

## **Projekt lotu fotogrametrycznego – konspekt dla studentów**

Podstawą do wykonania zdjęć lotniczych jest projekt lotu, zawierający szczegółowe dane dotyczące lotu fotogrametrycznego. Zawiera on obliczone parametry lotu (część obliczeniowa) oraz mapę topograficzną, na której zaznaczony jest przebieg osi lotu (część graficzna).

Dla wykonania projektu niezbędne są następujące dane wejściowe:

- **skala mapy** dla sporządzenia której mają być wykonane zdjęcia lotnicze [ $1:m_m$ ],
- **wniesiony na mapę topograficzną obrys terenu** podlegającego opracowaniu wraz z układem sekcijnym mających powstać arkuszy map,
- **rodzaj opracowania fotogrametrycznego** (metoda jednoobrazowa lub opracowanie stereoskopowe zdjęć),
- **typ kamery**, którą będą wykonywane zdjęcia,
- **prędkość robocza samolotu** przenoszącego kamerę [ $V$ ], oraz
- **wysokość bezwzględna** lotniska, z którego będzie startował samolot [ $H_l$ ].

W następnej kolejności, w wyniku analizy danych wejściowych, określa się:

- **rodzaj stożka kamery lotniczej** [ $c_k$ ].

Kąt rozwarcia obiektywu kamery lotniczej (rodzaj stożka) jest dobierany w zależności od występujących deniwelacji terenu lub zróżnicowania wysokościowego fotografowanych obiektów. Ogólna zasada jest taka, że im większe różnice wysokości w terenie (tereny górzyste) lub zróżnicowanie wysokościowe obiektów (tereny miejskie o wysokiej zabudowie), tym mniejszy musi być kąt rozwarcia kamery (dłuższa stała kamery  $c_k$ ). Takie postępowanie zmniejsza występujące na zdjęciach przesunięcia radialne spowodowane deniwelacjami, jak również ułatwia stereopercepcję w przypadku opracowania zdjęć terenów miejskich (zmniejszone martwe pola na zdjęciach). Niestety konsekwencją zmniejszenia kąta widzenia obiektywu jest wzrost błędu wyznaczenia wysokości (współrzędnej  $Z$ ). Zatem można sformułować ogólną zasadę, doboru stożków która mówi, że tam gdzie zależy nam na dużej dokładności pomiarów wysokościowych i teren jest w miarę płaski możemy stosować stożki o największym kącie rozwarcia (stożki nadszerokokątne,  $f=88\text{mm}$ ), a w przypadku wykonania zdjęć miast o wysokiej zabudowie oraz terenów wysokogórskich stosujemy stożki o najmniejszym kącie rozwarcia (stożki normalnokątne,  $f=300\text{mm}$ ). W przypadkach pośrednich używane są stożki szerokokątne ( $f=152\text{mm}$ ) i półnormalnokątne ( $f=210\text{mm}$ )

- **pokrycie podłużne [p] i poprzeczne [q] zdjęć.**

Pokryciem zdjęć nazywamy część wspólną kolejnych zdjęć w szeregu (pokrycie podłużne) oraz część wspólną zdjęć leżących w sąsiednich szeregach (pokrycie poprzeczne). Nakładki zakresu wykonywanych zdjęć są konieczne, aby nie dopuścić do wystąpienia „dziur” w pokryciu terenu zdjęciami. Dla opracowań fotogrametrycznych jednoobrazowych (mapa wykonywana jest z pojedynczych zdjęć) minimalne pokrycie podłużne zdjęć wynosi 20%. W przypadku wykonywania zdjęć dla opracowań dwuobrazowych (stereoskopowych) minimalne pokrycie podłużne wynosi 60%. Wynika to z faktu, że pokrycie terenu musi być zapewnione (z zakładkami) przez części wspólne dwóch kolejnych zdjęć w szeregu (tzw. stereogramów). Pokrycie zdjęć pomiędzy szeregami, dla obydwu metod opracowania, wynosi min.30%. Ta stosunkowo duża wielkość pokrycia poprzecznego związana jest z trudnością realizacji teoretycznej osi lotu w trakcie wykonywania zdjęć oraz ze względu na występujący boczny wiatr (znos i wygięcie osi szeregu). W nowoczesnych kamerach fotogrametrycznych

posiadających możliwość wspomaganie nawigacji systemem GPS pokrycie poprzeczne może być mniejsze od 30 %.

- **skalę wykonywanych zdjęć [1:m<sub>z</sub>].**

Problem wyboru skali zdjęć w odniesieniu do skali opracowywanej mapy można widzieć w dwóch przeciwstawnych aspektach. Z punktu widzenia ekonomiki, im mniejsza skala zdjęć w stosunku do skali opracowania, tym mniej zdjęć trzeba wykonać dla opracowania mapy danego obszaru. Z drugiego punktu widzenia, im większa skala zdjęć, tym większa dokładność opracowania oraz lepsza rozróżnialność na zdjęciach szczegółów stanowiących treść mapy. W związku z tym wybór skali zdjęć lotniczych jest kompromisem pomiędzy tymi dwoma aspektami. Rozwój kamer lotniczych (kompensacja rozmazu i żyroskopowa stabilizacja zawieszenia) oraz postęp w dziedzinie jakości materiałów fotograficznych (rozdzielczość) powodują, że jakość zdjęć lotniczych jest coraz lepsza, a tym samym możliwe jest wykonywanie zdjęć w coraz mniejszych skalach w stosunku do skali mapy. W przypadku zdjęć celowanych, dla których nadrzędnym warunkiem jest wykonanie zdjęć tak aby każdy pojedynczy stereogram obejmował jeden arkusz mapy, również parametr skali zdjęć jest dostosowywany w projekcie lotu do realizacji tego warunku.

W zależności od skali mapy skalę zdjęcia można wyznaczyć na podstawie empirycznego wzoru Grubera:  $m_z = C \cdot \sqrt{m_m}$ ; gdzie: C - współczynnik empiryczny (w zależności od skali mapy przyjmuje wartości od 100 - 500)  
m<sub>z</sub> - mianownik skali zdjęcia,  
m<sub>m</sub> - mianownik skali mapy

Ogólnie można powiedzieć, że skalę zdjęć przyjmuje się mniejszą od skali mapy w przedziale 1 - 11 razy.

- **kierunek lotu.**

Najczęściej projektuje się loty fotogrametryczne w kierunkach równoleżnikowych (W-E) i południkowych (N-S). Związane jest to głównie z układem państwowym współrzędnych geodezyjnych w którym trzeba wykonać mapę i kształtem ramki sekcyjnej tej mapy. Jeżeli mapa ma być wykonana w układzie lokalnym, nierównoległym do państwowego układu geodezyjnego, to również kierunek lotu musi być równoległy do jednej z osi tego układu. Wybór, do której z osi układu ma być równoległy kierunek lotu zależy od tego, w jakim kierunku wykonane zdjęcia zapewnią opracowanie fotogrametryczne arkusza mapy z jak najmniejszej ilości zdjęć.

Z danych wejściowych oraz parametrów zdjęć określonych na podstawie analizy tych danych można obliczyć pozostałe parametry lotu fotogrametrycznego, w tym dane niezbędne do wniesienia planu na drobnoskalową mapę topograficzną.

W wyniku obliczeń określa się:

- **wysokość lotu ponad poziom lotniska [H<sub>1</sub>].**

Realizacja w samolocie takiej wysokości lotu zapewni właściwą, przyjętą skalę zdjęć lotniczych.

-obliczenie wysokości lotu ponad poziom lotniska (H<sub>1</sub>) przeprowadza się w trzech etapach:

1) wysokość lotu nad terenem (W):

$$W = c_k \cdot m_z \quad \text{gdzie } c_k - \text{stała kamery} \\ m_z - \text{mianownik skali zdjęcia}$$

2) bezwzględna wysokość lotu n.p.m.( H<sub>b</sub>):

$$H_b = H + H_t \quad \text{gdzie: } H_t - \text{średnia wysokość terenu fotografowanego} \\ \text{(odczytana z mapy)}$$

3) wysokość lotu nad lotniskiem ( $H_l$ ):

$$H_l = H_b - H_o \quad \text{gdzie: } H_o - \text{wysokość lotniska}$$

- **odstęp między osiami szeregów [A].**

Jest to terenowa odległość pomiędzy osiami szeregów, z uwzględnieniem przyjętego pokrycia poprzecznego. Umożliwia wykreślenie na mapę osi szeregów.

$$A = l(1-q) m_z \quad \text{gdzie: } l - \text{format zdjęć (230mm)} \\ q - \text{pokrycie poprzeczne zdjęć} \\ p - \text{pokrycie podłużne zdjęć} \\ m_z - \text{mianownik skali zdjęć}$$

- **długość bazy [B].**

Jest to odległość terenowa pomiędzy kolejnymi zdjęciami, z uwzględnieniem przyjętego pokrycia podłużnego zdjęć. Umożliwia obliczenie ilości zdjęć w szeregu, zaznaczenia na mapie miejsca włączenia i wyłączenia kamery oraz obliczenia interwału pomiędzy ekspozycjami

$$B = l(1-p) m_z \quad \text{gdzie: } l - \text{format zdjęć (230mm)} \\ p - \text{pokrycie podłużne zdjęć} \\ m_z - \text{mianownik skali zdjęć}$$

- **ilość szeregów zdjęć [ $n_s$ ],**

Wyliczona wstępnie wartość stanowi podstawę do optymalizacji ilości szeregów poprzez korektę pokrycia poprzecznego ew. skali zdjęć.

$$n_s = A_c/A \quad \text{gdzie } A_c - \text{szerokość obszaru zdjęć lotniczych (pomierzona} \\ \text{na mapie pomiędzy osią pierwszego i ostatniego szeregu)}$$

- **ilość zdjęć w szeregach [ $n_z$ ] i w całym bloku [ $N_z$ ],**

Wielkość ta umożliwia zaplanowanie niezbędnej ilości materiału fotograficznego

$$n_{zi} = S_i/B + 1 \quad \text{gdzie: } S_i - \text{długość osi danego szeregu (mierzona na mapie pomiędzy} \\ \text{punktami włączenia i wyłączenia kamery)}$$

Liczy się ilość zdjęć w każdym szeregu, a następnie po zsumowaniu podaje się ilość wszystkich zdjęć:

$$N_z = \sum n_{zi}$$

- **długość filmu niezbędnego do wykonania wszystkich zdjęć [ $L_F$ ]**

$$L_F = 1.1 \cdot N_z \cdot 0.26m \quad \text{przyjmuje się, że 0.26 m to jedna klatka filmu 23x23cm z} \\ \text{marginesami, współczynnik 1.1 mówi o 10\% zapasie filmu na} \\ \text{potrzeby zdjęć testowych i tzw. „blanków”(pustych klatek)}$$

- **powierzchnię stereogramu [ $P_m$ ] i powierzchnię użyteczną stereogramu [ $P_s$ ].**

Powierzchnia stereogramu  $P_m$  to obszar terenu wspólny dla dwóch kolejnych zdjęć szeregu.

$$P_m = (L - B) \cdot L \quad [\text{ha}] \quad \text{gdzie: } L = l \cdot m_z \text{ - format zdjęcia w skali terenowej}$$

Powierzchnia użyteczna stereogramu  $P_s$  to część powierzchni stereogramu ograniczona liniami przechodzącymi przez środki pasów pokrycia poprzecznego zdjęć oraz przez środki zakładów sąsiednich stereogramów. Tylko części użyteczne stereogramów powinny być wykorzystane do opracowania mapy.

$$P_s = A \cdot B \quad [\text{ha}] \quad \text{gdzie: } A \text{ i } B \text{ odpowiednio: odstęp pomiędzy szeregami i baza podłużna}$$

- **interwał czasu pomiędzy wykonaniem kolejnych zdjęć [ $t$ ].**

Ten parametr mówi, w jakich odstępach czasu powinna być wyzwalana migawka kamery aby zapewnić przy założonej prędkości lotu, przyjęte pokrycie podłużne zdjęć.

$$t = B/V_s \quad [\text{s}] \quad \text{gdzie: } v_s \text{ - prędkość samolotu (m/s)}$$

- **maksymalny dopuszczalny czas ekspozycji [ $\tau$ ].**

Wielkość ta mówi o tym, jaki czas otwarcia migawki jest jeszcze dopuszczalny aby założona, przyjęta nieostrość zdjęcia spowodowana ruchem samolotu nie została przekroczona. Parametr ten nie jest istotny dla kamer z automatyczną kompensacją rozmazu. Dla dopuszczalnej średnicy plamki rozmazania 0.02mm czas ten można wyliczyć ze wzoru:

$$\tau = 0.02\text{mm} \cdot m_z / V_s \quad [\text{s}]$$

- **Dokładność a’priori opracowania dwuobrazowego projektowanych zdjęć [ $M_{x,y}$ ,  $M_z$ ]**

Dokładność sytuacyjna  $M_{x,y}$  opracowania stereofotogrametrycznego jest zależna głównie od dokładności pomiaru na zdjęciu  $m_{x,y}$  oraz skali zdjęć.

$$M_{x,y} = \pm m_{x,y} \cdot m_z \quad \text{gdzie: } m_z \text{ - mianownik skali zdjęć}$$

$$m_{x,y} \text{ - dokładność pomiaru na zdjęciach}$$

$$\text{(przyjmujemy } m_{x,y} = \pm 0.02\text{mm)}$$

Dokładność wysokościowa  $M_z$  opracowania stereofotogrametrycznego zależy od kątów przecięć promieni jednoimiennych. Im krótsza ogniskowa stożka kamery tym korzystniejszy kąt przecięcia promieni i tym większa dokładność określenia współrzędnej Z. Współczynnik  $k = W/B = c_k/b$  zwany stosunkiem bazowym charakteryzuje bardzo dobrze kąty wcinające. Im większa wartość tego współczynnika tym mniejsza dokładność wysokościowa.

Przy założeniu, że dokładność sytuacyjnego pomiaru na zdjęciach  $m_{x,y}$  równa się dokładności określenia paralaksy poprzecznej  $m_p$ , dokładność wysokościową pomiaru na modelu stereoskopowym wyraża wzór:

$$M_z = \pm W/B \cdot m_{x,y} \cdot m_z = k \cdot M_{x,y} \quad \text{gdzie: } m_{x,y} \text{ - dokładność pomiaru na zdjęciach}$$

$m_z$  – mianownik skali zdjęć  
 $W$  – wysokość lotu  
 $B$  – baza podłużna zdjęć  
 $K = W/B = C_k/b$  stosunek bazowy

Obliczona wielkość odstepu między osiami szeregów oraz przyjęty kierunek lotu pozwalają wnieść na mapę topograficzną projektowany przebieg osi lotu. Na mapie tej powinien znajdować się wcześniej obrys terenu podlegającego opracowaniu wraz z naniesionym układem sekcyjnym map. Na wniesionych osiach szeregów należy zaznaczyć charakterystyczne punkty sytuacyjne mapy np. skrzyżowania dróg, pojedyncze budowle itp., które stanowią będą punkty orientacyjne dla nawigatora w trakcie wykonywania zdjęć. W odległości co najmniej jednej bazy przed i poza granicą obszaru opracowania należy zaznaczyć na mapie, na osi szeregu, miejsce włączenia i wyłączenia kamery. Również, poza granicami

Skala map zasadniczych 1: $M_m$	skala zdjęć lotniczych 1: $M_z$
1 : 500	1 : 3 500 ÷ 1 : 5 500
1 : 1 000	1 : 5 500 ÷ 1 : 8 000
1 : 2 000	1 : 8 000 ÷ 1 : 12 000
1 : 5 000	1 : 13 000 ÷ 1 : 20 000
Skala map topograficznych 1: $M_m$	
1 : 10 000	1 : 19 000 ÷ 1 : 28 000
1 : 25 000	1 : 30 000 ÷ 1 : 45 000
1 : 50 000	1 : 45 000 ÷ 1 : 65 000

obszaru opracowania, należy zaprojektować linie nawrotu samolotu dla należenia kolejnego szeregu. W przypadku lotu, który nie jest równoleżnikowy lub południkowy należy wpisać wzdłuż osi szeregu azymut kierunku lotu. Projekt lotu należy opracować na najbardziej aktualnych mapach topograficznych w odpowiednich skalach. Dobór skali zdjęć w zależności od skali mapy, która ma być na ich podstawie opracowana podany jest w powyższej tabeli.

Końcowym etapem jest przedstawienie projektu lotu na mapie. Projekt lotu powinien być przedstawiony na mapie topograficznej wg. poniższych zasad:

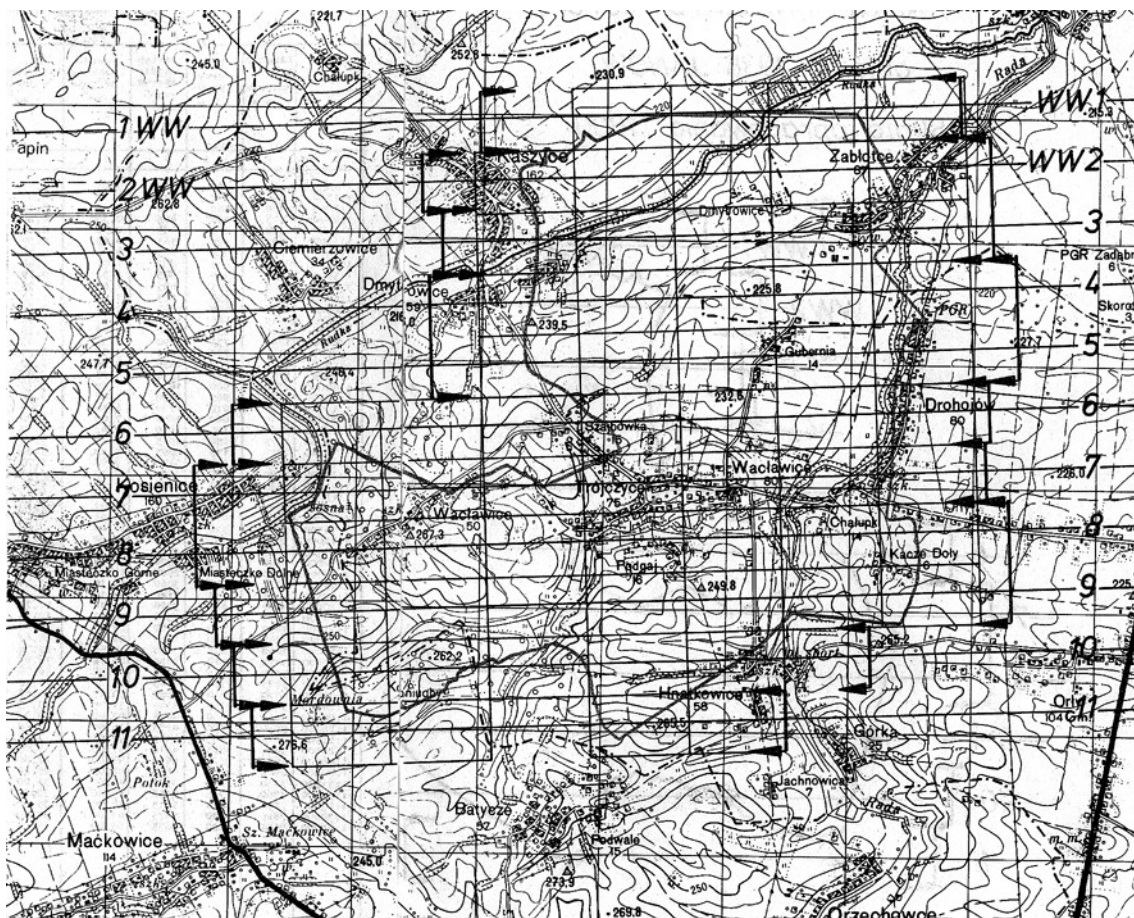
- granicę obiektu terenu zaznacza się linią zieloną ciągłą grubości 1 mm,
- granicę sekcji zaznacza się linią ciągłą grubości 0.2 mm tuszem koloru niebieskiego,
- osie szeregów zaznacza się linią ciągłą grubości 0.3 mm tuszem koloru czerwonego,
- znaki włączenia i wyłączenia kamery, tuszem niebieskim, linią ciągłą grubości 1mm prostopadłe do osi szeregu przy wlocie i wylocie szeregu (linia ta powinna być zakończona strzałkami o długości 1 cm zwróconymi w kierunku lotu),
- osi szeregów należy ponumerować z północy na południe (lub ze wschodu na zachód) i opisać tuszem czerwonym cyframi o wysokości 6 mm.

### Sposób wykonanie projektu graficznego przez studentów

Dla zapewnienia optymalnego przebiegu osi szeregów należy na początku wrysować na mapę topograficzną poprawny przebieg osi pierwszego i ostatniego szeregu. Wykonać to trzeba w oparciu o przyjęty z instrukcji warunek mówiący, że zdjęcia powinny obejmować pas terenu poza obszarem opracowania o szerokości min. 25%L ( $L = 1 m_z$ ). Po obliczeniu ile wynosi 25%L w skali mapy topograficznej należy wartość tą odłożyć od najbardziej wysuniętych punktów granic na górze i na dole obszaru (lub z prawej i lewej strony obszaru - w zależności od przyjętego kierunku osi lotu)oczywiście w kierunku na zewnątrz obszaru opracowania. Punkty te będą wyznaczać zasięg górny i dolny obszaru pokrytego zdjęciami. Aby znaleźć teraz punkty na osi szeregów od nich odmierzyć w kierunku do wewnątrz obszaru odcinek równy połowie zdjęcia  $L/2$ . Prowadząc przez otrzymane punkty proste równoległe do linii siatki kilometrowej

mapy uzyskamy poprawny przebieg pierwszego i ostatniego szeregu. Dla wyznaczenia przebiegu osi pozostałych szeregów należy teraz zmierzyć na mapie odległość pomiędzy wyznaczonymi osiami szeregów [s], przeliczyć ją na miarę terenową [S] i podzielić przez obliczoną wcześniej wartość A (odstęp między osiami szeregów). W przypadku ogólnym wynik tego ilorazu X nie będzie wartością całkowitą, a zatem nie dałoby się na podstawie odmierzania tej wartości A uzyskać jednakowe odległości pomiędzy szeregami. Dlatego należy zaokrąglić wartość X do liczby całkowitej  $X_c$  i wyliczyć nową wartość  $A_n$  jako iloraz  $S/X_c$ . Wielkość  $A_n$  pozwoli na wykreślenie pozostałych osi szeregów w równych odległościach. Zmiana wielkości z A na  $A_n$  spowoduje zmianę pokrycia poprzecznego zdjęć. Ponieważ wartość A wyliczona została przy założeniu minimalnego pokrycia poprzecznego 30% dlatego należy zawsze zaokrąglić X w górę ponieważ tylko wtedy wartość pokrycia poprzecznego się zwiększy (co jest dopuszczalne). Wyliczona nowa, większa od 30% wartość pokrycia poprzecznego zdjęć jest teraz ostateczną wartością projektową.

Po wrysowaniu osi szeregów należy teraz odmierzyć od granic wzdłuż osi szeregów, na zewnątrz odległości równe bazie podłużnej B (w skali mapy) i zaznaczyć poprzecznymi odcinkami miejsca włączenia i wyłączenia kamery. Jeśli nie sugerujemy pilotowi kierunku lotu to strzałki skierowane muszą być do siebie (tak proszę wykonać swój projekt), w innym przypadku strzałki pokazują sugerowany kierunek lotu.



Plan lotu fotogrametrycznego