymiarowym. Istota tego sposobu, wyjaśniona na rysunku 8, polega na podzieleniu obydwóch obra-



Rys. 8. Zasada rozdzielenia obrazów w druku trójwymiarowym

zów na wąskie pionowe paski i druku ich na przemian tymi właśnie paskami (*L* i *P* na rys. 8). Następnie na ten podwójny obraz nakładana jest przezroczysta folia, wyprofilowana w postaci wąskich podłużnych soczewek walcowych, o tak dobranym do współczynnika folii kształcie, który

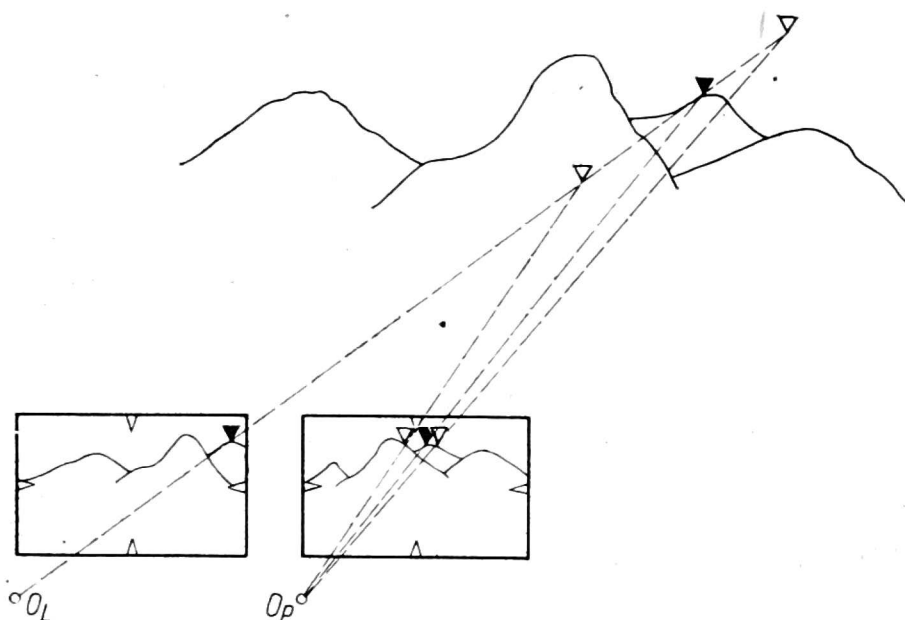
zapewnia rozdzielenie obrazów na lewy i prawy, i kieruje je do właściwego oka.

Raster liniowy. Bardzo zbliżony do poprzedniego sposób uzyskania efektu stereoskopowego — jest podwójna projekcja na ekran przysłonięty rastrem liniowym. Przy odpowiednim ustawieniu rzutników, rastra i ekranu uzyskać można, podobnie jak przy druku pocztówek, nałożenie na ekranie dwóch podzielonych na paski obrazów. Ponieważ przy obserwacji ekranu raster ponownie przysłania 50% jego powierzchni dla każdego oka, można dobrać takie ustawienie pary oczu, aby dla lewego oka niewidoczny był prawy obraz, a dla prawego oka — lewy obraz. Przy dużej gęstości rastra miejsc takich jest bardzo dużo. Projekcję stereoskopową tym sposobem można więc organizować nawet dla dość licznej grupy.

Holografia. Mówiąc o rejestracji i odtwarzaniu obiektów przestrzennych nie sposób nie wspomnieć o ostatniej na tym polu zdobyczy — holografii. Hologram jest to interferencyjny zapis stanu światła spójnego, pochodzącego bezpośrednio od lasera oraz odbitego od oświetlonego przedmiotu, przy czym światło bezpośrednie ma znaczenie fali nośnej, a światło odbite fali modulującej. Hologram uzyskuje się, ustawiając odsłoniętą kliszę w miejscu oświetlonym z tych dwóch źródeł. Jeżeli utrwalony i wywołany hologram wstawimy w taką samą wiązkę światła bezpośredniego, to zapis interferencyjny zrekonstruuje zarejestrowane uprzednio światło odbite, dzięki czemu zobaczymy nie istniejący już obiekt. Dzięki powierzchniowej, a nie punktowej (jak w fotografii) rejestracji obraz ten może być oglądany przez całą powierzchnię hologramu, a więc z różnych stron.

POMIAROWE ASPEKTY STEREOSKOPII

Przestrzenny znaczek pomiarowy. Możliwość wykorzystania efektu stereoskopowego w pracach pomiarowych uwarunkowana była wprowadzeniem do zrekonstruowanego na podstawie zdjęć stereoskopowych modelu obiektu, przestrzennie odbieranego elementu mierzącego. Rolę tę spełnia w fotogrametrycznych przyrządach pomiarowych tzw. przestrzenny znaczek pomiarowy. Jak wynika z rysunku 9, płaskie ruchy dwóch identycznych znaczków (umieszczonych bezpośrednio lub przy pomocy pewnej projekcji optycznej w płaszczyznach zdjęć) są przy obserwacji stereoskopowej odbierane automatycznie jako przestrzenny ruch jednego, syntetycznego znaczka. Znaczek taki stwarza zatem możliwość swobodnej penetracji zrekonstruowanej przestrzeni, a umieszczenie jego komponentów w jakichś układach mierzących — pomiar tej przestrzeni.



Rys. 9. Geometria przestrzennego znacznika pomiarowego

Identyfikacyjne właściwości stereoskopii. Mimo ziarnistej struktury materiałów światłoczułych obraz fotograficzny w pracach interpretacyjno-pomiarowych odbierany jest jako struktura ciągła. Podobnie ciągłą strukturę ma zdecydowana większość fotografowanych i badanych obiektów przestrzennych. Przy pracach pomiarowych istnieje jednak konieczność identyfikacji par obrazów, pochodzących od kolejnych punktów przestrzeni, a zatem przejście do punktowej struktury obiektów. Obserwacja pojedynczych zdjęć wymagałaby zatem poprzedzenia fotografowania wyborem punktów pomiarowych i odpowiednim ich oznakowaniem, co jest zawsze pracą dodatkową, często trudną, a czasami wręcz niemożliwą do wykonania. Od obowiązku tego zwalnia nas właśnie stereoskopia, gdyż dotknięcie (utworzonego na podstawie podświadomie tylko dostrzegalnych mikrostruktur obrazów fotograficznych modelu) przestrzennym znacznikiem pomiarowym jest, jak wykazuje to rysunek 9, jednoznaczne z lokalizacją komponentów znacznika na dwóch obrazach tego samego punktu obiektu.

Dokładność pomiaru stereoskopowego. Jak wykazały badania, oczy ludzkie są bardziej uczulone na zmiany głębi niż na zmiany płaskiego położenia. W połączeniu z możliwościami przerysowania plastyki w czasie fotografowania staje się więc możliwe dokładniejsze uchwycenie trzeciego wymiaru niż wymiarów w płaszczyźnie równoległej do płaszczyzny zdjęć. Ponadto, dzięki wzrokowej syntezie dwóch obrazów można pewnie interpretować skomplikowane, nieczytelne na pojedynczym zdjęciu, struktury przestrzenne, przy czym dzięki właściwościom tej syntezy nawet słaba jakość fotograficzna, uniemożliwiająca interpretację pojedynczych zdjęć, nie zawsze stanowi istotną przeszkodę w obserwacji.

SZTUCZNE EFEKTY STEREOSKOPOWE

Twórcze wykorzystanie geometrycznych zasad konstrukcji dwóch różnych obrazów płaskich przestrzeni oraz fizjologicznej zdolności ich syntezy wykracza dziś niejednokrotnie poza zwykły efekt przestrzenny. Do tych osiągnięć należy omówiona już konstrukcja przestrzennego znaczka pomiarowego, jak również kilka niżej omówionych sposobów wykorzystania stereoskopii.

Prezentowany dotychczas normalny efekt stereoskopowy nosi nazwę efektu ortoskopowego. Ponieważ jest on matematyczną funkcją bazy stereogramu (tzn. pary zdjęć), sugeruje to możliwość uzyskania zwierciadlanego odbicia przestrzeni przez zmianę znaku bazy. I rzeczywiście, jeżeli zamienimy obrazy, doprowadzając lewy obraz do prawego oka i odwrotnie (np. w anaglifach przez odwrócenie okularów), to zobaczymy sfotografowany obiekt jakby od tyłu. Identyczny efekt pod stereoskopem uzyskamy, zamieniając zdjęcia lub obracając je o 180° . Efekt taki nazywamy pseudoskopowym i wykorzystujemy go niejednokrotnie w fotogrametrycznych pracach pomiarowych.

Między minimum i maksimum istnieje na ogół jakaś wartość zeroowa, co dla efektu przestrzennego oznacza po prostu zanik trzeciego wymiaru. I rzeczywiście, przy skręceniu zdjęć pod stereoskopem o 90° nastąpi zanik plastyki — obiekt przestrzenny zobaczymy wówczas jako płaski, mimo obserwacji dwóch jego zdjęć, wykonanych z różnych punktów przestrzeni. Ten zerowy efekt również bywa wykorzystywany w pracach pomiarowych.

Geometryczne konstrukcje stereogramów. Korzystając z teorii rzutu środkowego można przez wykreślenie lub analitycznie „powołać do życia” przestrzenny model nieistniejącego obiektu, oglądany z świadomie wybranych punktów przestrzeni. Sposób ten wykorzystywany jest w niektórych podręcznikach geometrii jako doskonała ilustracja zadań przestrzennych. W badaniach natomiast stwarza on możliwość skonstruowania jakiegoś obiektu wzorcowego lub przeciętnego dla badanej serii zjawisk, a następnie wizualnego porównywania go z kolejnymi badanymi obiektami lub zjawiskami.

Analiza porównawcza zdjęć. Praktyka fotogrametryczna wykazała, że para oczu przeciętnego człowieka jest silnym, pewnym w działaniu i jednocześnie wysoce sprawnym urządzeniem porównującym, bardzo czułym na jakiegokolwiek zakłócenie stereoskopii. Gdy do obu oczu doprowadzimy dwa identyczne w najdrobniejszych szczegółach obrazy (np. dwie odbitki z tego samego negatywu), to otrzymany model będzie obrazem obiektu płaskiego, równoległego do bazy obserwacyjnej. Wyobraźmy sobie jednak, że obrazy te są tylko prawie identyczne (np. ko-

lejne zdjęcia jakiegoś zmiennego w czasie procesu). Oczy nasze bez trudu dostrzegą różnice zakłócające syntezę dwóch obrazów, a wykorzystanie niektórych przyrządów fotogrametrycznych i specjalnych sposobów pomiaru pozwoli pomierzyć te różnice z dokładnością nawet kilku mikrometrów w jednostkach obserwowanego zdjęcia. Podobnie bez żadnego trudu jesteśmy w stanie stwierdzić i zlokalizować każdy nowy element, jaki pojawił się na obiekcie między jednym a drugim zdjęciem.

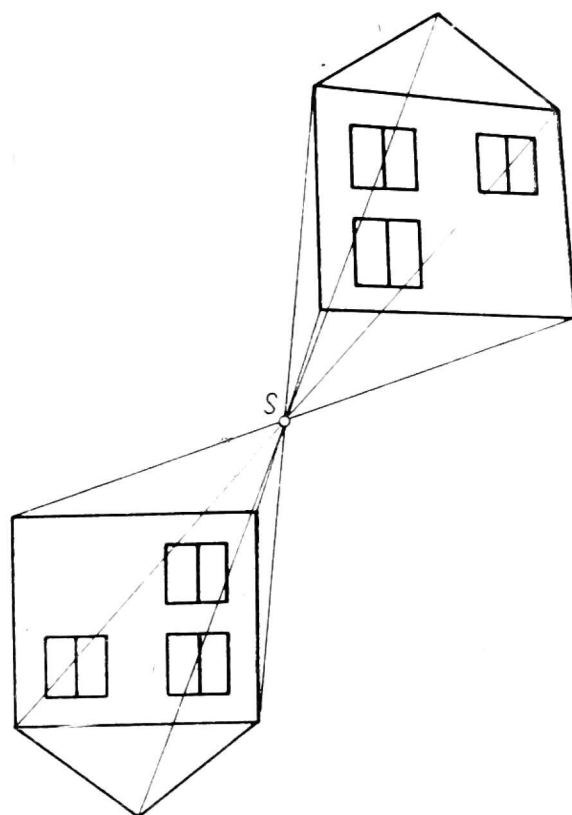
Jednym ze sposobów ułatwienia porównawczej analizy zdjęć jest dobranie takiego ich ustawienia, aby poszukiwane zmiany (np. ruch fragmentów obrazu) miały kierunek równoległy do bazy obserwacyjnej. Nieruchome tło obiektu odbierzemy, jak wykazano to wyżej, jako płaskie, natomiast elementy ruchome — zgodnie z teorią przestrzennego znaczka pomiarowego — pojawią się przed lub za płaszczyzną tła, przy czym wielkość tego odchylenia jest oczywiście mierzalna z dużą dokładnością, a przy spełnieniu pewnych dodatkowych warunków również i przeliczalna na wielkości rzeczywistych zmian obiektu.

PODSTAWY FOTOGRAMETRII METRYCZNEJ

Znamy doskonale zalety kamery fotograficznej i filmowej jako narzędzi zapamiętujących trwale chwilowe, zmienne w czasie stany rzeczywistości i pozwalających dzięki temu przenieść analizę tych stanów na później — w dowolnie dobrane, wygodne miejsce i czas. Zauważmy jednak, że fotograficzna rejestracja obrazów odbywa się w ściśle określonej konwencji geometrycznej. Jest to mianowicie rzut środkowy, tzn. obraz powstaje w wyniku naświetlenia płaszczyzny kliszy wiązką prostych promieni rzutujących, które przecinają się w jednym punkcie (środku rzutów) — obiektywie kamery. Wprawdzie fizyczna realizacja rzutu środkowego nie jest całkiem idealna, lecz odchylenia od konstrukcji teoretycznych nie są duże, a w specjalnych kamerach pomiarowych udało się je sprowadzić do rzędu zaledwie kilku sekund kątowych, co odniesione do płaszczyzny zdjęcia daje błędy rzędu kilku mikrometrów.

Przykładem takiego rzutu środkowego jest rysunek 10, pokazujący dla uproszczenia fotografowanie obiektu płaskiego. Jak widać, przy zdjęciach obiektów płaskich istnieje jednoznaczne, a więc i wzajemnie odwracalne, przyporządkowanie punktom przedmiotu odpowiadających im punktów obrazu fotograficznego. Wynika stąd wniosek, że w przypadku ustalenia tego przyporządkowania można zastąpić bezpośrednio pomiary obiektu pomiarem jego zdjęcia, a następnie wykorzystując ustalone reguły przyporządkowania — przenieść wyniki pomiarów na obiekt.

Aby poprzeć te dość ogólne rozważania przykładem, przypuśćmy, że pewien obiekt płaski został po sfotografowaniu usunięty, a klisza wywo-

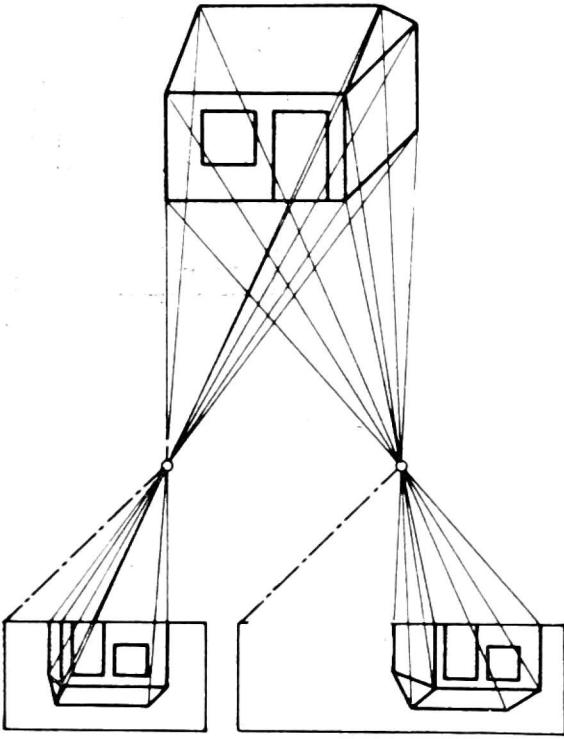


Rys. 10. Fotografowanie lub jednoobrazowe opracowanie obiektu płaskiego

łana, utrwalona i wysuszona oraz ponownie założona do nieruchomego przez cały czas aparatu. Gdyby teraz z kolei otworzyć aparat i oświetlić negatyw od tyłu, to uzyskana wiązka światła byłaby dokładnie tą samą (w sensie jej kształtu i lokalizacji w przestrzeni), która naświetlając kliszę ustaliła obraz w czasie fotografowania. Wstawiając zatem w miejsce, które zajmował przedmiot, arkusz papieru światłoczułego otrzymalibyśmy po jego naświetleniu i obróbce dokładną kopię przedmiotu, wierną nie tylko pod względem treści fotograficznej, lecz i pod względem wszystkich stosunków miarowych.

Przedstawiona metoda opracowania zdjęć nosi w fotogrametrii nazwę metody jednoobrazowej, gdyż do opracowania wystarczy tylko jedno zdjęcie przedmiotu, lub płaskiej, gdyż można ją stosować tylko do pomiaru obiektów płaskich. Sprawa komplikuje się znacznie wówczas, gdy interesuje nas obiekt przestrzenny, ponieważ w tym przypadku płaski jego obraz nie pozwala na ustalenie jednoznacznej relacji zwrotnej, tzn. na przyporządkowanie punktom płaskiego zdjęcia odpowiadających im punktów oryginału. Zadanie jest po prostu niewykonalne i udowadnia to zarówno matematyka, jak i zwykły zdrowy rozsądek, gdyż w praktyce nie mamy czym przeciąć zrekonstruowanej wiązki promieni rzutujących.

Konkretny obraz dowolnego obiektu przestrzennego można uzyskać tylko z jednego, konkretnego punktu przestrzeni. Wykonując więc dwa zdjęcia tego samego obiektu, z dwóch różnych punktów przestrzeni (rys. 11), uzyskamy dwa zawsze różne jego obrazy o jednoznacznie ustalonych jednokierunkowych relacjach przedmiot \rightarrow obraz. Przy wykorzystaniu



Rys. 11. Fotografowanie lub dwuobrazowe opracowanie obiektu przestrzennego

przynajmniej dwóch takich relacji staje się jednak możliwe, co zresztą wynika z rysunku 11, ustalenie jednoznacznej relacji zwrotnej w postaci: dwa różne obrazy płaskie \rightarrow przestrzenny oryginał.

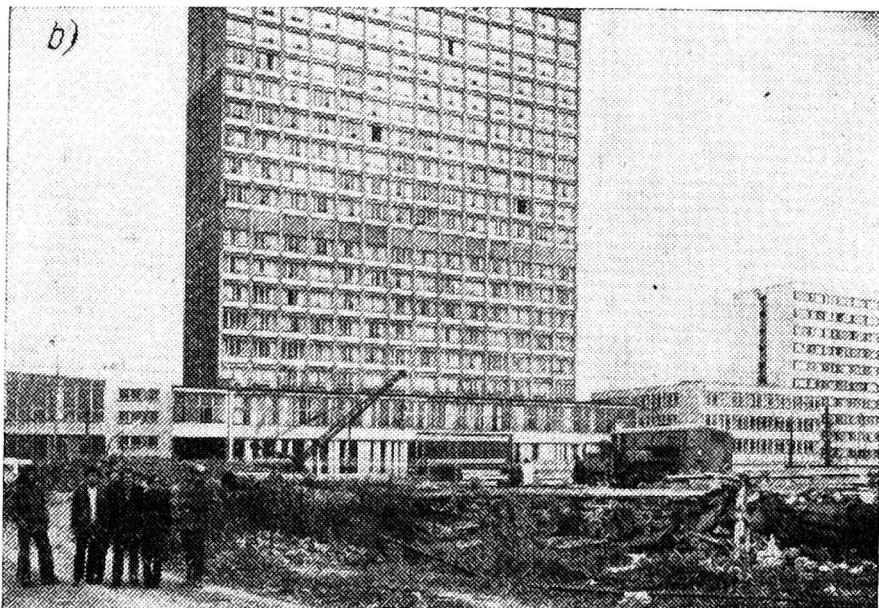
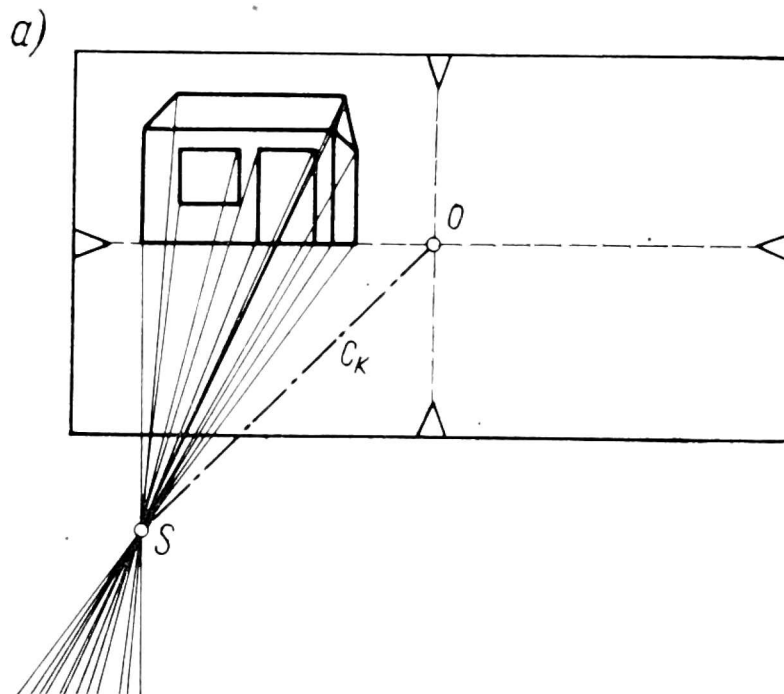
Materializując w pewnym sensie tę zależność należy wykorzystać dwa aparaty jako projektory ustawione tak jak w czasie fotografowania. Oczywiście jest, że pochodzące od jakiegoś wybranego punktu obrazy wyznaczają w projekcji odwrotnej dwa promienie świetlne, które zmierzając od aparatów spotkają się dokładnie w tym miejscu, w którym znajdował się w czasie fotografowania oryginał punktu. W przestrzeni pojawia się więc, jako synteza dwóch wiązek, dokładna kopia oryginału, którą należałoby teraz zmierzyć w taki sposób, aby oddać przestrzenne kształty obiektu.

FOTOGRAMETRYCZNE KAMERY POMIAROWE

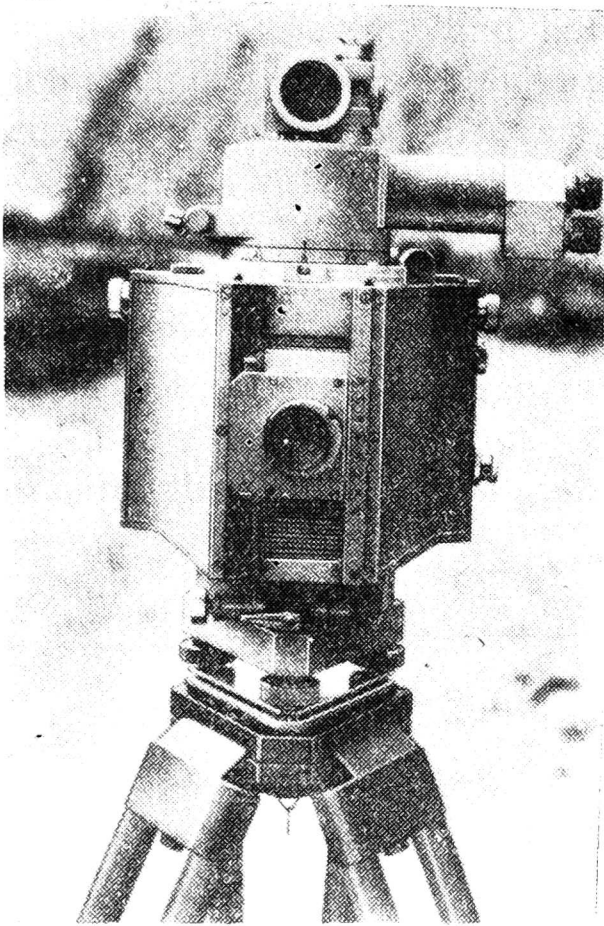
Jak wynika z dotychczasowych rozważań, podstawą opracowania fotogrametrycznego jest zdjęcie, a zatem od jego walorów fotograficznych i geometrycznej wierności rzutu środkowego zależy jakość i precyzja późniejszego opracowania.

Obiektyw kamery pomiarowej musi być bardzo starannie skorygowany ze względu na wszystkie aberacje optyczne, oraz musi posiadać dużą zdolność rozdzielczą i możliwie mały spadek jasności. Materiał światłoczuły — najchętniej klisze szklane, ponieważ błona (używana przy zdjęciach lotniczych) wymaga specjalnych zabiegów przy uzyskiwaniu płaszczyzny rzutów (warunek geometryczny).

Ponieważ przy wszystkich opracowaniach przestrzennych (a jest ich zdecydowana większość, gdyż obiekty naprawdę płaskie należą do rzadkości) materiałem źródłowym jest zdjęcie uzupełnione podaniem lokalizacji środka rzutów, kamery fotogrametryczne są metalowymi monolitami ze stałą (na ogół) odległością obrazu, zakończonymi od strony kliszy ramką ze specjalnymi znaczkami (rys. 12), służącymi do nawiązania położenia środka rzutów. W celu orientacji położenia zdjęcia w przestrzeni wyposażone są one w specjalną przystawkę orientującą (rys. 13), montowaną na teodolicie lub też jako tzw. kamera stereometryczna (rys. 14) — w postaci dwóch sztywno połączonych kamer, w znanym, możliwie prostym geometrycznie zespole.

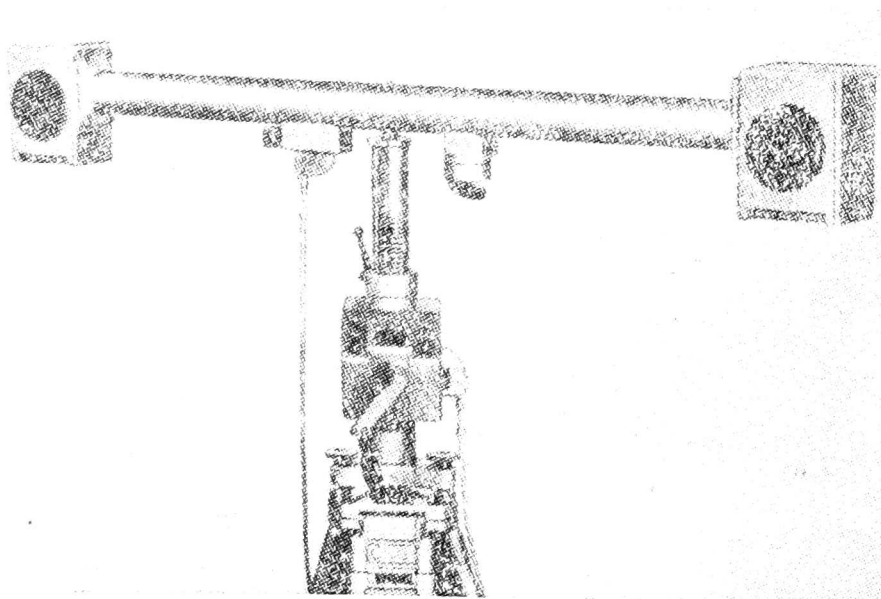


Rys. 12. Rekonstrukcja wiązki promieni rzutujących: *a* — zasada odtwarzania położenia środka rzutów wewnątrz kamery oraz sposób jego wykorzystania, *b* — zdjęcie z fototeodolitu — na bokach widoczne znaczkami tłowymi, w prawym górnym rogu odległość obrazu C_k



Rys. 13. Fototeodolit firmy Zeiss; dolna część przyrządu — to kamera pomiarowa, górna — nasadka orientująca

Spełnienie wszystkich (lub większości) wymienionych warunków pozwala na wykonywanie pomiarów fotogrametrycznych z dokładnością rzędu kilku setnych milimetra lub nawet mikrometrów w skali zdjęć. Czasami jednak sprawą ważniejszą od dokładności jest możliwość wykonania pomiarów, dlatego spotykamy w różnych opracowaniach fotogrametrycznych wykorzystanie kamer filmowych, aparatów amatorskich, czy też innego sprzętu specjalnego. Jest to na ogół jednak okupione spadkiem dokładności mimo częstego stosowania w takich przypadkach specjalnych zabiegów w trakcie opracowania kameralnego.



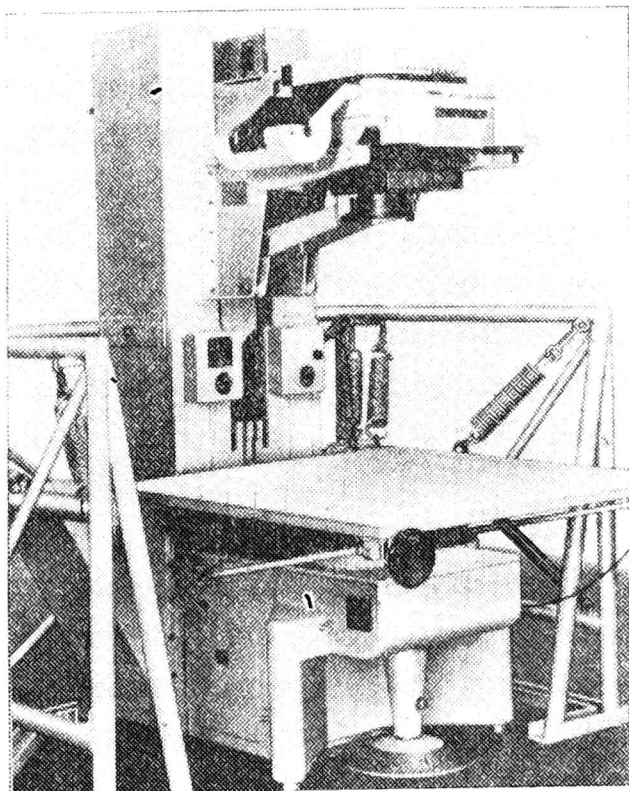
Rys. 14. Kamera stereometryczna

METODY OPRACOWAŃ FOTOGRAMETRII JEDNOOBRAZOWEJ

Pewne znamiona jedoobrazowego opracowania fotogrametrycznego nosi proces fotograficznej reprodukcji obrazów, druku itp. Dzięki temu, że zarówno przyzwoite stanowisko reprodukcyjne, jak i powiększalnik cechuje fabrycznie zagwarantowana równoległość płaszczyzn przedmiotu i obrazu, a ponadto wymagania z zakresu dokładności nie są zbyt wygórowane — prace te nie nastroczą istotnych trudności technicznych. Trudności takie rosną, gdy obiekt jest duży, gdy nie można go sfotografować na dokładnie równoległej doń kliszy, gdy wreszcie rosną wymagania, dotyczące dokładności. Dopiero w tym momencie należy wkroczyć z metodami fotogrametrycznymi.

Realizacja wykazanych na rysunku 10 związków pomiędzy płaskim obiektem i jego dowolnie zorientowanym zdjęciem fotogrametrycznym nosi nazwę przetwarzania. W teorii przetwarzania udowadnia się, że można je zrealizować przy użyciu różnej niż fotografująca wiązki światła promieni prostych, a jednym, koniecznym warunkiem jest zgodność czterech par punktów zdjęcia przetworzonego obrazu.

Przetworzenie może być zrealizowane na drodze graficznej, optycznej, fotomechanicznej czy wreszcie analitycznej. Praktycznie stosowana jest niemal wyłącznie metoda fotomechaniczna, gdyż z jednej strony jest ona najszybsza i najtańsza, z drugiej strony — dzięki dostarczaniu materiału wynikowego w postaci fotograficznej — jedynie ona zachowuje pełne bogactwo szczegółów zdjęcia. Przyrządem służącym do opracowania jest przetwornik (rys. 15). Ponieważ materiałem wynikowym jest



Rys. 15. Przetwornik fotomechaniczny

zdjęcie obiektu na równoległej do niego płaszczyźnie i w ściśle określonej skali — przetwornik jest dużym, solidnie wykonanym powiększalnikiem z dodatkowymi stopniami swobody — nachyleniami zdjęcia i ekranu oraz przesunięciami negatywu w jego płaszczyźnie. Zachowania ostrości całego przetwarzanego obrazu pilnują w nim dwa analogi mechaniczne, co znakomicie upraszcza obsługę przyrządu.

Podobną co przetwornik rolę spełniać może przy mniej dokładnych opracowaniach projektor o krótkiej ogniskowej. Ponieważ pracuje on już na zasadzie zachowania kształtu wiązki promieni, wymagane jest tu zmniejszenie zdjęć w stosunku wynikającym z proporcji odległości obrazu kamery i projektora.

Niewątpliwie przy pewnej znajomości zasad fotogrametrii oraz przy współpracy z dobrym warsztatem mechanicznym można pokusić się o przerobienie na „przetwornik” jakiegoś powiększalnika, lecz z góry wiadomo, że będzie to sprzęt prymitywny, o niskiej wartości technicznej. Sens takich poczynań można sobie wyobrazić w sytuacji, gdy w grę wchodziłyby, np. badania porównawcze dużych serii prostych obiektów, przy czym żądana dokładność względna nie mogłaby być wysoka.

Warto wspomnieć jeszcze o kryteriach stosowania innych niż fotomechaniczna metoda przetwarzania. Na przykład wykorzystanie metody graficznej może mieć sens przy przetwarzaniu pojedynczych punktów i przy niskich wymaganiach dokładnościowych; metody optycznej — również przy niskich wymaganiach dokładnościowych, ale przy znacznie bogatszej treści; natomiast metody analitycznej — przy wysokich wymaganiach dokładnościowych. W tym ostatnim przypadku unikamy bowiem podstawowego źródła dość znacznych nawet błędów — papieru fotograficznego, którego stabilność wymiarów jest od 1 do 2 rzędów mniejsza niż stabilność średniej jakości materiału negatywowego.

Należy wreszcie zaznaczyć, że metody jednoobrazowe w swej czystej postaci nie miałyby niemal racji bytu, gdyż rzeczywiście płaskie obiekty należą do rzadkości. Po pewnych niezbędnych modyfikacjach są one jednak, dzięki swoim walorom ekonomicznym, stosowane przy produkcji map, przy czym mimo tych modyfikacji godzimy się wówczas z niższą wartością techniczną tych map.

METODY OPRACOWAŃ FOTOGRAMETRII DWUOBRAZOWEJ

Przestrzenne opracowanie fotogrametryczne przedstawiono jako dokładne odwrócenie procesu podwójnego fotografowania. Oczywiście sytuacja taka byłaby możliwa jedynie w pewnych, specjalnie dobranych warunkach. Odwrócenie to ma również miejsce, lecz realizowane jest przy pomocy innego sprzętu niż użyty do fotografowania, często odmienny-

mi — niż optyczne — metodami projekcji. Aby uzmysłwić sobie konieczny przebieg opracowania fotogrametrycznego, podzielmy je na poszczególne czynności elementarne.

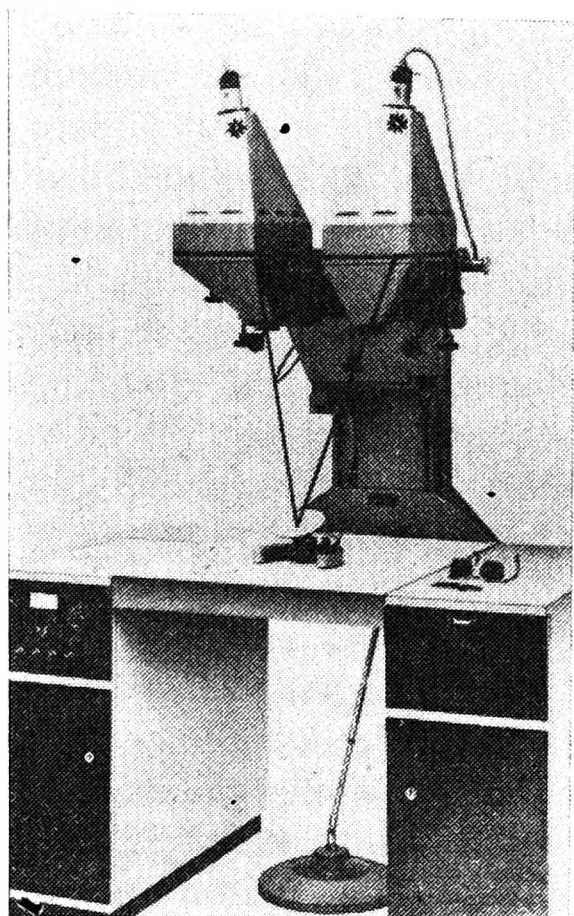
1. Rekonstrukcja wiązek promieni rzutujących. Jeżeli na podstawie informacji z wnętrza kamery fotogrametrycznej przypiszemy opracowanym zdjęciom właściwie zlokalizowane środki rzutów, to możemy dokonać dokładnej rekonstrukcji dwóch wiązek fotografujących. Jest to czynność wstępna, nieodzowna dla zbudowania przestrzeni na podstawie dwóch jej płaskich obrazów.

2. Rekonstrukcja położzeń obydwóch kamer. Jeżeli w oparciu o dodatkowe pomiary terenowe lub o uzyskane innym sposobem parametry zrekonstruujemy lokalizację obydwóch wiązek w przestrzeni, to pary odpowiadających sobie promieni rzutujących wcześniej zrekonstruowanych wiązek przetną się, wyznaczając w ten sposób model sfotografowanego obiektu. Należy tu zaznaczyć, że fotogrametryczny model przestrzenny jest pojęciem geometrycznym, różnym od wprowadzonego wcześniej stereoskopowego modelu terenu — pojęcia optycznego.

3. Obserwacja i pomiar modelu przestrzennego. Zrekonstruowany już model przestrzenny obiektu należy ujawnić w postaci optycznej, dogodnej do interpretowania jego treści i wykonywania pomiaru wybranych jego elementów. Ponadto w przestrzeni modelu musi się znajdować przydatny do wykonywania pomiarów układ pomiarowy, tj. przestrzenny znaczek pomiarowy oraz związany z nim układ mierzący.

Wymienione operacje są wprawdzie proste pojęciowo i geometrycznie, jednakże ich realizacja jest dość skomplikowana. Fotogrametria przestrzenna zaczęła, podobnie zresztą jak i płaska, od metod graficznych, które w dalszym rozwoju zostały całkowicie wyeliminowane przez analogowe metody mechaniczno-optyczne oraz częściowo przez metody analityczne. Opracowania wykonuje się na przyrządach zwanych autografami, natomiast opracowania analityczne (część pomiarowa) na tzw. stereokomparatorze (rzadziej monokomparatorze), a część obliczeniową najczęściej na maszynie cyfrowej.

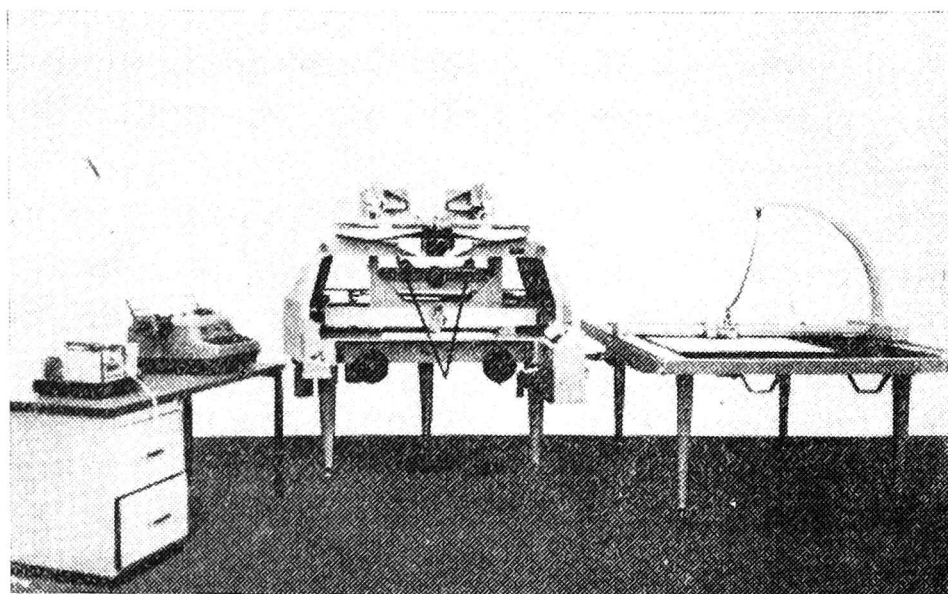
Kilkadziesiąt istniejących dziś konstrukcji autografów można zebrać w dwóch syntetycznych grupach, różniących się sposobem rekonstrukcji wiązek promieni rzutujących. W autografach o optycznej projekcji (rys. 16) zdjęcia wkładane są do odpowiednio skonstruowanych projektorów i oświetlane od tyłu. Natomiast w autografach o projekcji mechanicznej (rys. 17) funkcje projektorów pełnią specjalne nośniki połączone z przegubowo zawieszonymi drążkami metalowymi (wodzidłami), materializującymi wybrane promienie rzutujące. Zarówno w jednym, jak i w drugim typie autografów zdjęcie musi być dokładnie wpasowane za pomocą znaczków tłowych, a odległość obrazu (odległość zdjęcia mechanicznego



Rys. 16. Autograf o projekcji optycznej; na rysunku zaznaczono położenia źródeł światła, zdjęć oraz przebieg promieni rzutujących

lub optycznego środka rzutów) zgodna z odległością obrazu kamery fotograficznej. W autografach o projekcji mechanicznej osiąga się to przez mechaniczne ustawienie żądanej odległości. W autografach o projekcji optycznej — przez dobór odpowiedniego projektora i drobną korektę odległości lub przez przefotografowanie oryginalnego negatywu z odpowiednią korektą skali.

W każdym autografie projektory (mechaniczne lub optyczne) muszą posiadać taką ilość odpowiednio dobranych stopni swobody, aby możliwe



Rys. 17. Autograf o projekcji mechanicznej z koordynatografem oraz przystawką rejestrującą; na rysunku oznaczono bieg mechanicznych promieni rzutujących

było powtórzenie ustawienia kamer w czasie fotografowania. Dokładne powtórzenie wzajemnego usytuowania kamer jest bowiem nieodzownym warunkiem spotkania się w przestrzeni par homologicznych promieni, tzn. powstania modelu. Natomiast pewna swoboda ruchów usztywnionego już zespołu kamer (a ściślej — projektorów) pozwala na zmianę położenia zrekonstruowanego modelu względem pomiarowego układu odniesienia, co zawsze ułatwia interpretację i wykorzystanie wyników pomiaru, a w pewnych przypadkach jest nawet niezbędne.

Mówiąc o rekonstrukcji położenia obydwóch kamer, zakładamy geometryczne podobieństwo układu odtwarzającego i fotografującego, gdyż bardzo często nie ma możliwości zachowania wierności wymiarów. W tym przypadku model budowany jest w jakiejś wybranej, najczęściej okrągłej skali, a osiąga się to w wyniku proporcjonalnego zmniejszenia wszystkich wielkości liniowych, przy zachowaniu identyczności parametrów kątowych.

Sposób postępowania orientacyjnego uzależniony jest od rodzaju posiadanych danych dodatkowych, tzn. elementów wewnętrznej i zewnętrznej orientacji zdjęć. Jeżeli odpowiednie wartości znamy, to ustawiamy je bezpośrednio na właściwych licznikach, w przypadku przeciwnym wyznaczamy je w procesie zwanym strojeniem zdjęć. W tym ostatnim przypadku musimy jednak dysponować pewną ilością punktów, których położenie na zdjęciu jest dokładnie zidentyfikowane, a położenie na oryginale znane z pomiarów pomocniczych, wykonanych innymi metodami.

Przy obserwacjach i pomiarach podstawową sprawą jest ujawnienie w dogodnej do stereoskopowej obserwacji postaci zrekonstruowanego już przestrzennego modelu obiektu. W przypadku projekcji optycznej jest to proste — mianowicie we właściwe miejsce podstawiamy biały ekran i przy pomocy filtrów i okularów barwnych (anaglify) lub polaryzacyjnych oglądamy obraz przestrzenny. Wprowadzenie ruchomego ekranu zaopatrzonego w świecący punkcik ułatwia obserwacje przestrzennego znaczka pomiarowego. Przy projekcji mechanicznej, gdzie nie następuje przeniesienie obrazu fotograficznego na powierzchnię modelu, gdyż punkt modelu (zawsze tylko jeden) jest po prostu materialnym punktem przecięcia dwóch wózdideł, należy postąpić zgoła inaczej. Stosujemy w tym przypadku układ podwójnego mikroskopu do bezpośredniej obserwacji zdjęć, przy czym obiektywy tego systemu optycznego są ruchome i sterowane przez końce wózdideł. W systemie optycznym umieszczony jest, w postaci dwóch swoich komponentów, przestrzenny znaczek pomiarowy, przy czym ustawienie jego ściśle odpowiada punktowi nacelowania wózdideł.

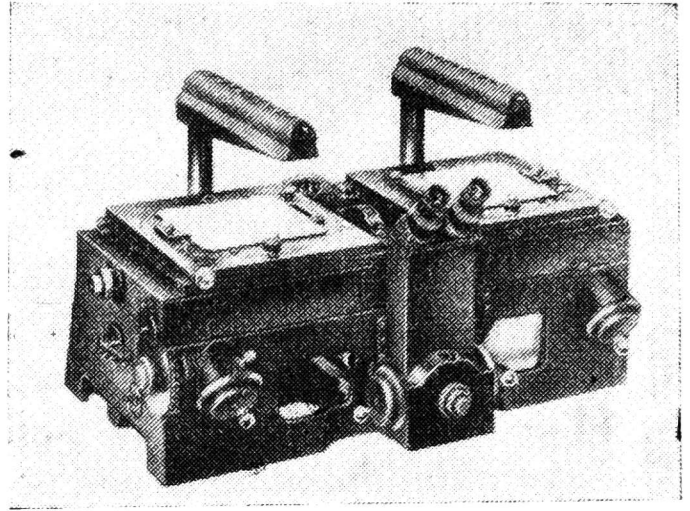
Funkcją układu mierzącego jest rejestrowanie w ustalonej konwencji

położeń wybieranych przez obserwatora przez dotknięcie znacznikiem kolejnych punktów modelu przestrzennego. Ze względu na swe podstawowe przeznaczenie — opracowanie map — każdy autograf posiada sprzężone z punktem modelu urządzenie, rysujące rzut obiektu na płaszczyznę w przybliżeniu równoległą do płaszczyzny zdjęć oraz licznik wysokości (głębi, trzeciego wymiaru przestrzeni). Sprzężenie to może być bezpośrednie lub pośrednie przy pomocy pantografu lub koordynografu ze zmiennymi przełożeniami, co pozwala uzyskać opracowanie w skali różnej niż skala modelu. Trwałe sprzężenie znaczka z układem mierzącym w połączeniu z rozdzieleniem napędu trzech ruchów w przestrzeni pomiędzy dwie ręce i jedną nogę obserwatora pozwala na ciągłe rysowanie nie tylko krzywych płaskich, lecz i przestrzennych (tych ostatnich oczywiście w rzucie na płaszczyznę). Większość autografów jest ponadto wyposażona w liczniki pozostałych dwóch współrzędnych, dzięki czemu można mierzony obiekt przedstawić w postaci cyfrowej, tj. przez podanie przestrzennych współrzędnych kolejnych jego punktów. Niektóre autografy pozwalają na wykonanie opracowania graficznego w rzucie nie tylko na jedną płaszczyznę układu współrzędnych, ale na dwie, a nawet na trzy.

Ogólny pęd do automatyzacji nie ominął na szczęście i fotogrametrii. Wiele autografów wyposażać dziś można w urządzenia do automatycznej rejestracji współrzędnych punktów na tabulogramie i na taśmie lub kartach dziurkowanych. Niektóre z tych urządzeń pozwalają również na digitalizację linii krzywych, dzięki rejestrowaniu współrzędnych w ustalonych automatycznie odstępach czasu bądź odległości. Zakupiono wreszcie automatycznego obserwatora wysokości, który potrafi kreślić warstwie lub przekroje.

Pomiar fotogrametryczny obiektów trójwymiarowych zrealizować można nie tylko analogowo, lecz również analitycznie. Ze względu na to, że odpowiednie wzory są (z wyjątkiem pewnych szczególnych układów geometrycznych zdjęć) dość skomplikowane, metody analityczne występowały dawniej niemal śladowo. Z tego zresztą powodu fotogrametria zyskała w swoim czasie w pełni zasłużony przydomek „sztuki unikania rachunków”. Dziś, dzięki nieograniczonym niemal możliwościom obliczeniowym, metody analityczne znajdują coraz szersze zastosowanie, a przy niektórych zadaniach nawet skutecznie wypierają metody analogowe.

Podstawowym przyrządem dla opracowań analitycznych jest stereokomparator (rys. 18). Posiada on dwa nośniki zdjęć wyposażone w odrębne układy pomiarowe oraz podwójny mikroskop, wyposażony w znaczek pomiarowy. Należy tu zwrócić uwagę na fakt, im mimo że obserwowany w stereokomparatorze obraz stereoskopowy obiektu może być identyczny



Rys. 18. Stereokomparator

z obrazem tego obiektu w autografie o mechanicznej projekcji, to w stereokomparatorze wykonujemy jedynie pomiar współrzędnych punktów na obydwóch zdjęciach (bo tylko takie posiada on możliwości konstrukcyjne), natomiast w autografie — bezpośrednio pomiar przestrzennego modelu obiektu, zrekonstruowanego dzięki odpowiednim podzespołom autografu.

Elektroniczna technika obliczeniowa wprowadziła do fotogrametrii jeszcze jedną nową jakość, a mianowicie, autograf katalityczny. Jest to sprzężenie zwrotne stereokomparatora z elektroniczną maszyną cyfrową, przy czym stereokomparator wypełnia funkcje obserwacyjno-pomiarowe, natomiast maszyna cyfrowa pozostałe funkcje autografu. Autograf ten jest o tyle godny uwagi, że maszynie cyfrowej obce są jakiegokolwiek (oprócz absurdalnych geometrycznie konstrukcji) ograniczenia, których nie można uniknąć przy żadnej konstrukcji mechanicznej.

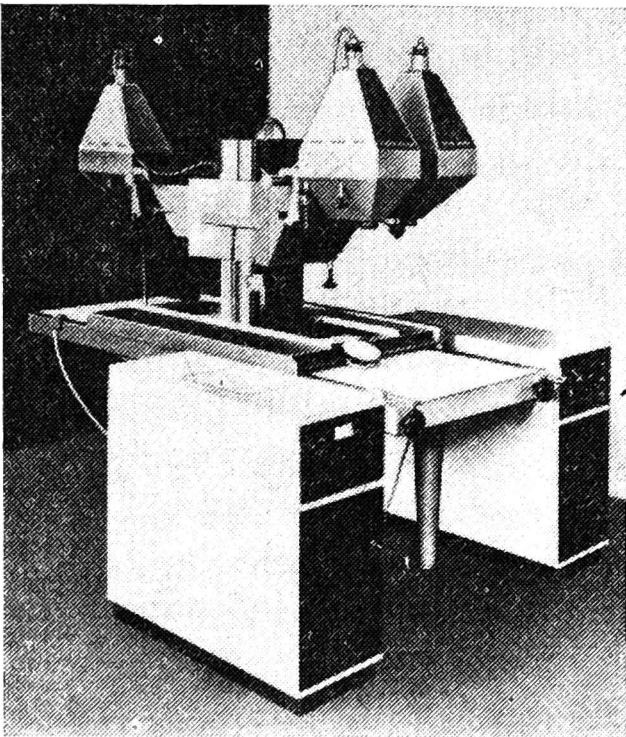
O ile reprezentowany wcześniej opis fotogrametrii jednoobrazowej można uznać za wyczerpujący w sensie ogólnym, o tyle w fotogrametrii dwuobrazowej ograniczono się jedynie do opisu rozwiązania podstawowego zadania. Fotogrametria jest bowiem nauką skomplikowaną, a jej możliwości większe niżby to wynikało z opisu.

ORTOFOTOGRAFIA

Niemożność uzyskania planu obiektu przestrzennego metodą przetwarzania wynika stąd, że rozmieszczenie jego elementów wyklucza w tym przypadku uzyskanie jednolitej skali całego obiektu, gdyż skala jest funkcją m. in. odległości fotografowania. Zaradzono temu przy pomocy przetwarzania strefowego, w którym zdjęcie jest przetwarzane częściami, a podstawą podziału są różnice wysokości (głębi) poszczególnych partii obiektu. Sposób ten jest jednak niewygodny, gdyż np. przy opracowaniach mapowych wymaga posiadania podkładu wysokościowego, a

przy tym niedokładny, gdyż nie daje możliwości ciągłych zmian skali. Problem ten został rozwiązany dopiero niedawno przy pomocy ortofotografii.

Projektor sprzężono z autografem w ten sposób, że autograf steruje uzyskaną w projektorze skalą w zależności od aktualnej wysokości znaczka pomiarowego. Jeżeli w projektorze umieścimy jedno ze zdjęć stereogramu i nadamy mu nachylenia przeniesione z odpowiedniej kamery autografu, to dotykanie znaczkiem modelu przyporządkowuje przetworzeniu stałą skalę w otoczeniu punktu nacelowania. Jeżeli zatem będziemy naświetlać umieszczony pod projektorem materiał światłoczuły przez mały otwór, sprzężony z płaskim (i wysokościowym) położeniem znaczka pomiarowego, to bez trudu uzyskamy plan o jednolitej skali, wyrażony w komunikatywnej konwencji fotograficznej (rys. 19).



Rys. 19. Autograf z przystawką do ortofotografii

Ortofotografia nosi również nazwę przetwarzania pasmowego, gdyż naświetlanie odbywa się wąskimi pasmami w czasie przebiegów znaczka (i szczeliny naświetlającej) po trajektoriach o równoległych i równo odległych rzutach na płaszczyznę przetwarzania.

PRZYKŁADY OPRACOWAŃ FOTOGRAMOMETRYCZNYCH

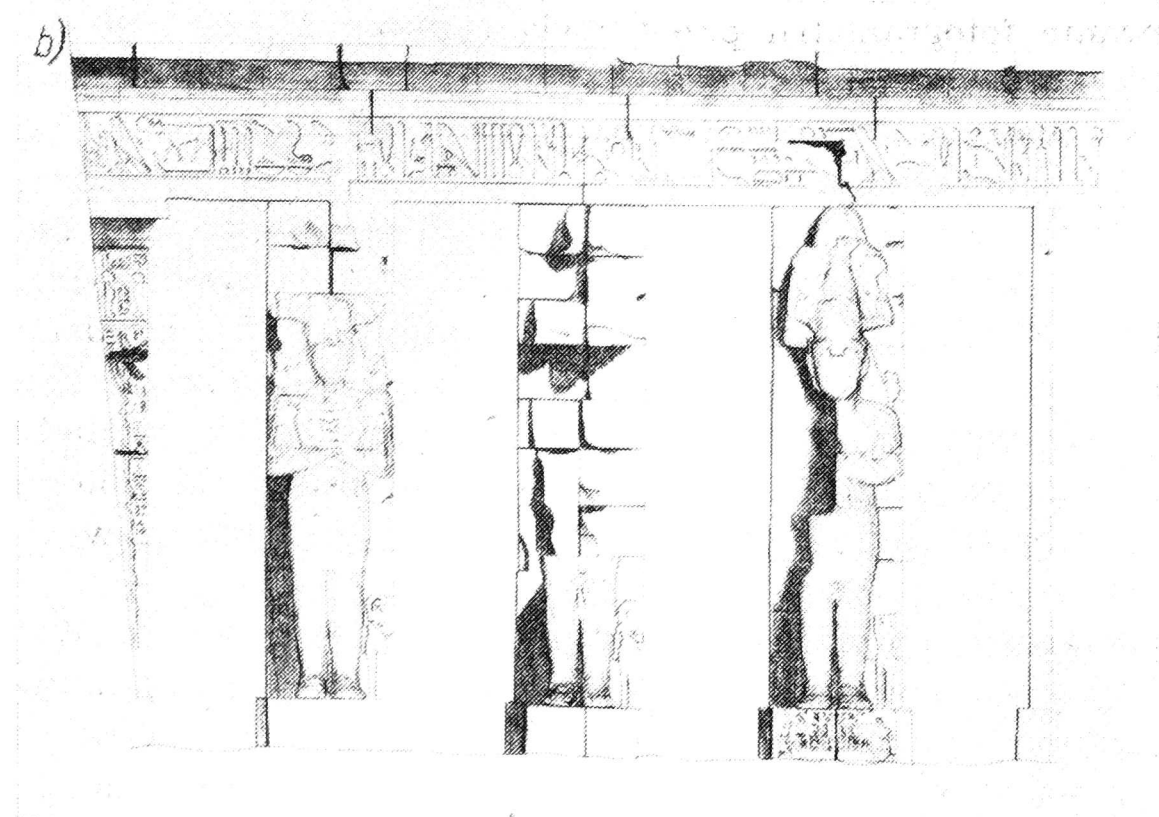
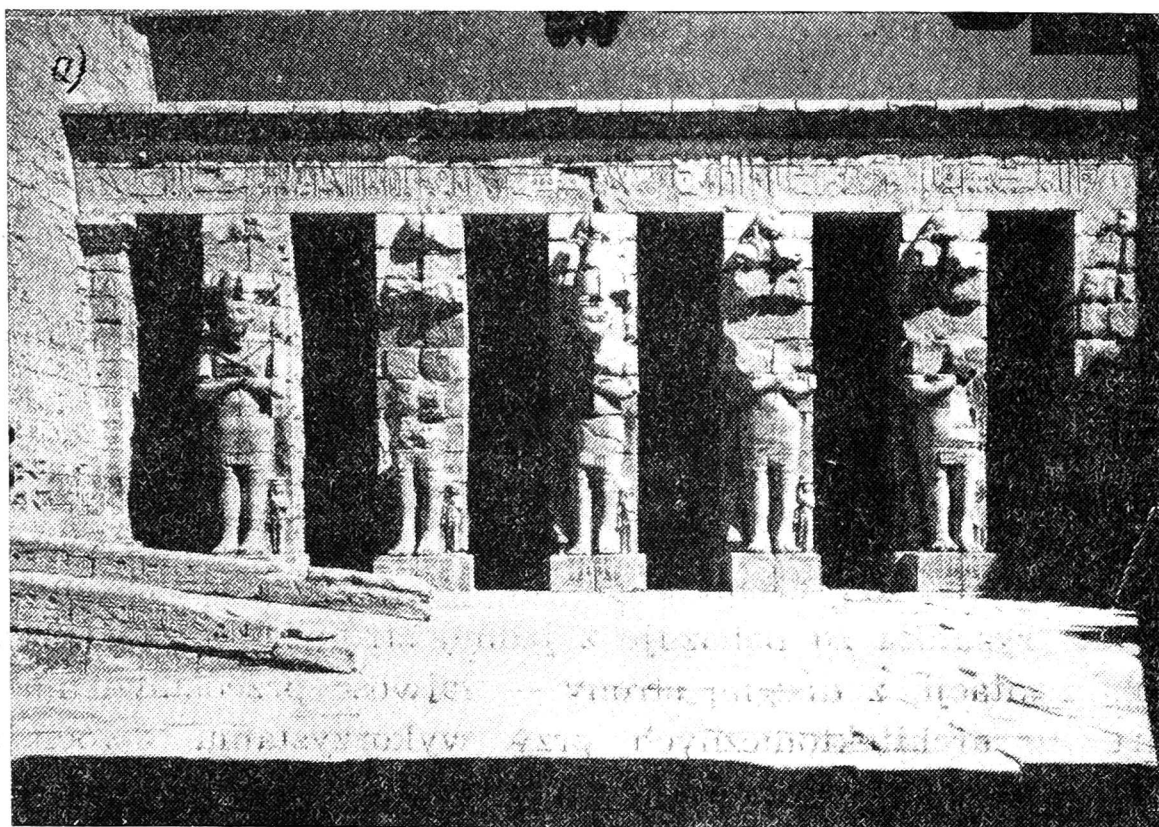
Jak wspomniano już wcześniej, podstawową dziedziną zastosowań fotogrametrii są różnorodne pomiary geodezyjne i topograficzne. Ponieważ równocześnie dziedzina ta jest stosunkowo najbardziej popularna, pomijamy ją dalej całkowicie, prezentując wyłącznie nietopograficzne zastosowania fotogrametrii.

Spośród szerokiego wachlarza prac fotogrametrycznych wybrano kilka bardziej interesujących opracowań pod kątem wykazania różnorodnych możliwości i najistotniejszych zalet fotogrametrii. Zaprezentowane przykłady nie są niestety, najlepiej dopasowane do zawodowych i naukowych zainteresowań czytelników. Przyczyna jest banalna — dotychczasowy brak kontaktów między fotogrametrami a przedstawicielami nauk rolniczych lub z rolnictwem związanych, a w konsekwencji — brak inspiracji lub zamówień na przydatne w tych dziedzinach prace pomiarowe.

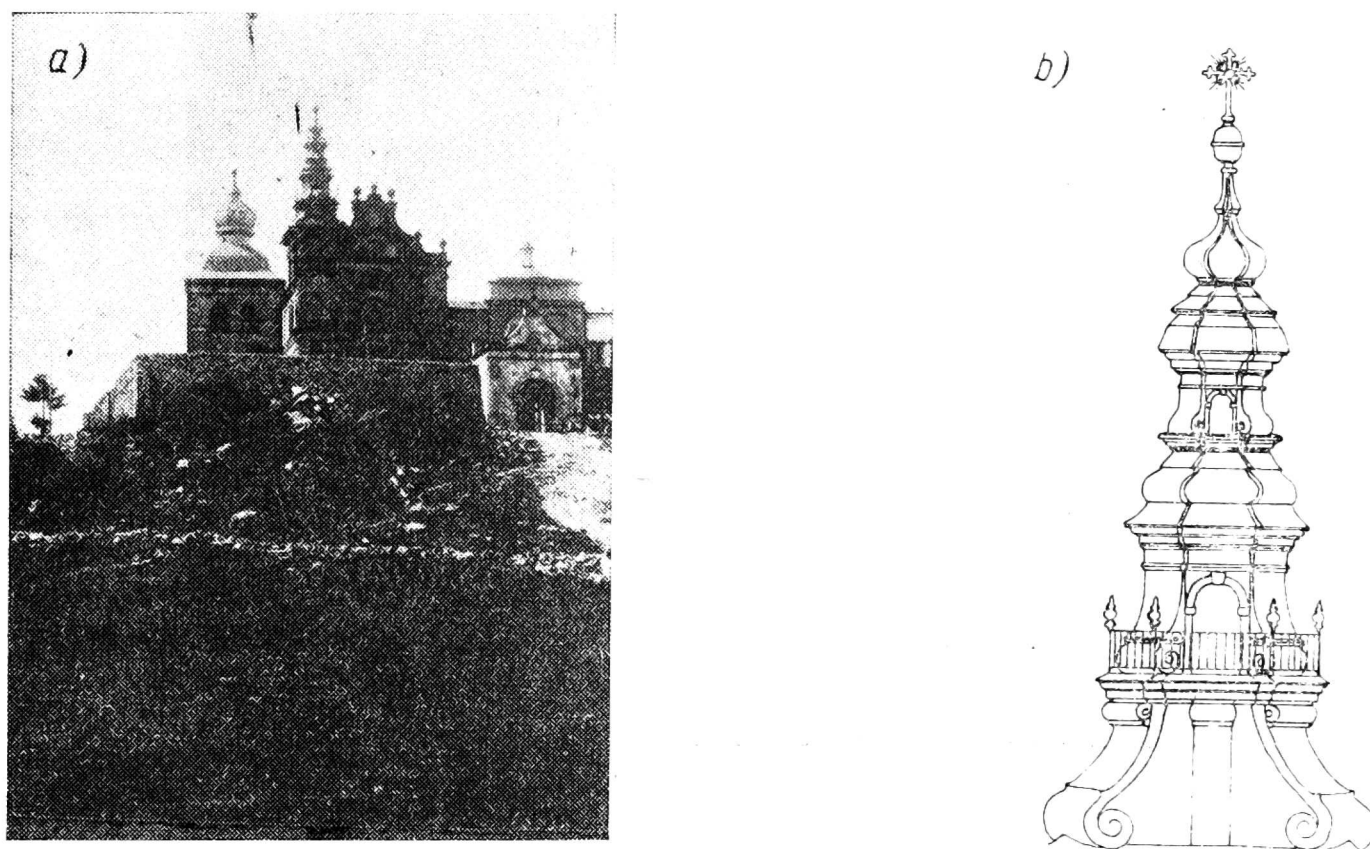
1. Opracowanie świątyni Meninet Habu w Egipcie. Przykład ten, zaczerpnięty z prac dr inż. M. Niepokólczyckiego dla Polskiej Stacji Archeologicznej, prezentuje drugie, po geodezyjnych, ważne zastosowanie fotogrametrii — pomiary architektoniczne. Fragment opracowania przedstawiony na rysunku 20 pokazuje z jednej strony olbrzymią szczegółowość dokumentacji, z drugiej strony — łatwość przedstawienia dowolnych struktur architektonicznych przy wykorzystaniu dwóch równoważnych konwencji: rysunku sytuacyjnego reliefu oraz rysunku warstwicowego rzeźb. Na szczególne podkreślenie zasługuje geometryczna wierność rysunku, jednolita dokładność dla wszystkich jego fragmentów oraz znikomy nakład prac terenowych przy względnej prostocie późniejszego opracowania kameralnego.

2. Rekonstrukcja dokumentacji wieży kościoła na Świętym Krzyżu. Zastosowanie fotogrametrii przedstawia rysunek 21. Jest to — opracowana przy współudziale autora — elewacja zburzonej w czasie I wojny światowej wieży kościoła na Św. Krzyżu, odtworzona na podstawie trzech wcześniejszych zdjęć fotograficznych. Zdjęcia te, dane jedynie w postaci reprodukcji z odbitek stykowych, charakteryzowały się bardzo korzystnym układem geometrycznym. Mała szczegółowość rysunku jest spowodowana słabą jakością fotograficzną zdjęć oraz bardzo dobrą skalą, ponieważ były to typowe widokówki, obejmujące cały zespół klasztorny. Niewątpliwie omawiane opracowanie charakteryzuje się niezbyt wysoką dokładnością, prezentuje jednak inną istotną właściwość fotogrametrii, a mianowicie, umiejętność wykorzystania wartości pomiarowych nawet archiwalnego materiału zdjęciowego.

3. Pomiar konstrukcji nośnej kopuły Teatru Rozrywki w Warszawie. Wykonany przy współudziale autora pomiar kształtu i przestrzennego rozmieszczenia elementów stalowej konstrukcji nośnej Teatru Rozrywki wskazuje na inną poważną dziedzinę zastosowań fotogrametrii. Dziedziną tą są pomiary kształtu i odkształceń różnorodnych obiektów inżynierskich. Wyniki omawianej pracy, wykonanej dla Mostostalu Zabrze, stanowiły dane wyjściowe do ekspertyzy wytrzymałościowej całej konstrukcji. Rysunek 22 przedstawia fragment opracowania — graficzną



Rys. 20. Opracowanie świątyni Medinet Habu w Egipcie: *a* — jedno ze zdjęć fotogrametrycznych, *b* — fragment wykonanego na autografie opracowania graficznego

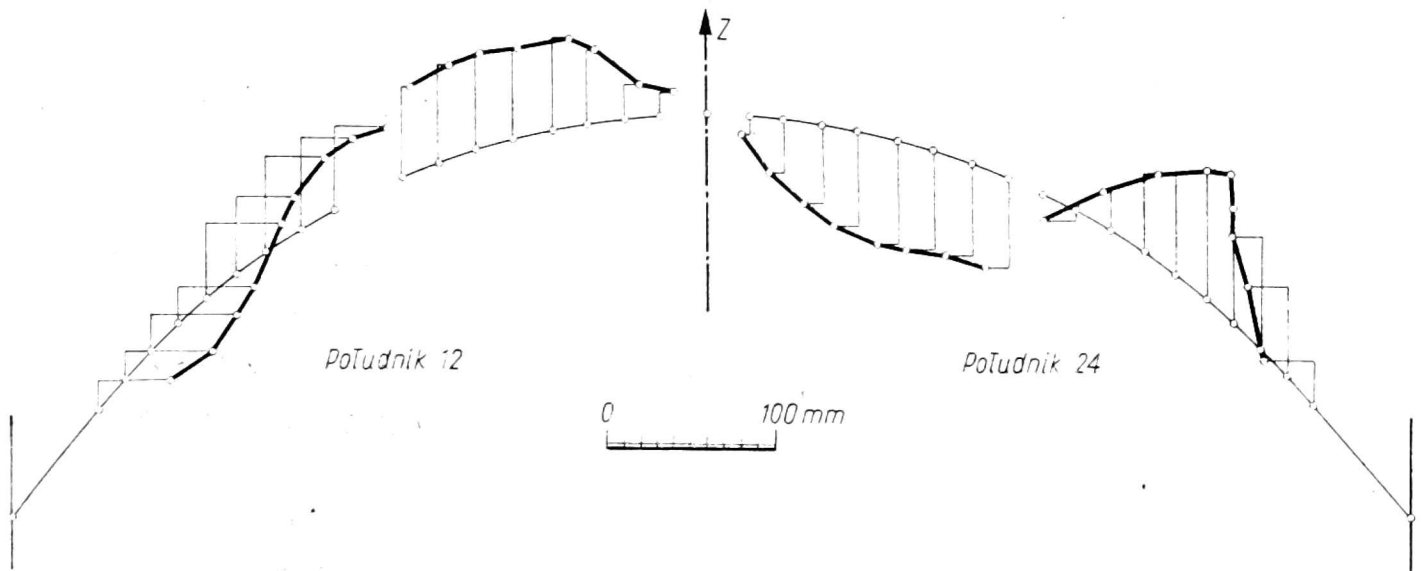
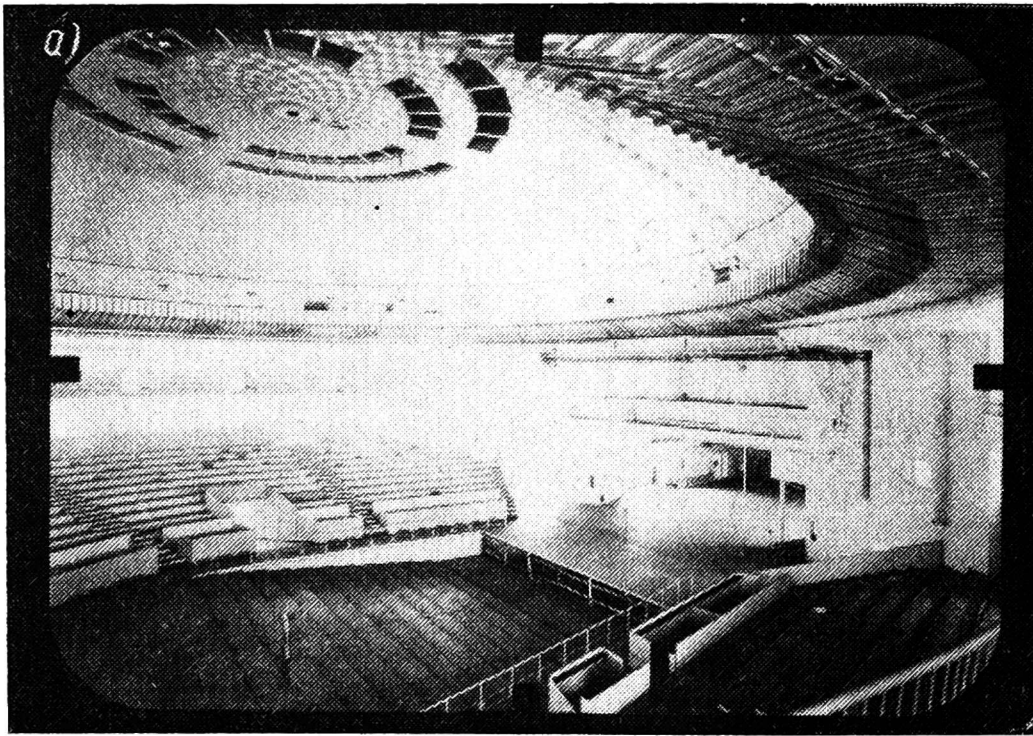


Rys. 21. Opracowanie zburzonej wieży kościoła na Św. Krzyżu: *a* — jedno z archiwalnych zdjęć, *b* — autogrametryczny rysunek elewacji wieży

interpretację odchylen jednej z dwunastu rur nośnych kopuły od projektowanego kształtu. Przerwy w wykresie spowodowane są trudnością w jednoznacznej interpretacji odpowiednich węzłów oraz brakiem ich widoczności. Godną podkreślenia zaletą fotogrametrii jest w tym przypadku możliwość wykonania pomiaru z większej odległości, bez konieczności budowy rusztowań, demontażu wystroju wewnętrznego itp. Jako punkty pomiarowe wykorzystano fragmenty przyspawanych do rur nośnych kształtek, interpretowane jednoznacznie jedynie dzięki wykorzystaniu efektu stereoskopowego. Drugą, istotną dla wszelkich pomiarów konstrukcji inżynierskich zaletą fotogrametrii jest wysoka, niejednokrotnie konkurencyjna w stosunku do tradycyjnych metod geodezyjnych, dokładność opracowania przy znacznie obniżonej pracochłonności. Dalsze zalety, szczególnie istotne przy pomiarach na terenie dużych zakładów pracujących w ruchu ciągłym, to krótki, w minimalnym stopniu dezorganizujący pracę czas pomiarów terenowych oraz znikome zagrożenie zdrowia lub życia członków ekipy pomiarowej, gdyż przebywają oni poza strefą pracy badanych maszyn i urządzeń.

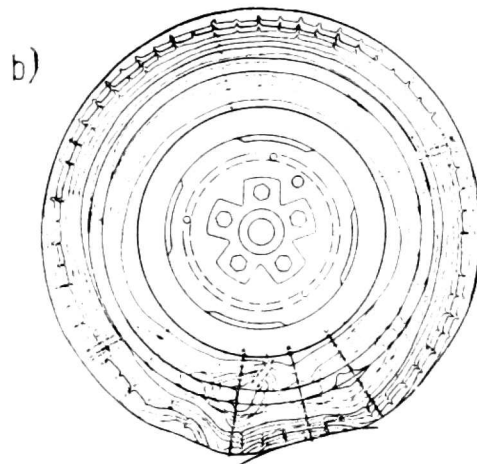
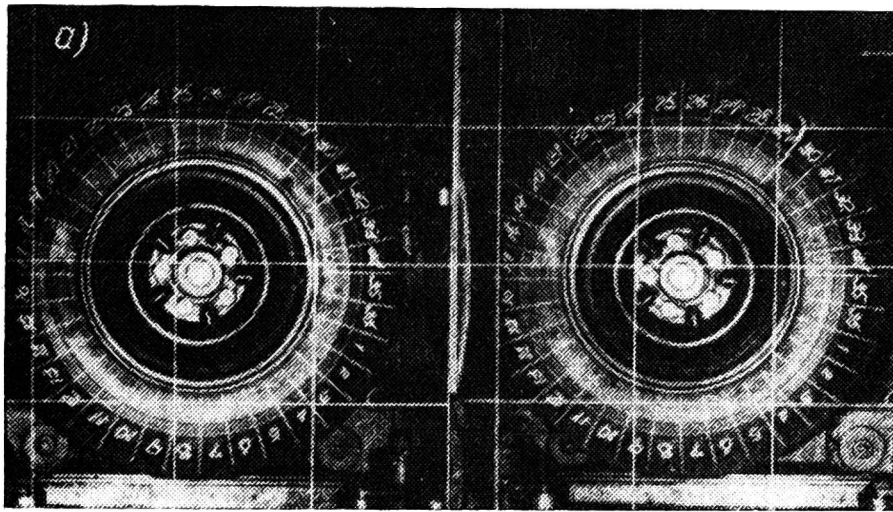
4. Pomiar kształtu opony samochodowej przy dużych szybkościach [7]. Bardzo ciekawy zaczerpnięty z literatury² przykład, to pomiar

² T. Maruyasu, T. Oschima: Short Range Photogrammetry of Object in Motion. Internationales Archives of Photogrammetry, Commission V, Lausanne 1968.



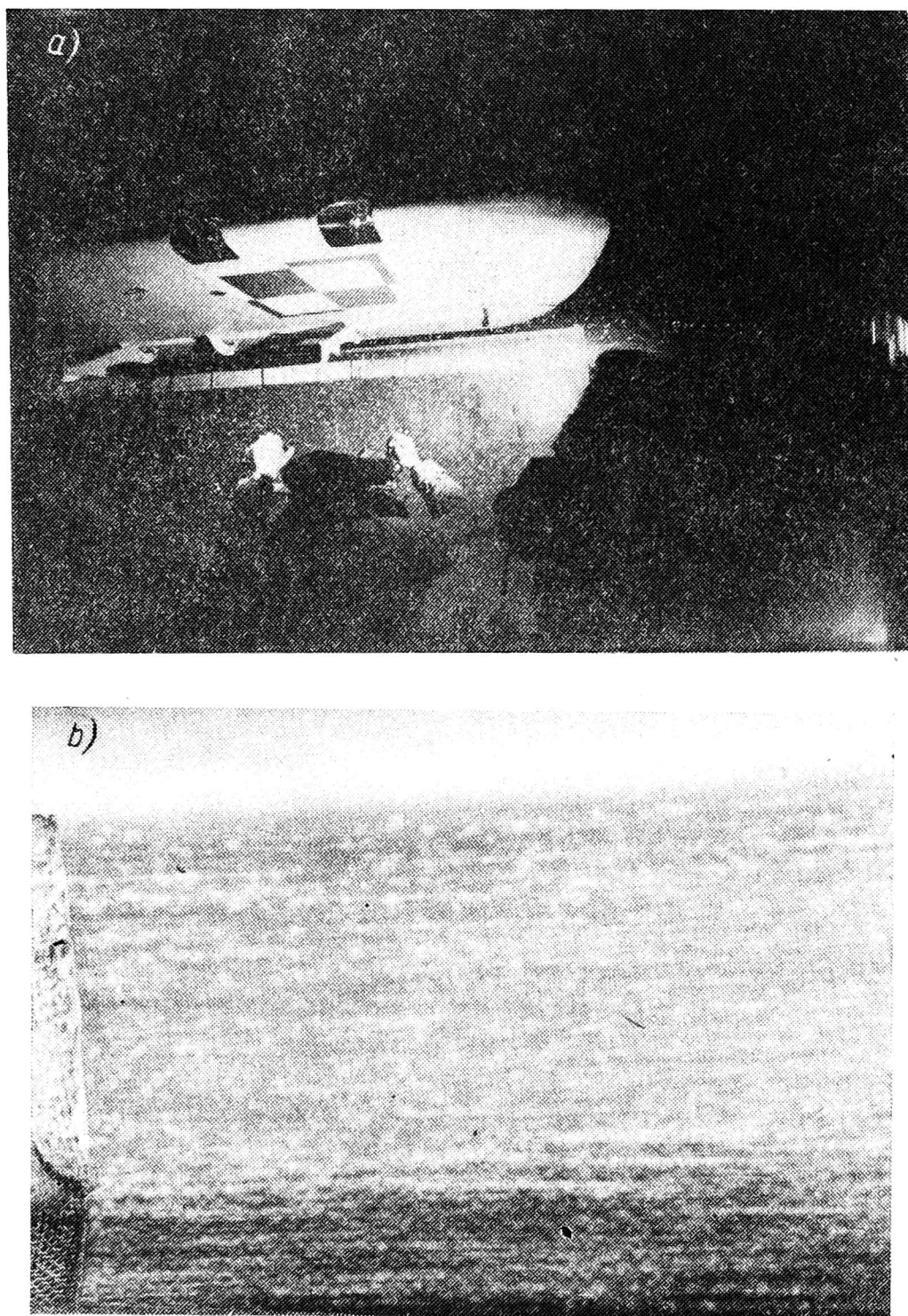
Rys. 22. Pomiar konstrukcji nośnej kopuły Teatru Rozrywki w Warszawie: *a* — jedno ze zdjęć fotogrametrycznych, *b* — wykres odchyłek w płaszczyźnie Y-7, graficzny obraz deformacji jednej z dwunastu rur nośnych

opony samochodowej w różnych warunkach eksploatacyjnych. Zdjęcia na stanowisku badawczym, symulującym zadane warunki pracy opony, wykonane były specjalnie skonstruowaną kamerą stereometryczną. Naświetlano je przy pomocy stroboskopowego flesza przy otwartej migawce. Opracowanie graficzne jednego ze stanów pokazano na rysunku 23. Równocześnie wykonano opracowanie numeryczne. Jak więc widać, fotogrametria radzi sobie doskonale z pomiarem chwilowych stanów obiektów, znajdujących się w szybkim ruchu, przy czym jest ona na ogół jedyną metodą pozwalającą na uzyskanie dokumentacji pomiarowej w ogóle, a zawsze dokumentacji tak szczegółowej, jaką pokazano na rysunku 23.



Rys. 23. Pomiar opony samochodowej przy szybkości 160 kg/godz: *a* — stereogram opony, *b* — opracowanie autogrametryczne

5. Pomiar prędkości wysypu nawozów sztucznych z agrolotniczego urządzenia wysypowego (rys. 24). Podobny nieco w swej charakterystyce technicznej przykład, to wykonany przy współudziale autora pomiar rozkładu prędkości wysypu granulowanego nawozu mineralnego z agrolotniczego urządzenia wysypowego. Istotne, w porównaniu z poprzednim przykładem, utrudnienie pomiaru wynikało z charakteru obiektu, którym były granule o średnicy od 3 do 4 mm, poruszające się w gęstej i zapyłonej strudze z prędkością do 40 m/s. Zadanie udało się rozwiązać jedynie dzięki wykorzystaniu skonstruowanego w Intytucie Lotnictwa (zleceniodawcy niniejszej pracy) elektronicznego urządzenia sterującego dwoma fleszami. Zdjęcia wykonywano różnymi aktualnie dostępnymi kamerami. Najwartościowsze, ze względu na dużą skalę, dla opracowania metrycznego okazały się zdjęcia z kamery stereometrycznej o bazie 40 cm, zbudowanej z aparatów fotograficznych Start. Użycie fleszów o różnych charakterystykach błysku dało dodatkowe rozróżnienie dwóch pozycji granул, a znany odstęp czasu pozwolił na określenie prędkości. I tu również na szczególne podkreślenie zasługuje wykorzystanie przy obserwacji efektu stereoskopowego, gdyż jedynie dzięki niemu możliwe

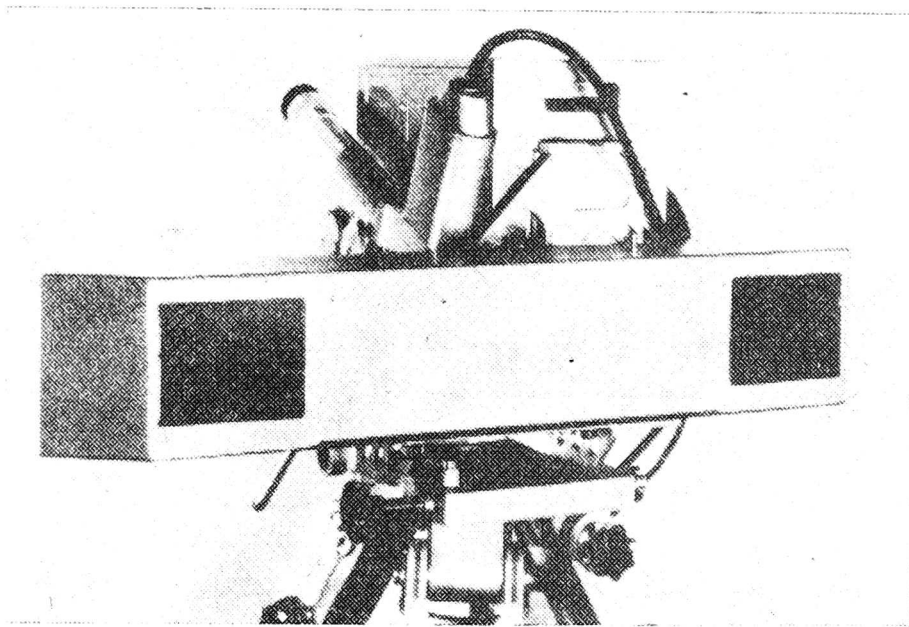


Rys. 24. Pomiar szybkości wysypu granulatu z agrolotniczego urządzenia wysypowego: *a* — jedno ze zdjęć z szerokokątnej kamery stereometrycznej, na pierwszym planie widoczna inna kamera, *b* — powiększony fragment zdjęcia z najwolniejszego wysypu

było wyróżnienie poszczególnych granul w bardziej zagęszczonych partiach strugi i przy większych szybkościach. Konsekwentne wykorzystanie walorów opracowania przestrzennego uniezależniło wyniki pomiaru od indywidualnych skal odwzorowania poszczególnych granul, a ponadto umożliwiło określenie przestrzennego rozkładu prędkości, co okazało się cenną informacją.

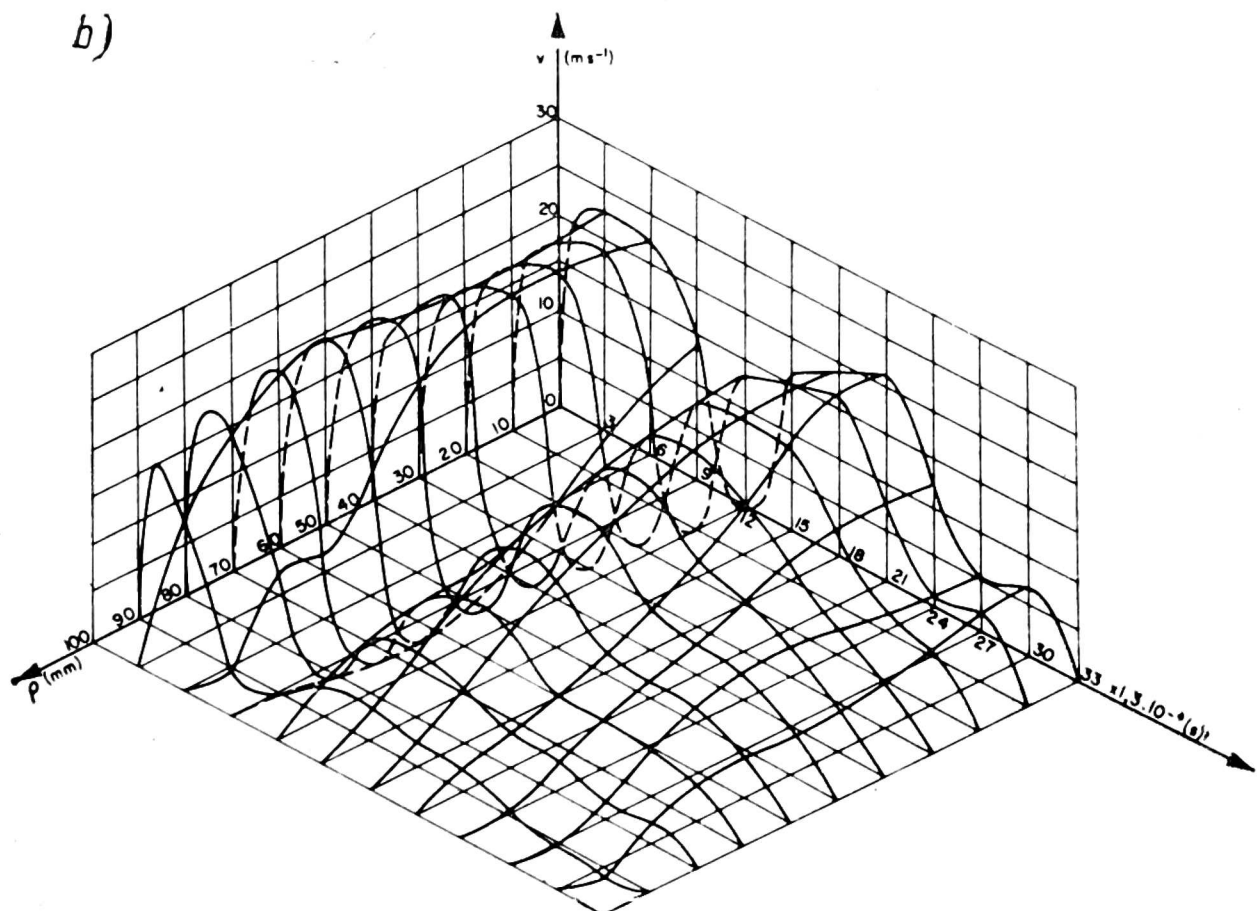
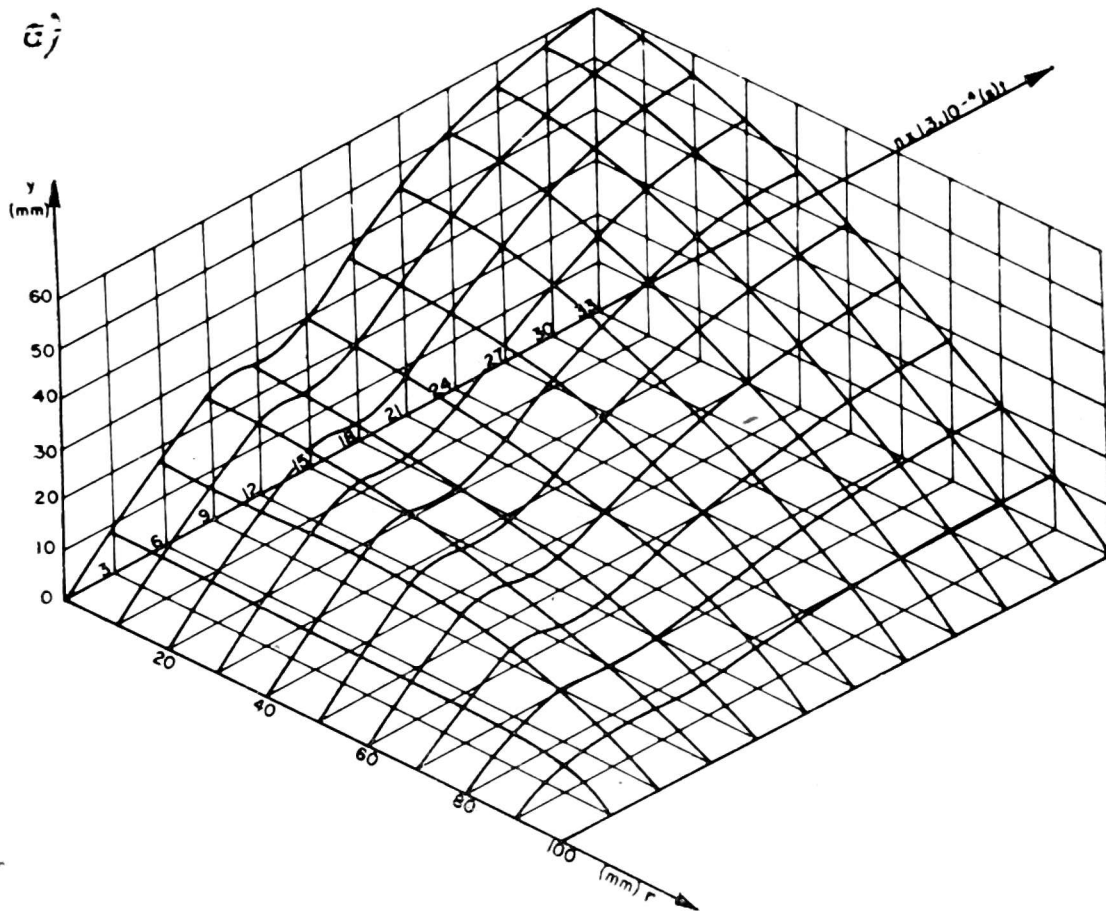
6. Pomiary procesu wybuchowego tłoczenia. Bardzo interesującą pracą, wykonaną przez autora przy współpracy z mechanikiem dr inż. T.

Bednarskim, były pomiary procesu tłoczenia kołowej membrany blaszanej falą uderzeniową, wywołaną detonacją materiału wybuchowego. O skali trudności zadania świadczą uzyskane w wyniku pomiaru fotogrametrycznego parametry przebiegu procesu, jak: czas trwania — od 0,002 do 0,004, prędkość tłoczenia do 25 m/s (do 90 km/godz), czy wreszcie przyspieszenia do 10^6 cm/s² (10^5 g). Zdjęcia procesu wykonano przy użyciu pokazanej na rysunku 25 kamery filmowej Pentazet 35, do zdjęć szybkich, wyposażonej w specjalnie skonstruowaną przystawkę stereoskopową. Proces filmowano z częstotliwością 4000 i 8000 kl./s, co pozwo-



Rys. 25. Szybka kamera filmowa Pentazet 35 z przystawką stereoskopową

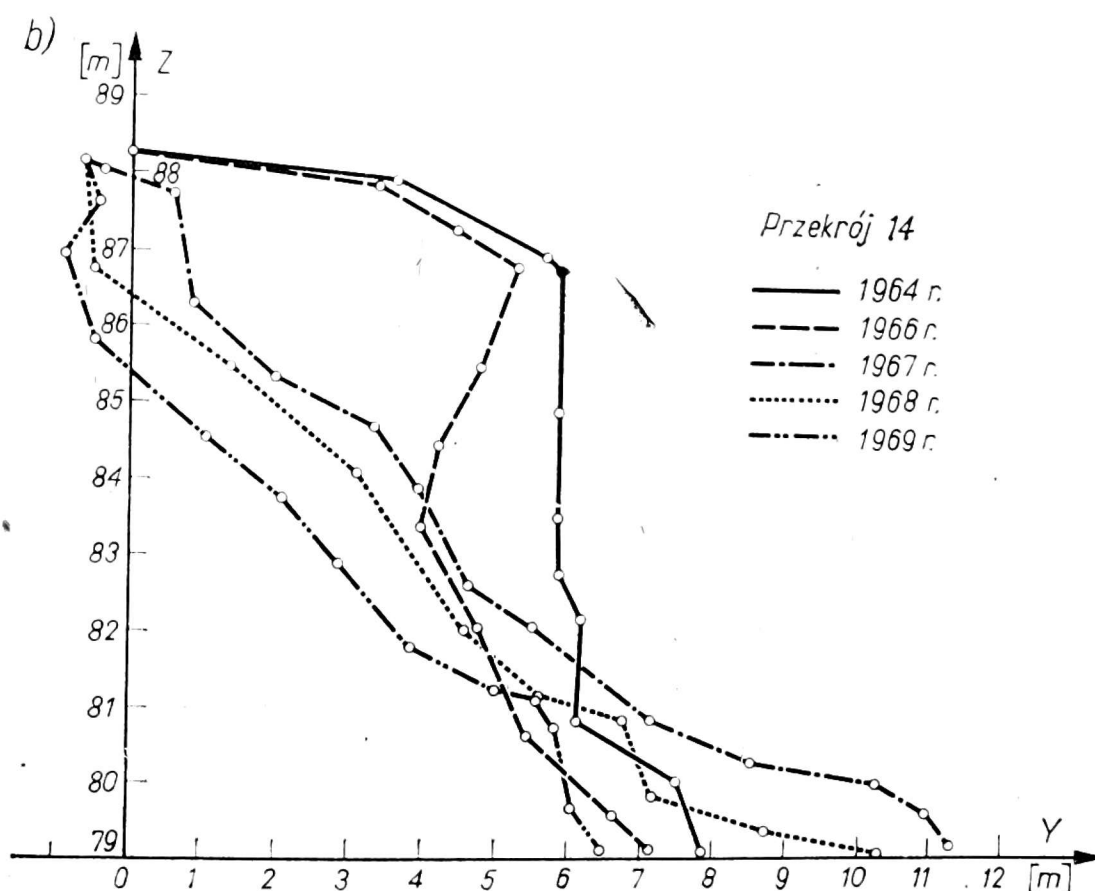
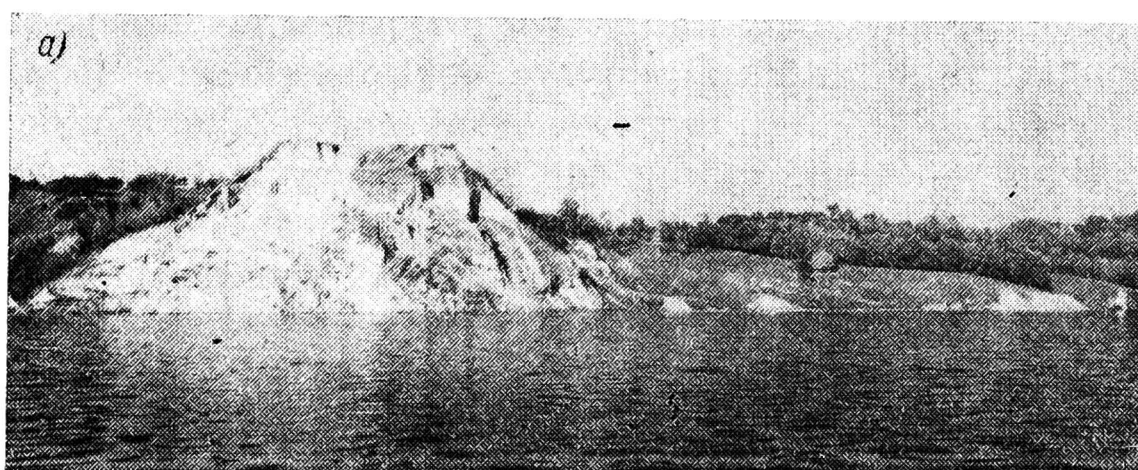
liło na uchwycenie do około 30 równo odległych w czasie stanów tłocznej membrany. Analityczne opracowanie stereogramów wykonano według odpowiednio dobranych wzorów, przy użyciu precyzyjnego stereokomparatora z automatyczną rejestracją i elektronicznej maszyny cyfrowej. Opracowanie to dostarczyło szczegółowej informacji o sposobie przemieszczania się oznaczonych uprzednio punktów membrany (rys. 26), z błędem średnim położenia ok. $\pm 0,5$ mm, o rozkładzie prędkości przemieszczeń (rys. 26b) oraz dalszych pochodnych parametrach procesu, jak rozkład przyspieszeń, intensywność odkształcania itp. Na szczególne podkreślenie zasługuje fakt, że i w tym przypadku fotogrametria okazała się jedyną metodą pomiarową, umożliwiającą uzyskanie pełnej dokumentacji metrycznej badanego procesu. Jakkolwiek metody stykowe nie wchodziły w grę, ze względu na bezwładność czujników, natomiast metody elektroniczno-optyczne mogłyby dać jedynie przebieg profilu membrany, bez możliwości wyróżnienia trajektorii konkretnych jej punktów, przy czym ze względu na gabaryty elementów mierzących (źródła światła, fotoelementy) gęstość informacji byłaby bardzo ograniczona.



Rys. 26. Rezultaty pomiaru procesu wybuchowego tłoczenia kołowej membrany blaszanej: a — rozkład przemieszczeń punktów średniego promienia, b — rozkład prędkości punktów średniego promienia

7. Pomiar skutków abrazji na zbiornikach śródlądowych. Współczesne nietopograficzne zastosowania fotogrametrii nie omijają również zdjęć i pomiarów powierzchni terenu, jednak cel obecnie wykonywanych prac jest zupełnie inny od mapy topograficznej czy ogólnej. Zbliżone tematycznie są jeszcze mapy geologiczne terenów górskich, ale najczęstszym tego typu zadaniem są badania osuwisk, pomiary kontrolne sztucznych lub naturalnych skarp itp.

Na rysunku 27 pokazano przykład takiego, wykonanego przy współpracy autora, opracowania. Jest to fragment wyników pięciokrotnego okresowego pomiaru brzegu zbiornika wodnego. Główną przyczyną erozji



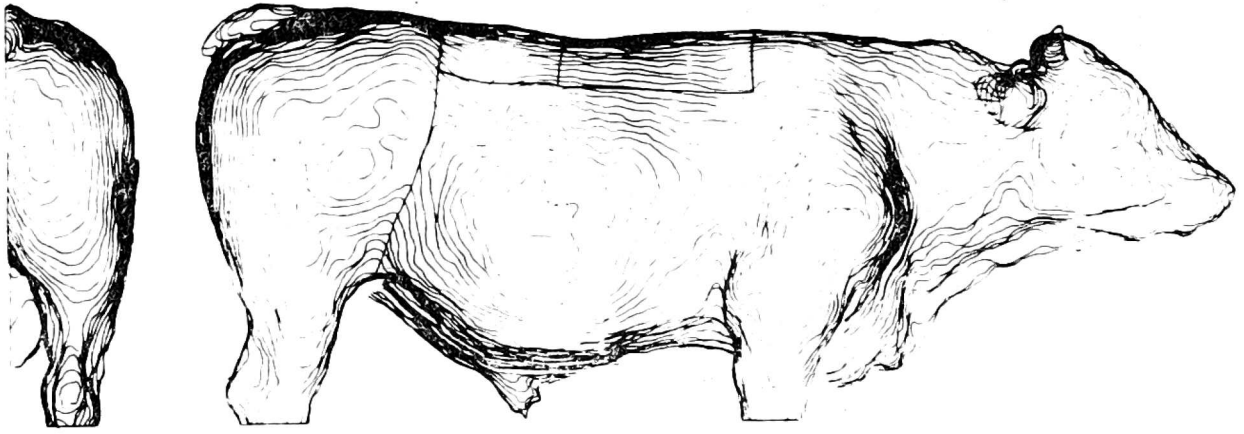
Rys. 27. Fotogrametryczny pomiar skutków abrazji: a — fotogrametryczne zdjęcie czterdziestometrowej skarpy Góry Zamkowej w Dobrzyniu, b — przebieg zmian brzegu Zbiornika Zegrzyńskiego na jednym z przekrojów

jest tu abrazja, czyli skutek falowania, intensywnego ze względu na dużą powierzchnię lustra wody. Czynnikiem potęgującym erozję jest wywołana spiętrzeniem rzeki zmiana stosunków wodnych w rejonie badań. Załączone zdjęcie fragmentu brzegu innego zbiornika oraz kształt przekroju wyjaśniają jedną z istotniejszych w tym przypadku zalet fotogrametrii, tj. pełne bezpieczeństwo ekipy pomiarowej, która nie musi przebywać w rejonie bezpośredniego zagrożenia (pod pionową lub nawet przewieszoną skarpą). Ponadto nie ulega wątpliwości, że jedynie fotogrametryczne metody pomiaru są w stanie zapewnić uzyskanie wiarygodnej dokumentacji niedostępnych ze względu na strukturę geologiczną i kąt nachylenia stoków i skarp. Ciekawostką, a równocześnie istotnym utrudnieniem technicznym, jest w tym przypadku lokalizacja stanowisk fotogrametrycznych, które z przyczyn dokładnościowych (odpowiednia skala) musiały się znaleźć na powierzchni wody. Zdjęcia wykonywano bądź jako równocześnie naświetlane stereogramy z dwóch wzajemnie orientowanych fototeodolitów, ustawionych na jednej barce, bądź jako zdjęcia szeregowe kamerą lotniczą z motorówki, płynącej prostoliniowym ruchem jednostajnym.

8. Przyżyciowa wycena wartości mięsnej bydła. W ramach współpracy z Instytutem Genetyki i Hodowli Zwierząt PAN autor od 1969 roku wykonywał, a ostatnio nadzoruje i konsultuje prace badawcze z zakresu zastosowania fotogrametrii do pomiarów zoometrycznych. Celem bezpośrednim badań jest opracowanie metody selekcji najbardziej wartościowych z użytkowego i hodowlanego punktu widzenia sztuk, a celem ostatecznym poprawa populacji bydła w kraju. W wyniku dotychczasowych prac uzyskano statystycznie istotne korelacje między wyznaczoną fotogrametrycznie objętością najbardziej wartościowych wyrębów (rostbef, antrykot) a ich poubojowo ocenianą wartością. Jako ciekawostkę można tu wymienić posługiwanie się kamerami stereometrycznymi z aparatów amatorskich Start (z braku odpowiednich kamer pomiarowych), a jako istotną zaletę fotogrametrii — unieruchomienie (dzięki rejestracji fotograficznej) żywego zwierzęcia w naturalnej anatomicznie pozycji na cały okres pomiaru (rys. 28).

9. Topografia mory. Niezależnie od klasycznych metod fotogrametrii metrycznej, w badaniach i pomiarowej dokumentacji brył ograniczonych powierzchniami ciągłymi duże usługi oddać może technika mory, tj. fotograficzna rejestracja linii warstwicznych, rysowanych bezpośrednio na obiekcie lub na jego zdjęciu światłem. Przykłady jej stosowania i wykorzystania przedstawiono na rysunkach 29 i 30³. Istotą a zarazem główną zaletą tej metody jest uzyskanie rysunku warstwicznego bezpośrednio

³ H. Takasaki: Moiré Topography. Applied Optics, 6/1970.



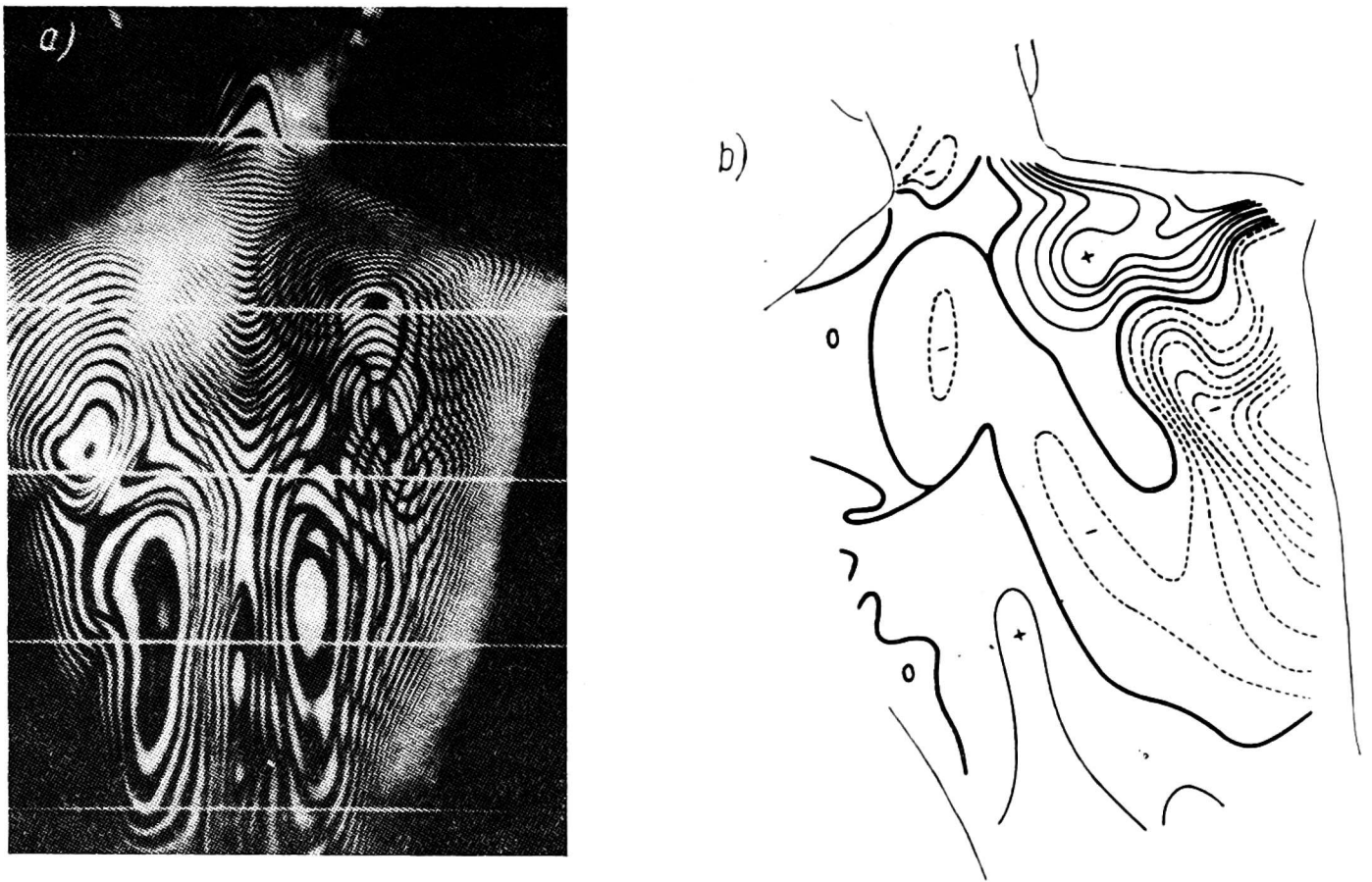
Rys. 28. Autogrametryczne opracowanie buhaja; skok warstwowy 1 cm



Rys. 29. Moneta sfotografowana techniką mory

na drodze fotograficznej, w wyniku zastosowania punktowego (lub nie-skończenie odległego) źródła światła oraz rastra liniowego. Niewątpliwą jej wadą jest natomiast trudniejszy do wykorzystania rzut środkowy (bo uzyskany na drodze fotograficznej) obiektu oraz zmienny skok warstw. Obecnie prowadzone są przy współpracy autora badania nad możliwością wykorzystania tej metody we wspomnianych pracach zoometrycznych, w medycynie i kryminalistyce.

Przedstawiony krótki przegląd różnorodnych opracowań fotogrametrycznych uzasadnia — zdaniem autora — wystarczająco wysuniętą wcześniej tezę o możliwości pomiaru metodami fotogrametrycznymi wszelkich dających się sfotografować obiektów, zjawisk i procesów. W poszczególnych przykładach starano się podkreślić najistotniejsze w danym przypadku walory fotogrametrii, wyróżniające ją spośród innych metod pomiarowych.



Rys. 30. Medyczne zastosowanie techniki mory: *a* — zdjęcie pleców człowieka, *b* — anatomiczna analiza zdjęcia

LITERATURA

1. Bednarski T., Majde A.: The stereophotogrammetric measurement of displacements with a film camera, in process of explosive forming. *Bulletin Société Française de Photogrammétrie*, 1971, nr 42.
2. Bychawski W., Ciołkosz A.: Przegląd metod fotointerpretacji z punktu widzenia pozyskiwania informacji. *Maszynopis*.
3. Jankowski W., Majde A.: Próba zastosowania fotogrametrii do przyżyciowej wyceny wartości rzeźnej bydła. *Prz. geod.* t. 42, 1971, nr 6.
4. Majde A.: Fotogrametryczne pomiary procesów szybkozmiennych. *Prz. geod.*, t. 42, 1970, nr 5.
5. Majde A.: Technika mory — bliska krewna fotogrametrii. *Prz. geod.*, t. 44, 1972, nr 12.
6. Majde A., Niepokólczycki M.: Pomiary fotogrametryczne dla potrzeb gospodarki wodnej. *Prz. geod.*, t. 46, 1974, nr 1.
7. Maruyasu T., Oschima T.: Short Range Photogrammetry of Objects in Motion — *Internationales Archives of Photogrammetry*, Vol. XVII Part. 4, Lausanne 1969.
8. Niepokólczycki M.: Fotogrametria w architekturze. *Biul. inf. Prac. Konser. Zabyt.*, 1968, nr 9.
9. Piasecki M. B.: Fotogrametria lotnicza i naziemna. Państwowe Przedsiębiorstwo Wydawnictw Kartograficznych, Warszawa 1973.

A. Майде

ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОГРАММЕТРИИ В ИССЛЕДОВАНИЯХ В ОБЛАСТИ СЕЛЬСКОГО И ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА

Резюме

Фотограмметрия охватывает методику и практические работы в области метрических разработок зарегистрированных с помощью фотографических техник картин любых объектов, так называемая метрическая фотограмметрия. Должна она применяться в области научно-исследовательских работ а также в практическом решении ряда вопросов.

Первая часть статьи посвящена проблемам стереоскопического эффекта. В ней говорится о основных принципах геометрического и физиологического пространственного смотрения на картину, способы регистрации, воспроизводства и наблюдений за пространственными объектами. Указаны также положительные результаты применения фотограмметрии.

Благодаря практическим рекомендациям работу можно зачислить к пособиям.

В следующей части определено принципы геометрические метрической фотограмметрии, опись основных методов, а также типичной аппаратуры. Учитывая что фотограмметрия является отдельной отраслью науки в этой части изложено только основные принципы без технических описей.

В последней части, существенной для представителей разных отраслей науки, указано ряд примеров касающихся фотограмметрических разработок начиная с измерений статических объектов до измерений быстро происходящих процессов (время $—10^{-4}$, скорость $— 40$ м/сек) зарегистрированных при помощи фотовспышки или камер для быстрой фотосъемки. Примеры показывают возможности широкого применения фотограмметрии подтверждая вывод, сделанный в начале статьи, что с помощью указанного метода можно измерить любой объект или явление, которое можно сфотографировать либо зарегистрировать другим методом, например кинофильмом.

A. Majde

OUTLINE OF APPLICATION POSSIBILITIES OF PHOTOGRAMMETRIC MEASURING METHODS IN AGRICULTURAL AND FORESTRY RESEARCH

Summary

Photogrammetry or so-called metrical photography, deals with the methodical and practical aspects of metrical elaboration of the phenomena recorded by means of photography techniques, and recently also by means of other techniques, homologous geometrically. It may, or even should, be an important instrument in the basical and applied research as well as in the different branches of partical activity.

The problems of stereoscopic effect were discussed in the first part of this

paper. Some geometrical and physiological backgrounds of pictures vision and the methods of recording, reproduction and indirect observation of the three-dimensional subjects were given. Also the most actual advantages subsequent to the stereoscopic effect at observation and analysis of different photograph materials were revealed. Owing to the number of practical instructions this part may be considered as a compendium, facilitating the making use of stereoscopic effect by oneself.

In the next part there were given the geometric principles of metrical photography; the essential methods of photogrammetric elaborations and the equipment for film taking and processing were briefly described as well. As the photogrammetry consists in the separate, wide scientific branch with its own direction of study, this was only a conceptional description and on the technical one.

The next part, important for the scientists of different fields, includes some examples of various photogrammetric applications, beginning from measuring stationary subjects by use of traditional photogrammetric equipment, up to measuring momentary states or even very fast processes (for instance, at duration time of 10^{-4} second or velocity of 40 m/s, etc.) recorded by means of pulse-type flash lamps or high-speed film cameras.

Those examples presenting the wide range of possibilities of metrical photography confirm a thesis that every subject or phenomenon may be measured by use of photogrammetric methods, if they could be recorded by photography or any similar technique, like the film.