

# Projekt lotu fotogrametrycznego

## WSTĘP

W trakcie wykonywania nalotu fotogrametrycznego samolot leci wzdłuż linii prostej wykonując, co pewną odległość zdjęcia (powstaje w ten sposób szereg zdjęć). Ponieważ na podstawie pojedynczego zdjęcia nie jest możliwe określenie przestrzennego położenia odfotografowanych na nim punktów, każdy fragment obszaru musi być sfotografowany co najmniej na dwóch zdjęciach. Przyjmuje się przeważnie, że pokrycie wzajemne dwu sąsiednich zdjęć w szeregu (pokrycie podłużne) powinno wynosić minimum 60%, (dla pewności gdyż samolot nie leci nigdy w pełni stabilnie w związku z czym potrzebny jest zapas pokrycia).

Jeśli jeden szereg nie obejmuje całego opracowywanego obszaru wykonuje się kilka równoległych do siebie szeregów. Wzajemne pokrycie sąsiednich szeregów (pokrycie poprzeczne) powinno wynosić minimum 25 - 30%. Ta stosunkowo duża wielkość pokrycia poprzecznego związana jest z trudną realizacją w trakcie lotu zaplanowanej osi lotu, 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. Jeżeli wynikiem opracowania zdjęć ma być ortofotomapa, czasem stosuje się większe pokrycie podłużne i poprzeczne niż podane powyżej. Wynika to z faktu, że w skrajnej części zdjęć mogą występować większe przesunięcia radialne w związku z czym do przetwarzania wykorzystuje się wtedy środkowe części zdjęć.

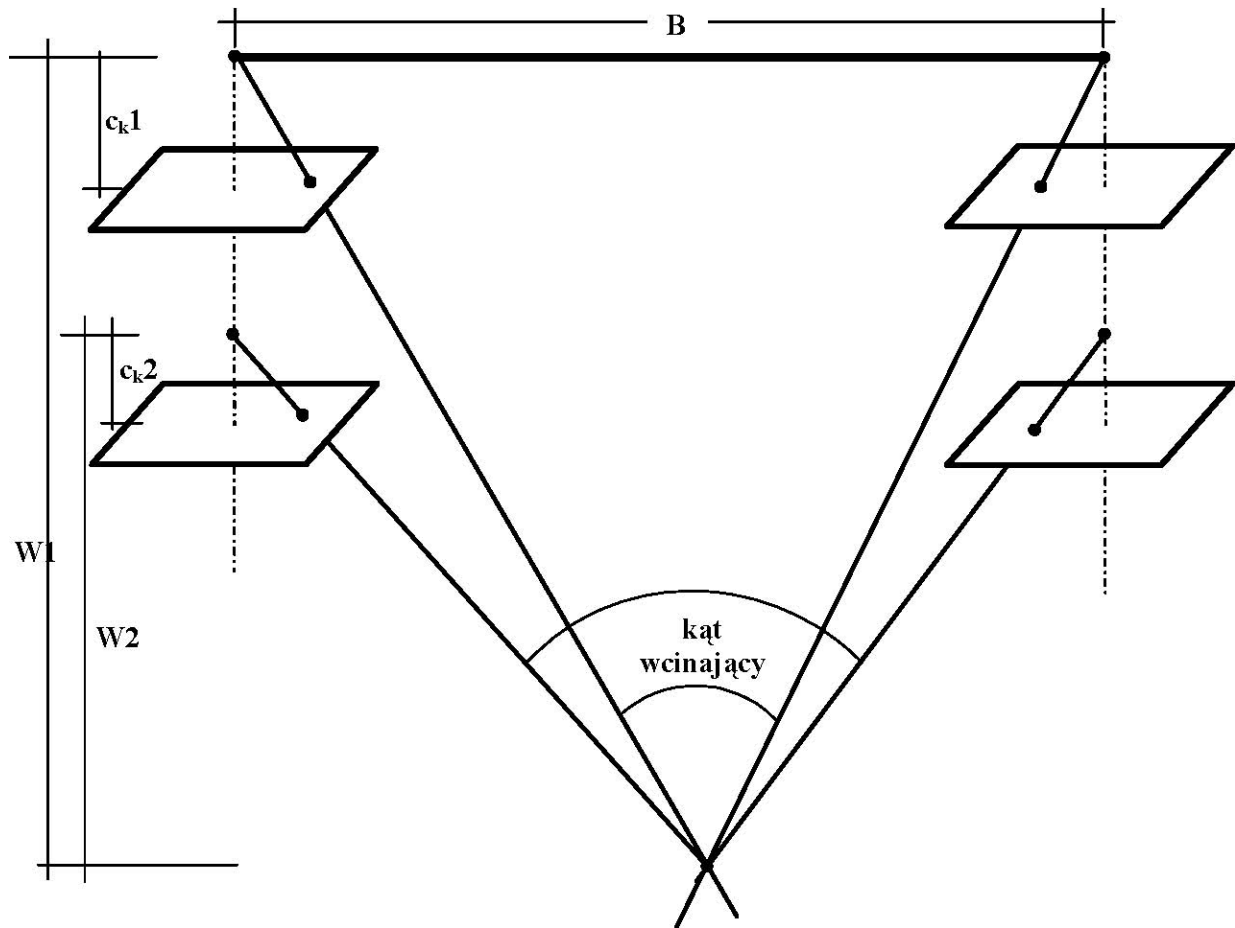
Podstawą do wykonania zdjęć lotniczych jest projekt lotu, zawierający szczegółowe dane dotyczące lotu fotogrametrycznego. Zawiera on obliczone parametry lotu oraz mapę topograficzną, na której zaznaczony jest przebieg osi lotu.

Obowiązujące zasady wykonywania projektu lotu z wykorzystaniem analogowych kamer fotogrametrycznych zawarte są w Wytycznych technicznych K-2.7 „Zasady wykonywania prac fotolotniczych”(z 1999 r).

## DLA WYKONANIA PROJEKTU NIEZBĘDNE SĄ NASTĘPUJĄCE DANE WEJŚCIOWE:

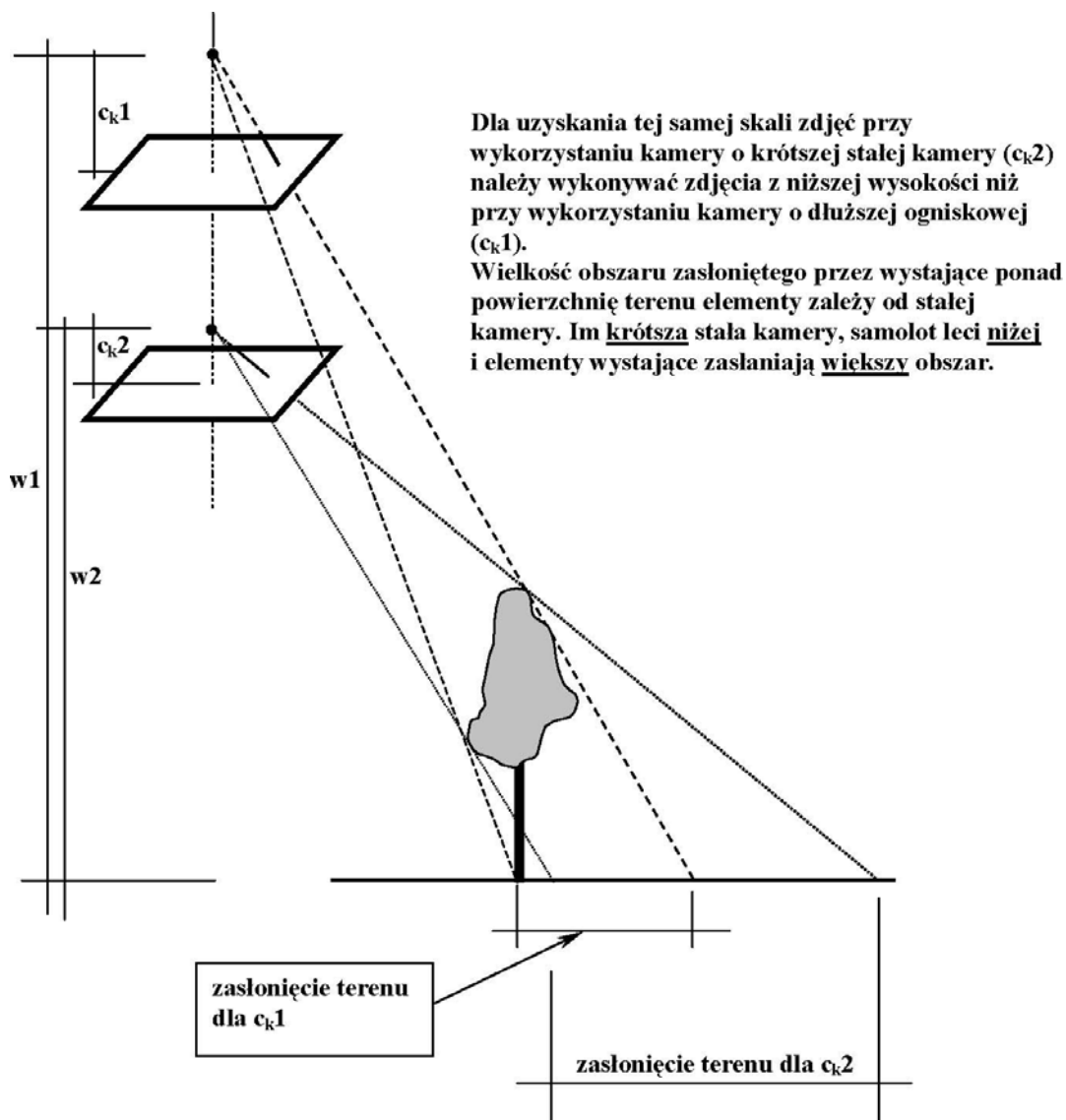
- **Skala mapy**, dla sporządzenia której mają być wykonane zdjęcia lotnicze [ $1:M_m$ ] lub dokładność wynikowego opracowania lub terenowy rozmiar piksela dla kamer cyfrowych.
- **Rodzaj opracowania fotogrametrycznego i jego podstawowe przeznaczenie**, np. opracowanie sytuacyjne, sytuacyjno- wysokościowe, fotointerpretacja, ortofotomapa pomiar danych do numerycznego modelu terenu..
- **Wniesiony na mapę topograficzną obrys terenu** podlegającego opracowaniu wraz z układem sekcyjnym mających powstać arkuszy map.
- **Typ kamery**, którą będą wykonywane zdjęcia.
- **Prędkość robocza samolotu** przenoszącego kamerę [ $v$ ].
- **Wysokość bezwzględna lotniska**, z którego będzie startował samolot [ $H_{lotniska}$ ].
- **Rodzaj stożka kamery lotniczej** [**kąt rozwarcia,  $ck$** ]. Kąt rozwarcia obiektywu kamery lotniczej (rodzaj stożka) jest dobierany w zależności od występujących deniwelacji terenu lub zróżnicowania wysokościowego fotografowanych obiektów (dla kamer analogowych - tabela 15.1 w Wytycznych...). 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  $ck$ ). Takie postępowanie zmniejsza występujące na zdjęciach przesunięcia radialne spowodowane deniwelacjami, zmniejsza zasłonięcia terenu przez elementy wystające ponad powierzchnię terenu, jak również ułatwia stereopercepcję w przypadku

opracowania zdjęć terenów miejskich. Niektóre przyczyny uzasadniające takie postępowanie przedstawiono na rysunkach 1 i 2.



Przy stereoskopowym opracowaniu zdjęć położenie punktu wyznaczone jest poprzez wcięcie w przód (zwane fotogrametrycznym). Dla uzyskania tej samej skali zdjęć przy wykorzystaniu kamery o krótszej stałej kamery ( $c_{k2}$ ) należy wykonywać zdjęcia z niższej wysokości niż przy wykorzystaniu kamery o dłuższej ogniskowej ( $c_{k1}$ ). Im niżej leci samolot tym stosunek  $B/W$  jest większy, a to pociąga za sobą większy kąt wcinający, a zatem większą dokładność wyznaczenia położenia wysokości mierzonych punktów

Rys. 1 Wpływ kąta rozwarcia kamery na dokładność wyznaczenia wysokości.



Rys. 2 Wpływ kąta rozwarcia kamery (stałej kamery) na zasłonięcia terenu przez elementy wystające ponad jego powierzchnię.

- **Pokrycie podłużne [p] i poprzeczne [q] zdjęć.** Pokryciem zdjęć nazywamy część wspólną kolejnych zdjęć w szeregu (pokrycie podłużne) lub między szeregami (pokrycie poprzeczne). Nakładki zakresu wykonywanych zdjęć są konieczne dla zapobieżenia wystąpienia luk w pokryciu terenu zdjęciami. W przypadku wykonywania zdjęć dla opracowań dwuobrazowych wynosi standardowo 60%. Przy fotografowaniu terenów pofałdowanych pokrycie podłużne należy zwiększyć o wpływ rzeźby terenu. Oblicza się je ze wzoru:

$$p[\%] = p_0 + 50\% \Delta h/W$$

$p_0$  – zasadnicze pokrycie ( $p_0 = 60\%$ )  $\Delta h$  – przewyższenie względem średniej płaszczyzny odniesienia Pokrycie poprzeczne (określa pokrycie zdjęć między sąsiednimi szeregami i wyrażane jest w %). Projektowane zasadnicze pokrycie poprzeczne zdjęć lotniczych wynosi standardowo:  $q = 30\%$  dla fotografowania z wysokości  $\leq 1500$  m i  $q = 25\%$  dla fotografowania z wysokości  $> 1500$  m Przy fotografowaniu terenów pofałdowanych pokrycie poprzeczne należy zwiększyć o wpływ rzeźby terenu. W przybliżeniu określa je zależność:

$$q[\%] = q_0[\%] + 70\% \Delta h/W$$

W przypadku realizacji lotu fotogrametrycznego z użyciem GPS pokrycie poprzeczne może być mniejsze od 30%. Zgodnie z Wytocznymi Technicznymi należy tak zaprojektować liczbę szeregów, aby pierwszy i ostatni szereg zdjęć pokrywał co najmniej 1/4-tą powierzchni zdjęcia obszar poza granicami opracowania. Natomiast ilość zdjęć w szeregach na wlocie i wylocie powiększyć należy o dwie bazy fotografowania poza niezbędną ilość – wyliczoną na podstawie szerokości obszaru opracowania.

- **Skala 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. Ogólnie można powiedzieć, że skalę zdjęć przyjmuje się mniejszą od skali mapy w przedziale 2÷6 razy (tabela 14.1 w Wytocznym...).

W przypadku wykonywania zdjęć **kamerą cyfrową** zamiast skali zdjęć przeważnie wybiera się **terenowy rozmiar piksela**. Z reguły przyjmuje się, że dla zdjęć terenów miejskich oraz terenów, na których prowadzone są (będą) prace inwestycyjne wymagające wysokiej dokładności podkładów mapowych terenowy rozmiar piksela powinien być równy lub mniejszy od 5 cm (Orto-005) lub od 10 cm (Orto-010). Dla zdjęć terenów niezurbanizowanych terenowy rozmiar piksela może być większy i może wynosić 25 – 50 cm. Po wybraniu terenowego rozmiaru piksela znając rozmiar detektora matrycy kamery można obliczyć skalę zdjęcia ( $1/m_z = \text{rozmiar detektora/terenowy rozmiar piksela}$ ).

- **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 (dąży się do tego, aby opracować arkusz sekcji mapy korzystając z jak najmniejszej liczby zdjęć). Jeżeli mapa ma być wykonana w układzie lokalnym, nierównoległym do państwowego układu geodezyjnego, to również kierunek lotu musi być równoległy do jednej z osi układu lokalnego. 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 liczby zdjęć.

### Część obliczeniowa projektu (dla zdjęć wykonanych kamerą cyfrową):

W etapie wstępnym należy przyjąć:

- typ kamery ( $c_k$ , kąt rozwarcia, rozmiar matrycy, rozmiar detektora)
- pokrycie podłużne i poprzeczne zdjęć ( $p$ ,  $q$ )
- terenowy rozmiar piksela ( $P_T$ )
- Typ samolotu oraz jego prędkość  $v$  czasie wykonywania zdjęć. (W tabeli z wykazem samolotów podano prędkość maksymalną, podróżną i minimalną. Prędkość minimalna jest to prędkość, przy której w zasadzie samolot przestaje się utrzymywać w powietrzu. Dlatego wybrana prędkość samolotu musi być wyraźnie większa od prędkości minimalnej i mniejsza od maksymalnej. Jeżeli to jest możliwe planowana prędkość samolotu powinna być zbliżona do prędkości podróżnej.

W wyniku obliczeń określa się:

- Skalę zdjęć:  $1/m_z = \text{rozmiar detektora/terenowy rozmiar piksela}$
- Terenową wartość zasięgu zdjęcia
  - w kierunku lotu:  $L_{pd} = (\text{liczba pikseli w kierunku lotu}) \cdot P_T$
  - poprzecznie do kierunku lotu:  $L_{pp} = (\text{liczba pikseli poprzecznie do kierunku lotu}) \cdot P_T$

- Długość bazy fotografowania

$$B_x = L_{pd} \cdot (100\% - p)$$

Jest to terenowa odległość pomiędzy środkami rzutów kolejnych zdjęć, wynikająca z przyjętego pokrycia podłużnego. Umożliwia obliczenie liczby zdjęć, wyznaczenie współrzędnych środków rzutów i zaznaczenie na mapie do projektu lotu miejsc włączenia i wyłączenia migawki

- Odstęp między szeregami zdjęć

$$B_y = L_{pp} \cdot (100\% - q)$$

- Liczba szeregów  $N_Y = (D_Y/B_Y) + 1$

$D_Y$  – szerokość obszaru opracowania (w poprzek kierunku osi szeregów)

Po wstępnym obliczeniu liczby szeregów należy dokonać optymalizacji ich rozmieszczenia tzn. należy sprawdzić rozmieszczenie szeregów w stosunku do obszaru opracowania. Osie szeregów powinny być tak zaplanowane, żeby obszary objęte skrajnymi szeregami wystawały poza obszar opracowania o 25% poprzecznego zasięgu zdjęcia ( $L_{pp}$ ). Jeżeli warunek ten nie jest spełniony można zmienić pokrycie poprzeczne  $q$  (nie może być jednak mniejsze niż 25% lub 30%) czyli zarazem wartość

$B_Y$ . Po optymalizacji rozmieszczenia szeregów liczba szeregów może ulec zmianie.

- Wyznaczenie współrzędnych środków rzutów poszczególnych zdjęć. Zdjęcia należy tak zaprojektować, aby współrzędne (wzdłuż osi szeregu) środków rzutów sąsiadujących ze sobą zdjęć w sąsiednich szeregach były jednakowe. Przykładowo jeżeli oś szeregu ma kierunek W – E to środek rzutów zdjęcia szeregu pierwszy i sąsiadującego z nim zdjęcia w szeregu drugim powinny mieć taką samą współrzędną E. Celem tego zabiegu jest doprowadzenie do tego, aby obszary potrójnego pokrycia zdjęć w poszczególnych szeregach nakładały się z takimi samymi obszarami w szeregach sąsiednich.

W tym celu wybiera się najdłuższy szereg i projektuje w nim położenie środków rzutów. Zdjęcia rozpoczyna się wykonywać przed granicą obszaru opracowania w odległości  $2 \cdot B_X$  od tej granicy, a kończy minimum  $2 \cdot B_X$  za granicą. Następnie wyznacza się współrzędne środków rzutów w pozostałych szeregach pamiętając o warunku nakładania się obszarów potrójnego pokrycia zdjęć w sąsiednich szeregach.

- Po wyznaczeniu współrzędnych środków rzutów wszystkich zdjęć należy obliczyć ogólną liczbę zdjęć  $N$ .

- Wyznaczenie powierzchni stereogramu  $P_m = (L_{pd} - B_X) \cdot L_{pp}$

- Wyznaczenie powierzchni użytecznej stereogramu  $P_u = B_X \cdot B_Y$

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

- Wysokość lotu ponad poziom terenu:  $W = c_k \cdot m_z$

- Bezwzględna wysokość lotu (ponad poziom morza):  $W_0 = W + H_{sr \text{ terenu}}$

- Wysokość lotu ponad poziom lotniska:  $W_{lot} = W_0 - H_{lotniska}$

- Interwał czasu pomiędzy wykonaniem kolejnych zdjęć.

Jest to czas, jaki upływa między wyzwaniem migawki kamery wykonującej kolejne zdjęcia. Wynika z przyjętego pokrycia podłużnego zdjęć i założonej prędkości lotu i musi być większy od minimalnego czasu pomiędzy rejestracją zdjęć dla danej kamery. Jeżeli warunek ten nie jest spełniony należy: zmniejszyć prędkość samolotu lub wymienić kamerę lub wymienić samolot.

$$\Delta t = \frac{B_X}{v}$$

- Dopuszczalny czas otwarcia migawki kamery.

Jest to czas otwarcia migawki, powyżej którego wystąpi przekroczenie założonego rozmazania obrazu  $\Delta s$ , spowodowanego ruchem samolotu. Musi się on mieścić w zakresie pracy migawki kamery i w zakresie przewidywanych warunków ekspozycji.

$$\tau = \frac{\Delta s \cdot m_z}{v}$$

- **Analiza a priori dokładności opracowania stereofotogrametrycznego**

Dokładność sytuacyjna  $m_{X,Y}$  zależy terenowego rozmiaru piksela i od dokładności

pomiaru na zdjęciu  $m_{x,y}$ . Natomiast dokładność wysokościowa  $m_z$  zależy od kątów przecięć promieni jednoimiennych. Im krótsza ogniskowa stożka kamery, tym korzystniejszy kąt przecięcia promieni i tym większa dokładność określenia współrzędnej Z. Współczynnik  $K=W/B$  zwany stosunkiem bazowym charakteryzuje bardzo dobrze kąty wcinające. Im większa wartość tego współczynnika tym mniejsza dokładność wysokościowa.

Można przyjąć, że dokładność pomiaru na zdjęciu wyraźnych szczegółów terenowych wynosi 1 piksel. Wobec tego

$$m_{XY} = P_T$$

$$m_z = (W/B) \cdot m_{XY} = (c_k/b) \cdot m_{XY}$$

- Niezbędnym załącznikiem do planu lotu jest wykaz współrzędnych planowanych środków rzutów w poszczególnych szeregach.

### **Część graficzna projektu**

W części graficznej projektu lotu wnosi się na mapę topograficzną

- granice obiektu terenowego linią zieloną ciągłą grubości 1mm, przy czym jeśli obrys obiektu jest nieregularny, należy dokonać generalizacji,
- osie szeregów linią ciągłą koloru czerwonego o grubości 0.3 mm,
- znaki włączenia i wyłączenia kamery, kolorem niebieskim, linią ciągłą grubości 1mm, prostopadłą do osi szeregu przy wlocie i wylocie szeregu. Linia ta powinna być zakończona prostopadłymi do niej strzałkami o długości 1 cm, skierowanymi w kierunku lotu,
- numery szeregów wzrastające z północy na południe lub ze wschodu na zachód cyframi czerwonymi o wysokości 6 mm.

### **Założenia do wykonywanego ćwiczenia:**

- 1 Wykonanie zdjęć fotogrametrycznych dla opracowania ortofotomapy terenu przeznaczonego pod inwestycję. Terenowy rozmiar piksela zawarty w granicach  $4 \div 7$  cm przydziela prowadzący.
- 2 Zdjęcia powinny być wykonane jako szeregowe, z pokryciem podłużnym 60% i poprzecznym zgodnym z wytycznymi technicznymi K-2.7
- 3 Zdjęcia mają być wykonane jedną z kamer umieszczonych w załączonych tabelach, wyposażoną w stożek o kącie rozwarcia dobranym do terenu objętego nalotem i rodzaju opracowania fotogrametrycznego.
- 4 Kamera zamontowana ma być na pokładzie jednego z samolotów fotogrametrycznych (patrz tabela)
- 5 Samolot wystartuje z lotniska w Krakowie-Balicach. Wysokość lotniska 200 m n.p.m.
- 6 Nie należy wnosić na projekcie graficznym kierunków nalotu oraz linii zawracania samolotu. Nie należy również wnosić siatki układu sekcijnego.
- 7 Należy zoptymalizować odległości pomiędzy osiami szeregów.
- 8 Część graficzną projektu rysujemy w programie AutoCAD lub MicroStation v8. Do sprawozdania należy dołączyć plik dgn (lub dwg) z planem lotu oraz zrzut rysunku z ekranu lub wydruk w formacie „pdf”.

### **Dane do ćwiczenia:**

- 1 Plik dgn i dwg z podłączonym zeskanowanym obrazem arkusza mapy topograficznej 1:10 00. Plik dgn i dwg zawiera obrys obszaru opracowania

### Zestawienie typów samolotów

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Producent	Typ	Moc silników [KM]	Typ skrzydeł	Pulap [m]	Prędkość maksym. [km/h]	Prędkość podróżna [km/h]	Prędkość minim. [km/h]	Długość lotu [h:min]
Antonow	AN-2	1x1 000	Dwupłat	5 200	258	185	90	05:10
Antonow	AN-30	2x2 280	Górnopłat	8 400	540	430	165	06:10
Beechcraft	Baron	2x285	Dolnopłat	6 300	386	294	139	05:30
Britten-Norman	BN 2 Islander	2x260	Górnopłat	5 200	273	244	72	05:00
Cessna	C 189/185	1x300	Górnopłat	5 500	287	272	91	06:00
Cessna	C 206	1x300	Górnopłat	4 500	280	263	100	07:00
Cessna	C 210	1x310	Górnopłat	5 300	378	358	108	04:00
Cessna	C 310/320	2x285	dolnopłat	6 000	350	330	105	06:00
Cessna	C 402/404	2x325	Górnopłat	7 600	426	359	132	04:00
Dornier	DO 28	2x380	Górnopłat	7 700	290	242	70	03:30
Partenavia	P 68	2x200	Górnopłat	6 100	322	296	106	05:00
Piper	PA 32Cherokee	1x300	dolnopłat	5 200	280	274	100	05:00
Piper	PA23Aztec	2x250	dolnopłat	5 400	346	278	109	05:00
Piper	PA34Seneca	2x200	dolnopłat	7 600	378	348	113	05:00
Piper	PA31Navajo	2x350	dolnopłat	7 600	420	383	118	05:00

### Zestawienie kamer cyfrowych

Nazwa kamery	ogniskowa [mm]	kąt rozwarcia wzdłuż/w poprzek [°]	liczba pikseli wzdłuż kierunku lotu	liczba pikseli w poprzek kierunku lotu	rozmiar detektora [μm]	czas rejestracji zdjęcia [s]	migawka
DMC II 140	92	43.3/50.7	11200	12096	7.2	2.2	
DMC II 230	92	46.6/50.7	14140	15552	5.6	2.3	
DMC II 250	92	38.6/45.5	14016	16768	5.6	2.3	
UltraCam Eagle	80	46/66	13080	20010	5.2		1/500 – 1/32
UltraCam Eagle	210	20/28	13080	20010	5.2	1.8	1/500 – 1/32
UltraCam XP WA	70	52/73	11310	17310	6	2	1/500 – 1/32
UltraCam Xp	100	37/55	11310	17310	6	2	1/500 – 1/32