

Jak policzyć i pomierzyć drzewa w lesie za pomocą zdjęć lotniczych?

Krzysztof Będkowski

Abstrakt. Celem pracy jest przedstawienie prostych relacji geometrycznych pomiędzy obiektami znajdującymi się na powierzchni terenu oraz ich odwzorowaniem na zdjęciach lotniczych, ze szczególnym uwzględnieniem potrzeby pomiarów wymiarów drzew. Omówiono pomiary wysokości drzew, szerokości (średnic) ich koron oraz odległości pomiędzy drzewami. Zwrócono uwagę na specyfikę geometrii rzutu środkowego, w którym wykonywane są zdjęcia lotnicze. Przedstawiono źródła błędów wynikających z nieprawidłowego rozpoznania na zdjęciach poszczególnych drzew, podstaw ich pni oraz wierzchołków, a także ograniczenia zastosowań opisanych metod powodowane przez specyficzną strukturę pionową i poziomą drzewostanów. W dalszej części pracy zwrócono uwagę na znaczenie pory sezonu wegetacyjnego, w której wykonywane są zdjęcia, na możliwość rozpoznawania drzew i ich segmentację, w celu wykrycia koron i określenia ich zasięgów. Ponadto przedstawiono uwagi dotyczące wyboru odpowiedniego typu zdjęć, ich skali, ogniskowej kamery lotniczej i wysokości lotu. Na zakończenie omówiono zalety stereoskopowych pomiarów drzew wykonywanych na zdjęciach lotniczych za pomocą cyfrowych stacji fotogrametrycznych. Wszystkie zagadnienia zostały zilustrowane licznymi rysunkami i zdjęciami lotniczymi.

Słowa kluczowe: fotogrametria, zdjęcia lotnicze, wymiary drzew

Abstract. How to count and measure trees within forest using aerial images?

The scope of this paper is to present simple geometric relations between objects located on ground surface and their representation on aerial images with regard to assessing dimensions of trees. The dimensions described here are tree's heights, crown's diameters and distances between trees. A special attention is paid to the specific geometry of central projection which is those in which images are taken. Discussed are sources of errors caused by improper recognition on images of tree's, bases of their trunks and tree's tops. Some limitations of described approaches due to horizontal and vertical stand's structure are presented also. The importance of vegetation period in which images are taken for trees recognition and their segmentation to detect crowns extends is also explained. Furthermore there are some hints regarding the proper selection of image types, their scale, focal length of aerial camera and appropriate flight altitude given. On the end advantages of digital photogrammetric station and their use in stereoscopic assessing tree's dimensions are discussed. All issues mentioned in this paper are well illustrated with a lot of figures and aerial images.

Keywords: photogrammetry, aerial images, trees dimensions

Wstęp

Sformułowane w tytule zadanie z pozoru wydaje się łatwym: wystarczy zaopatrzyć się w odpowiednie przybory do notowania (kartka, ołówek) i mierzenia (wysokościomierz, średnicomierz), wybrać się do lasu i... zacząć liczyć i mierzyć. Jednak już na samym początku będziemy musieli rozwiązać kilka problemów: Gdzie ten las jest, a właściwie jakie są jego granice? Które drzewa liczyć (tylko duże, czy również te mniejsze lub zupełnie małe)? Co zrobić, aby się w lesie nie zgubić i uniknąć powtórnego zliczenia tych samych drzew? Szybko też zauważymy, że zadanie jest praktycznie niewykonalne, jeśli będziemy oczekiwać, że nic nie zostanie pominięte, a do lustracji będzie cały, choćby nawet nieduży las. Musimy przyjąć inną metodę pracy.

Jako pierwsze powinno pojawić się jednak pytanie o sens działania polegającego na liczeniu drzew w lesie. Komu i kiedy jest ono potrzebne? Czy ktoś jeszcze, oprócz leśników, jak się domyślamy, może chcieć liczyć drzewa? Koniecznie należy policzyć wszystkie drzewa? Czy liczy się drzewa także poza lasami?

Liczba drzew jest wielkością wykorzystywaną przy ustalaniu zasobności lasu, a więc ilości drewna. Wraz z innymi informacjami, jak np. wiekiem drzew, pozwala leśnikom oszacować także w miarę dokładnie spodziewany przyrost drewna w krótszych lub dłuższych okresach czasu. Nikt nie liczy jednak wszystkich drzew. Uwzględnia się tylko lasy starsze, a w nich wyłącznie drzewa o odpowiednich wymiarach. Metoda inwentaryzacji polega na pobieraniu prób, tj. liczeniu drzew (i oczywiście pomiarach kilku innych wielkości ich dotyczących) na niewielkich powierzchniach. Powierzchnie te o wielkości do 5 arów, mogą być rozmieszczone w lesie w regularnej siatce, np. 200×200 m, a ich łączne pole powierzchni stanowi wtedy niewielki ułamek powierzchni lasu (1,25%). Uzyskane wyniki są odnoszone potem do całego lasu. Łatwo się domyślić, że są one obciążone błędem. Jednak zaoszczędzimy wiele czasu a ponadto, za pomocą odpowiednich metod statystycznych można przewidzieć wielkość błędu.

Polegająca na pobieraniu prób metoda inwentaryzacji lasu stosowana jest w wielu krajach. Wymaga jednak dotarcia do każdego miejsca w lesie, w którym będą prowadzone pomiary, co może być kłopotliwe w przypadku obszarów trudnodostępnych, odległych od szlaków komunikacyjnych. W sukurs przychodzą wtedy nowoczesne metody, w których korzysta się ze zdjęć lotniczych lub pomiarów skanerem laserowym.

Nie tylko w leśnictwie przydatne są informacje o drzewach. Sądy rozpatrują wiele sporów sąsiedzkich o drzewa rosnące (lub częściej – wycięte) poza granicami działek, bez wymaganych zezwoleń. W grę wchodzi nie tylko wartość drzew, ale także bardzo wysoka kara za nielegalny wyrąb. Jeśli dostępne są archiwalne zdjęcia lotnicze, dla rozstrzygnięcia sprawy mogą być powołani rzeczoznawcy z zakresu fotogrametrii, którzy wypowiedzą się o gatunku, liczbie i wymiarach drzew, po których w terenie bardzo często nie ma już śladu. Są jednakże granice ich kompetencji wynikające z wielu uwarunkowań technicznych i przyrodniczych, o których jest mowa w niniejszej pracy.

Drzewa, są obiektem trudnym do pomiaru fotogrametrycznego. Podstawowe znaczenie ma fakt, że drzewa są tworami przestrzennymi o dużym bogactwie kształtów, na dodatek zróżnicowanych w poszczególnych porach sezonu wegetacyjnego. Do uwarunkowań przyrodniczych zaliczyć należy także zmienne warunki oświetlenia w ciągu dnia oraz sezonu.

W fotogrametrii i teledetekcji rejestruje się obrazy o istotnie różnych cechach geometrycznych i interpretacyjnych: od zdjęć z niskich wysokości za pomocą kamer przenoszonych przez bezzałogowe statki powietrzne, do zobrażeń satelitarnych, od zdjęć czarno-białych,

poprzez barwne w barwach naturalnych lub umownych, po zobrazowania wielospektralne lub hiperspektralne.

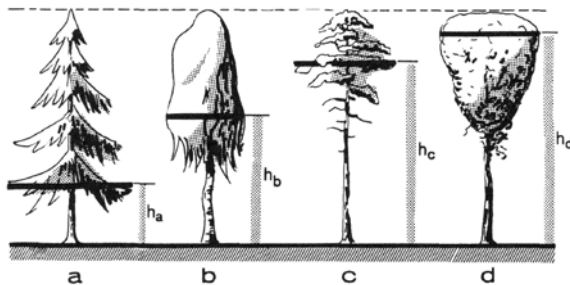
Postawione w tytule opracowania zadanie może być zrealizowane przy zastosowaniu szeregu technik fotogrametrii i teledetekcji o bardzo różnym stopniu zaawansowania technologicznego – tych korzystających z podstawowych i łatwo dostępnych środków, jak i takich, do których niezbędne jest posiadanie odpowiednio przetworzonych zdjęć, specjalistycznego oprogramowania i oprzyrządowania. W opracowaniu omówiono własności odwzorowania drzew na zdjęciach lotniczych i wynikające z nich proste metody pozwalające na ustalenie ich położenia i wymiarów.

Odwzorowanie drzew na zdjęciach lotniczych

Czynniki przyrodnicze

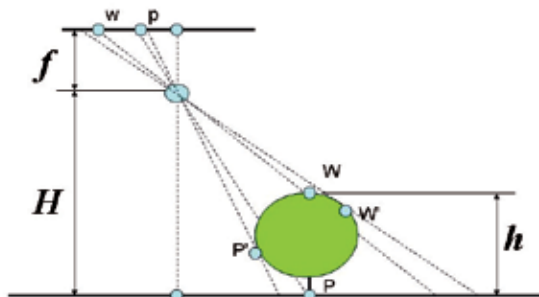
Drzewa tworzą korony o różnych kształtach. Drzewa gatunków iglastych, szczególnie w młodszym wieku, mają korony regularne, symetryczne, o kształcie koła (w rzucie na płaszczyznę poziomą) oraz stożkowate (w przekroju pionowym). U gatunków liściastych spotykane jest znacznie większe bogactwo form koron. Kształty ich przekrojów pionowych można uogólnić za pomocą kilku typowych brył obrotowych (Huss i in. 1984). W rzucie na płaszczyznę poziomą zarysy koron drzew liściastych, w młodym wieku są zbliżone od koła, jednak później stają się nieregularne, bardziej niż u gatunków iglastych.

Najszerza część korony większości drzew iglastych (świerk, jodła, daglezja, modrzew, żywotnik) jest położona stosunkowo nisko, natomiast u gatunków liściastych może znajdować się na różnej wysokości (ryc. 1). Zauważmy także, że drzewa iglaste mają zwykle lepiej zarysowany wierzchołek, natomiast u drzew liściastych jego identyfikacja, szczególnie na zdjęciach lotniczych, może być trudna. Do pomiaru odległości między drzewami przydatna jest widoczność na zdjęciu podstaw pni, jednak często jest to nieosiągalne z uwagi na niskie osadzenie koron drzew, szczególnie gatunków liściastych. Oznaczone na zdjęciach położenie podstaw pni i wierzchołków drzew może być obarczone błędem z uwagi na utrudnioną widoczność lub błędne rozpoznanie (ryc. 2).



Ryc. 1. Położenie najszerszej części korony u różnych gatunków drzew: a – świerk, b – brzoza, c – sosna, d – osika (Ciolkosz, Miszalski, Olędzki 1999)

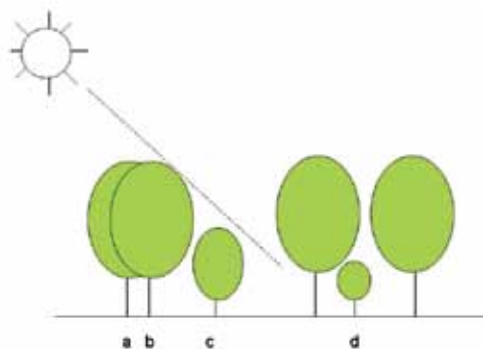
Fig. 1. Height of crowns measured at place where the biggest diameter: a – Norway spruce, b – Birch, c – Scotch pine, d – Poplar



Ryc. 2. Błędne rozpoznanie na zdjęciu położenia podstawy (p) i wierzchołka (w) drzewa, szczególnie przy pomiarach drzew liściastych: f – ogniskowa kamery, H – wysokość lotu, h – wysokość drzewa (Będkowski 2014)

Fig. 2. Errors in recognition of tree's base (p) and top (w) on an image as it is the case especially by deciduous trees: f – camera focal length, H – flight altitude, h – tree height

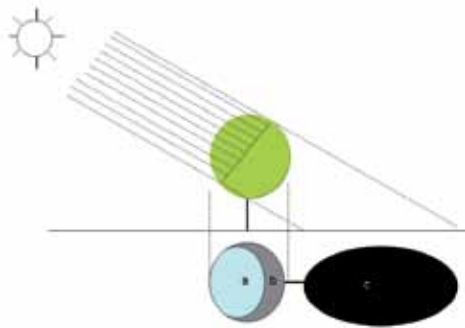
Drzewa rosnące blisko siebie bardzo często tworzą korony wspólne, widziane są jako jedno drzewo i ich odróżnienie jest niemożliwe. Brak także możliwości zarejestrowania na zdjęciach drzew rosnących pod koronami drzew wyższych (ryc. 3).



Ryc. 3. Struktura zadrzewienia wpływa na możliwość identyfikacji i pomiaru drzew. Drzewa a i b tworzą wspólną koronę, c – znajduje się w cieniu drzew wyższych, d – jest w cieniu i pod koronami drzew wyższych (Będkowski 2014)

Fig. 3. Stand structure affects possibility of tree's recognition and measuring. Trees a and b form one crown, c – is shadowed with higher trees, d – is shadowed and located under higher trees

Kierunkowe oświetlenie słoneczne powoduje powstawanie cieni – rzucanych przez drzewa oraz tzw. cieni własnych (ryc. 4). Na kontrastowych zdjęciach lotniczych niewidoczne mogą być części koron drzew lub nawet całe drzewa, jeśli znajdują się w cieniu rzucanym przez sąsiednie drzewa. Cięż rzucany przez drzewo może być jednakże w niektórych przypadkach wykorzystany do pomiaru szerokości koron (więcej w dalszej części opracowania).



Ryc. 4. Część oświetlona korony (a), cień własny (b) i cień rzucany (c). U drzewa z koroną osadzoną wysoko może być widoczny cień pnia (Będkowski 2014)

Fig. 4. Sunny part of crown (a), an „own” shadow (b) and shadow casted on ground surface (c). By high trees a trunk may be visible too

Cień własny utrudnia poznanie kształtu korony i wykreślenie jej zasięgu. Duża kontrastowość zdjęć wykonywanych w warunkach pełnego oświetlenia słonecznego powoduje, że dolne części koron drzew są niewidoczne (pozostają w głębokim cieniu). Z tego powodu obserwatorzy bardzo często zmieniają kształt i wielkość rzutu korony, ograniczając jej zasięg do części w pełni oświetlonej.

W trakcie sezonu wegetacyjnego drzewa zmieniają aparat asymilacyjny. U drzew iglastych (z wyjątkiem modrzewia) zmiany są mało zauważalne. Wyrażają się w postaci nieznacznej zmiany zabarwienia koron w okresie wiosennym, na skutek pojawienia się młodych pędów o na ogół jaśniejszej barwie igliwia i nie mają większego znaczenia dla pomiarów.

Drzewa liściaste przechodzą okres bezlistny i w tym czasie jest bardzo trudno poprawnie wyznaczyć zasięgi ich koron (ryc. 5). Niekiedy, np. na zdjęciach w małej skali, oraz wykonanych w trudnych warunkach oświetlenia ogólnego, niektóre z koron drzew mogą być niezauważone.



Ryc. 5. Fragment zdjęcia lasu wykonanego w okresie przedwiośnia. Widoczne są korony sosen, natomiast korony drzew liściastych są trudne do rozpoznania. Interpretację obrazu dodatkowo utrudniają wyraźne cienie pni drzew, bowiem zdjęcie wykonano przy pełnym oświetleniu słonecznym (archiwum KULGiEL SGGW)

Fig. 5. An image taken on early spring. There are scotch pine crowns visible, while crowns of deciduous trees are difficult to recognize. Image interpretation is difficult because of trunk’s shadows as the image was taken under direct sunlight conditions (archive of KULGiEL – Dept. of Forest Management, Geomatics and Forest Economics, Warsaw University of Life Sciences)

Na początku sezonu wegetacyjnego widoczne są różnice w rozwoju wielkości aparatu asymilacyjnego (rozwoju liści) między gatunkami, a także między drzewami należącymi do tego samego gatunku. W miarę upływu czasu drzewa rozwiną w pełni aparat asymilacyjny i jedyne różnice między nimi będą polegały na odmiennym odcieniu zieleni liści. Ten okres kończy się w Polsce centralnej około 15÷20 czerwca i odtąd aż do ok. 15÷20 sierpnia wszystkie gatunki drzew liściastych mają podobne barwy koron, na dodatek także bardzo podobne do gatunków iglastych (ryc. 6). Od około połowy sierpnia do połowy września pojawiają się przebarwienia liści spowodowane przez suszę – sąsiadujące ze sobą drzewa mogą różnie reagować z powodu przestrzennego zróżnicowania wilgotności zajmowanych przez nie stanowisk. Od połowy września rozpoczyna się natomiast jesienne różnicowanie barw koron drzew, które dotyczy gatunków liściastych. Modrzew, jedyny rodzimy gatunek iglasty zrzucający na zimę igły, stosunkowo długo utrzymuje zieloną barwę koron. Dopiero w końcówce sezonu wegetacyjnego gwałtownie przechodzi w fazę żółtych igieł, które zaraz po tym traci.



Ryc. 6. Drzewostany złożone z różnych gatunków. Gatunki iglaste mają na ogół ciemniejszą barwę, dodatkowymi elementami rozpoznawczymi są cechy kształtu koron (archiwum KULGiEL SGGW)
Fig. 6. Forest stands with diverse species. Coniferous trees are mainly with dark colors, additionally they can be recognized by their crowns shapes

Początek sezonu wegetacyjnego, a szczególnie jego koniec, to fazy rozwoju drzew, które mogą być wykorzystane do lepszego rozróżnienia koron poszczególnych egzemplarzy drzew tego samego gatunku rosnących obok siebie (ryc. 7). Pomaga w tym, znane i opisywane w licznych badaniach fenologicznych, zjawisko nierównoczesnego rozwoju aparatu asymilacyjnego w okresie wiosennym lub przechodzenia drzew do spoczynku zimowego.



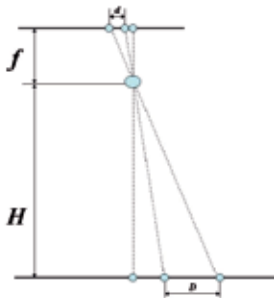
Ryc. 7. Jesienne zróżnicowanie barw liści drzew ułatwia wskazanie indywidualnych drzew oraz zasięgów ich koron – zdjęcie w barwach naturalnych (archiwum KULGiEL SGGW)

Fig. 7. Autumn colors of tree's crowns helps to recognize single trees and their crown's extends

Pomiary drzew na zdjęciach

Zdjęcie lotnicze powstaje jako rzut środkowy. Elementarne zależności pomiędzy parametrami fotografowania (ogniskową kamery f , wysokością lotu H) oraz odcinkami zmierzonymi na zdjęciu i terenie, mogą być wykorzystane do wyznaczenia skali zdjęcia $1 : m$ (ryc. 8). Zaznaczyć należy, że mowa tu o skali zdjęcia powstającego na nośniku światłoczułym umieszczonym w płaszczyźnie obrazowej kamery. W kamerach analogowych jest to film, a w cyfrowych płytka elementów CCD. Skalę zdjęcia dowolnie powiększonego, np. w postaci wydruku lub wyświetlonego na ekranie, można wyznaczyć tylko ze stosunku długości odcinka zmierzonego na zdjęciu oraz jego odpowiednika w terenie.

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H} \quad \text{lub} \quad \frac{1}{m} = \frac{d}{D}$$



Ryc. 8. Podstawowe zależności między skalą zdjęcia lotniczego $1 : m$, ogniskową kamery f , wysokością lotu H oraz długością odcinków na zdjęciu d i w terenie D . Wyznaczona skala odnosi się do odcinków (obiektów) płaskich leżących na powierzchni terenu (Będkowski 2014)

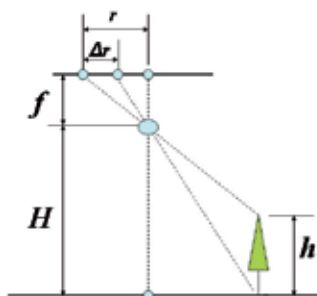
Fig. 8. Basic relations between image scale $1 : m$, focal length f , flight altitude H and the distances measured on an image d and on a terrain surface D . Calculated image scale is valid for objects located on plane ground surface only

Zdjęcia cyfrowe charakteryzuje się za pomocą rozdzielczości przestrzennej, określającej terenową wielkość piksela obrazu. Można przyjąć, że optymalna wielkość piksela powinna wynosić ok. 10÷15 cm. Przy większym pikselu utrudnione jest rozróżnienie koron poszczególnych drzew, natomiast piksel mniejszy oznacza znaczny wzrost wielkości pliku.

Fakt, że zdjęcia są wykonywane w rzucie środkowym powoduje, że obiekty przestrzenne odwzorowują się w różny sposób, zależnie od położenia na zdjęciu. Charakterystycznym jest tzw. przesunięcie radialne Δr wierzchołków drzew względem podstaw pni (ryc. 9, 10, 13).

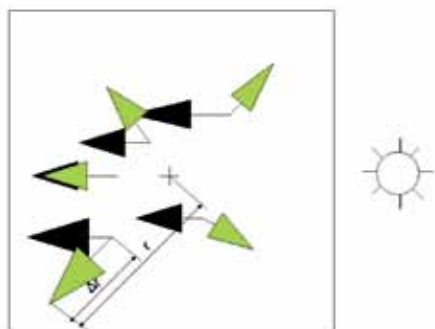
$$\Delta r = \frac{h}{H} r$$

Efekt rzutu środkowego przejawia się w tym, że drzewa, szczególnie te znajdujące się na skrajnych częściach zdjęć, widoczne są nieco z boku (ryc. 10, 11).



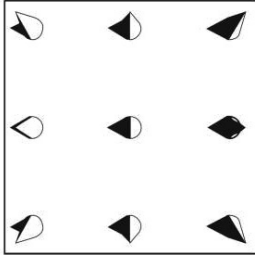
Ryc. 9. Przesunięcie radialne Δr wierzchołka drzewa względem jego podstawy jest wprost proporcjonalne do wysokości drzewa h oraz odległości r od wierzchołka drzewa do punktu głównego (środką zdjęcia) i odwrotnie proporcjonalne do wysokości H , z której wykonano zdjęcie (Będkowski 2014)

Fig. 9. A shift Δr of tree top outwards of image center, increases with tree height h and distance r between tree top and image center, but decreases with increasing flight altitude H



Ryc. 10. Sposób pomiaru długości odcinków Δr oraz r na zdjęciu lotniczym (Będkowski 2014)

Fig. 10. Way of measuring distances Δr and r on an image



Ryc. 11. Odwzorowanie na zdjęciu lotniczym drzew, cieni własnych i cieni rzucanych przez drzewa w zależności od położenia na zdjęciu lotniczym i kierunku oświetlenia (Będkowski i Piekarski 2014 – zmienne)

Fig. 11. Tree's shapes with their "own" shadows and shadows casted on ground plane with regard to their location on image plane and sunlight direction

Wzór opisujący przesunięcie radialne Δr w funkcji wysokości drzewa h , jego położenia na zdjęciu r oraz wysokości fotografowania H , po przekształceniu może być wykorzystany do wyznaczenia wysokości drzewa:

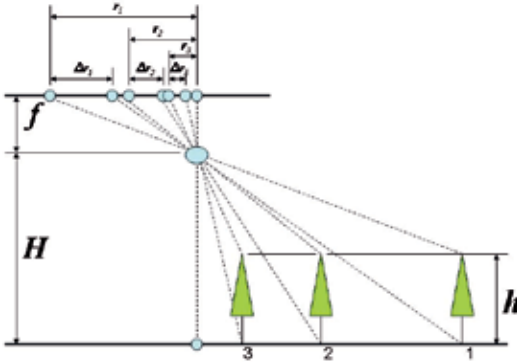
$$h = \frac{\Delta r}{r} H$$

Podana zależność jest z powodzeniem wykorzystywana przy opracowywaniu wyników pomiarów wykonywanych na zdjęciach analogowych (w postaci wydruków). Do obliczeń można wykorzystać także odległości zmierzone na obrazie cyfrowym wyświetlonym na ekranie monitora (konieczne jest zastosowanie programu graficznego umożliwiającego pomiar odległości). Nie ma znaczenia, w jakich jednostkach jest wykonywany pomiar, gdyż ważne jest jedynie wyznaczenie wartości ilorazu $\Delta r / r$.

Cień własny i rzucany tworzą specyficzny obraz drzew, zmieniający się w różnych fragmentach zdjęcia. Obserwatorzy niekiedy myślą obraz drzewa w rzucie środkowym z cieniem rzucanym przez drzewo. Przyczyną jest fakt, że cień rzucany jest znacznie lepiej widoczny w porównaniu do obrazu drzewa (ryc. 12).



Ryc. 12. Drzewa (sosny) i ich cienie odwzorowane na zdjęciu lotniczym (archiwum KULGiEL SGGW)
Fig. 12. Trees (Scotch pine) and their shadows as seen on an aerial image



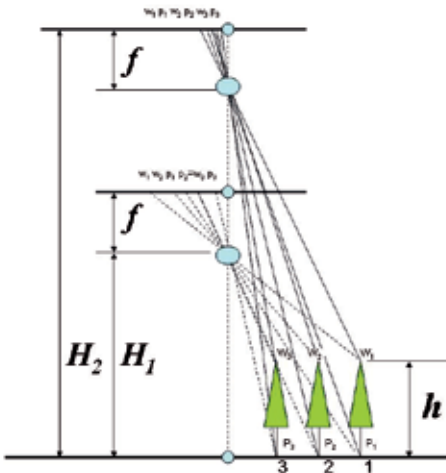
Ryc. 13. Drzewa o tej samej wysokości, lecz zajmujące różne położenie, mają na zdjęciu różnej wielkości przesunięcie wierzchołka względem podstawy: $\Delta r_1 > \Delta r_2 > \Delta r_3$ (Będkowski 2014)

Fig. 13. Trees with same height due to their different location may have different shifts of tree tops: $\Delta r_1 > \Delta r_2 > \Delta r_3$

Wielkość wpływającą na obserwowaną na zdjęciach wielkość przesunięcia radialnego Δr są wzajemnie powiązane. Odpowiednio dobierając warunki fotografowania (ogniskową kamery f oraz wysokość lotu H) można uzyskać zdjęcia o oczekiwanej skali, na których wielkość przesunięć radialnych Δr wierzchołków koron drzew względem podstaw pni (a więc także deformacja kształtu koron drzew) będą zminimalizowane, a dodatkowo poprawiona będzie widoczność koron drzew (ryc. 14).

Drzewa znajdujące się w środku lub blisko środka zdjęcia nie wykazują przesunięć radialnych lub są one bardzo małe. Ich korony są odwzorowane w sposób podobny do takiego, jaki by uzyskano za pomocą rzutu ortogonalnego (równoległe i pionowe promienie rzutujące).

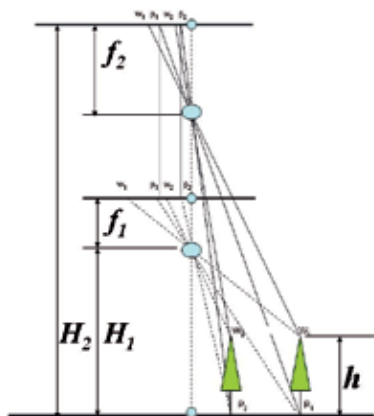
Poprzez zwiększenie wysokości fotografowania polepszony jest także wgląd między drzewa – widoczne są i dostępne do pomiaru niżej położone części koron drzew pozostających w bliskim sąsiedztwie (o ile w obserwacji nie przeszkadza cień rzucany przez drzewa).



Ryc. 14. Wpływ wysokości fotografowania na odwzorowanie na zdjęciu drzew rosnących blisko siebie. Na zdjęciu wykonanym z niskiej wysokości nie widać części koron lub nawet całych drzew. Po zwiększeniu wysokości fotografowania polepszyła się widoczność drzew, lecz zmniejszyła skala zdjęcia (Będkowski 2014)

Fig. 14. Trees are differently seen on images taken from different flight altitudes. On low altitude images there are crown's parts or even whole crowns invisible. Trees can be with increasing flight height seen better but image scale decreases

Możliwe jest takie dobranie warunków fotografowania, aby zdjęcia wykonywane z różnych wysokości miały jednakową skalę (ryc. 15). Efekt, który się uzyskuje jest analogiczny do wykonania powiększenia zdjęcia wykonanego kamerą o krótkiej ogniskowej lecz z większej wysokości.

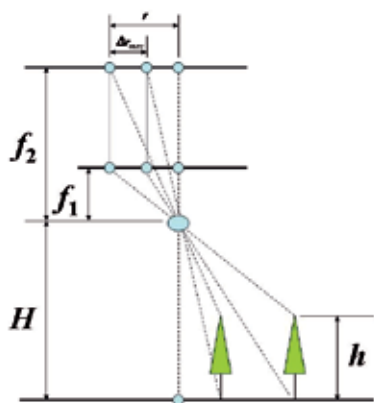


Ryc. 15. Poprzez zastosowanie odpowiednio dobranych kamer o różnych ogniskowych ($f_1 \neq f_2$) można przy fotografowaniu z różnych wysokości uzyskać zdjęcia o takiej samej skali. Należy zauważyć, że dotyczy to jedynie obrazów obiektów położonych na poziomym terenie – tutaj np. odcinek P_1P_2 w terenie jest odwzorowany jako odcinek p_1p_2 o jednakowej długości na obydwu zdjęciach (Będkowski 2014)

Fig. 15. With applying aerial cameras with appropriate focal lengths ($f_1 \neq f_2$) there is possible to get same image scale even with different flight altitudes. Note that this is valid for objects located on planar ground surface only: terrain distance P_1P_2 can be identified with distance p_1p_2 which is same on both images

Deformacje powodowane przez rzut środkowy przeszkadzają w prawidłowym wyznaczeniu kształtów koron na zdjęciu i pomiarze ich wielkości. Dla każdego rodzaju zdjęć można obliczyć wielkość promienia okręgu, ze środkiem w punkcie głównym (środek zdjęcia), w obrębie którego wielkość przesunięcia radialnego (a tym samym i deformacja kształtów koron) nie przekroczy zakładanej wielkości Δr_{max} . (ryc. 16).

$$r = \frac{\Delta r_{max}}{r} H$$



Ryc. 16. Wszystkie drzewa o wysokości h , znajdujące się na zdjęciach w zasięgu promienia r mają przesunięcie radialne równe lub mniejsze niż Δr_{max} (Będkowski 2014)

Fig. 16. The shift of tree's tops outwards to image center of all trees with height h , within a r radius is equal or smaller than Δr_{max}

Jeśli celem pomiaru jest wyznaczenie odległości pomiędzy drzewami niezbędne jest, aby podstawy pni drzew były widoczne na zdjęciu (ryc. 17). Analogicznie do poprzednich wzorów, dla kamer o różnych ogniskowych f_1 i f_2 napiszemy:

$$\frac{f_1}{H} = \frac{1}{m_1} = \frac{d_1}{D} \quad \text{oraz} \quad \frac{f_2}{H} = \frac{1}{m_2} = \frac{d_2}{D_2}$$

Aby dokładnie wyznaczyć odległość $D_p = D_w$ między drzewami lub szerokość korony D_k , należy uwzględnić zmianę skali odwzorowania wynikającą z wysokości drzewa h (ryc. 18):

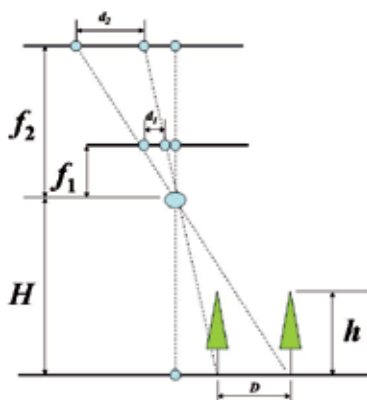
$$\frac{f}{H-h} = \frac{d_w}{D_w}$$

lub wysokości, na której jest położona mierzona średnica korony h_k (ryc. 19):

$$\frac{f}{H-h_k} = \frac{d_k}{D_k}$$

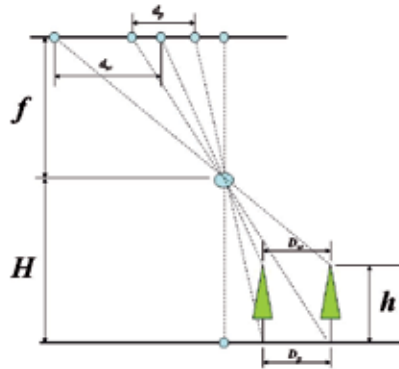
Pominięcie wysokości drzewa h w obliczeniach, czyli nie uwzględnienie różnicy skali odwzorowania na zdjęciu odcinków D_p oraz D_w powoduje nieznaczne zawyżenie wyników. Przedstawiony wpływ zmiany skali odwzorowania na wyniki obliczeń odległości między drzewami lub szerokość koron jest jednak bardzo mały i w praktyce nie musi być uwzględniany.

Warunkiem poprawnego wyznaczenia odległości między drzewami na podstawie zmierzonych na zdjęciach odcinków między ich wierzchołkami, jest aby drzewa miały taką samą wysokość oraz aby teren nie był zbyt różnicowany pod względem wysokościowym. W przeciwnym wypadku obliczone odległości będą obarczone błędami (ryc. 20, 21).



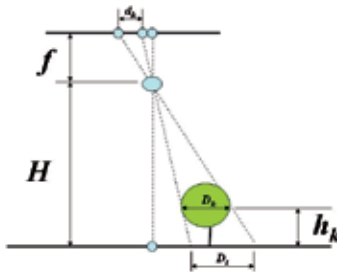
Ryc. 17. Wyznaczanie odległości między drzewami w sytuacji, gdy widoczne są na zdjęciu podstawy pni (Będkowski 2014)

Fig. 17. Assessing distances between trees when tree's bases are visible



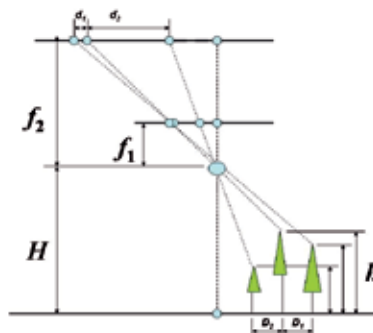
Ryc. 18. Wyznaczanie odległości D_p między drzewami poprzez pomiar odległości d_p pomiędzy ich wierzchołkami widocznymi na zdjęciu lotniczym (Będkowski 2014)

Fig. 18. Assessing distance between trees using distance d_p between tree's tops measured on an image



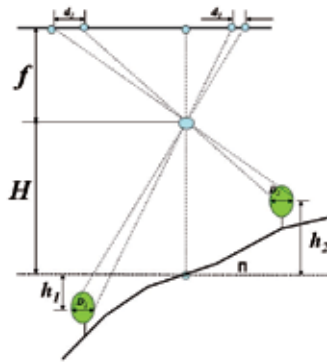
Ryc. 19. Wyznaczanie szerokości korony D_k drzewa poprzez pomiar jej szerokości d_k na zdjęciu lotniczym (Będkowski 2014)

Fig. 19. Assessing crown diameter D_k using its diameter d_k measured on an aerial image



Ryc. 20. Równym odległościom w terenie $D_1 = D_2$ między drzewami odpowiadają różne odległości $d_1 \neq d_2$ ich wierzchołków na zdjęciu lotniczym, gdy drzewa są różnej wysokości (Będkowski 2014)

Fig. 20. Trees with diverse heights are seen with different distances between tree's tops $d_1 \neq d_2$, even if they have equal ground distances $D_1 = D_2$



Ryc. 21. Przy dużych różnicach wysokości terenu w obrębie zdjęcia lotniczego nie można wykorzystać prostych zależności do wyznaczenia szerokości koron drzew (Będkowski 2014)

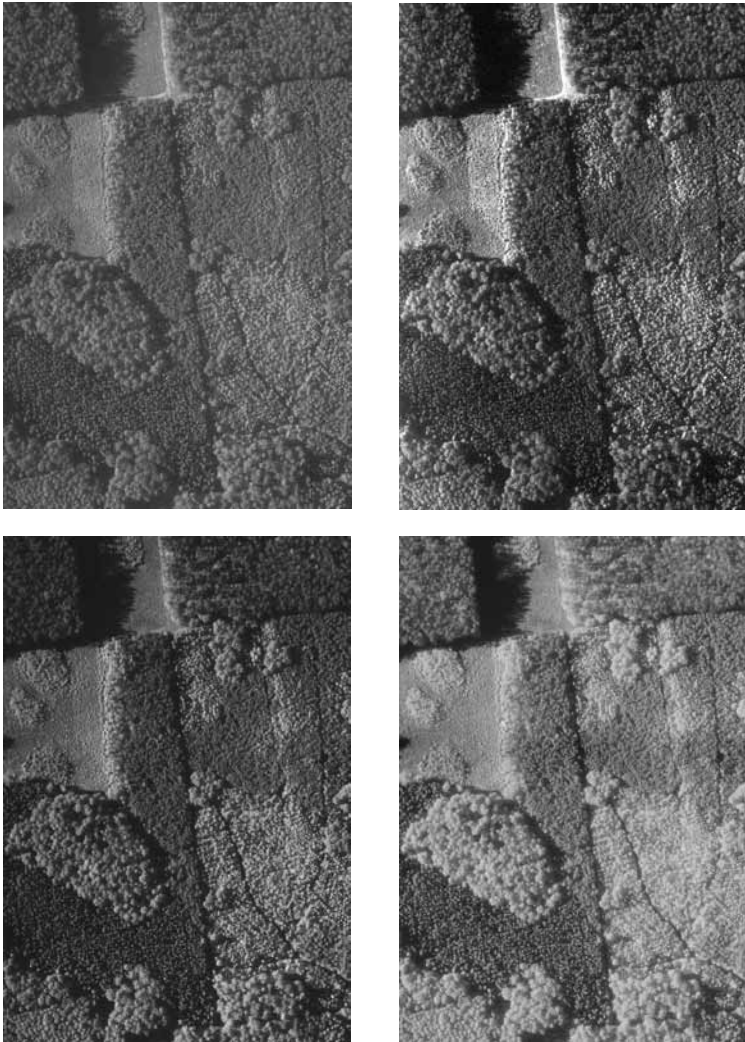
Fig. 21. With high terrain elevation differences there isn't possible to use simple geometric relations when assessing tree's crowns diameters

Kilka uwag o doborze rodzaju zdjęć lotniczych

Obecnie zdjęcia lotnicze są wykonywane za pomocą kamer cyfrowych, przy czym oddzielnie zapisywane są zwykle cztery zakresy (kanały spektralne) promieniowania: niebieskiego (B), zielonego (G), czerwonego (R) i podczerwieni bliskiej (ozn. IR lub NIR). Każdy z tych kanałów może być używany oddzielnie jako zdjęcie czarno-białe (ryc. 22). Najlepszym do odróżniania gatunków i poszczególnych drzew jest kanał podczerwieni.

Obrazy barwne powstają poprzez wyświetlenie trzech wybranych kanałów spektralnych na jednym ekranie, każdego za pomocą innej z trzech barw składowych – niebieskiej, zielonej i czerwonej. W ten sposób można uzyskać kompozycje w barwach naturalnych – kanały B, G, R lub innych, np. tzw. CIR – Color Infra Red – kanały G, R oraz IR (ryc. 23). Te ostatnie podobne są do znanych i cenionych analogowych zdjęć spektrostrefowych i uważane są za bardzo dobre do opracowań dotyczących rozpoznania rodzaju i stanu obiektów przyrodniczych (roślinności), gdyż lepiej są na nich widoczne różnice barwne między gatunkami lub grupami gatunków (iglaste – liściaste), a także wynikające z różnej kondycji roślinności (stanu zdrowotnego).

Wciąż wykonywane są także zdjęcia czarno-białe, gdyż w porównaniu do zdjęć barwnych mają lepszą rozdzielczość przestrzenną (mniejszy piksel), tracą jednak atrybut barwy, istotny przy opracowywaniu obiektów przyrodniczych. Te zdjęcia korzystnie jest wykonywać w okresie jesieni, jeśli mają służyć do odróżniania koron poszczególnych drzew rosnących w drzewostanach złożonych z gatunków iglastych i liściastych.



Ryc. 22. Zdjęcie wielospektralne wykonane kamerą MSK4, kanały promieniowania zielonego, czerwonego i dwa z zakresu podczerwonego, odpowiednio 540, 660, 720, 840 nm (archiwum KULGiEL SGGW)
Fig. 22. A multispectral image taken with MSK4 camera: green, red and two infrared bands, 540, 660, 720, 840 nm respectively



Ryc. 23. Kompozycja barwna uzyskana z kanałów G, R oraz IR. Pokazano sposób pomiaru szerokości koron z wykorzystaniem cienia rzucanego przez drzewa. Metoda może być wykorzystana tylko do drzew wolnostojących, nie w zadrzewieniach zwartych (Będkowski 2014, zdjęcie z archiwum KULGiEL SGGW)
Fig. 23. Image composite made with use of G, R and IR bands. There is shown how to use a shadow casted by tree to assess it's crown diameter. This approach can be applied to single tree growing apart from other trees only, not to trees in forest stands

Przetwarzanie zdjęć

Współczesna fotogrametria dysponuje szeregiem metod przetwarzania treści zdjęć, o różnym stopniu zaawansowania, które mogą być zastosowane przez użytkownika, stosownie do jego potrzeb i możliwości. W zasadzie do wyboru są następujące materiały:

- zdjęcia nieprzetworzone, zapisane w postaci wydruku lub wyświetlane na ekranach; Do zdjęć nieprzetworzonych odnoszą się wszystkie omówione wcześniej własności geometryczne wynikające z istoty rzutu środkowego,
- obrazy przetworzone do postaci tzw. ortofotomapy lub obrazów ortorektyfikowanych (inaczej ortomozaik),
- produkty przetwarzania danych skanowania laserowego,
- stereoskopowa obserwacja i pomiar (stereodigitalizacja) zdjęć z wykorzystaniem cyfrowych stacji fotogrametrycznych.

Rozwijane dawniej inne metody przetwarzania zdjęć, np. optyczno-mechaniczne, nie mają już racji bytu. Obecnie mamy w zasadzie dwie skrajne sytuacje: stosuje się albo materiały nieprzetworzone i bardzo proste metody pomiarów lub produkty zaawansowanych technologii cyfrowych, wymagające jednakże posiadania odpowiedniego oprogramowania i sprzętu. Dla pełnego omówienia wszystkich metod i technologii niezbędny byłby obszerny podręcznik. W dalszej części zwrócono uwagę jedynie na opracowania wykorzystujące własności zdjęć stereoskopowych.

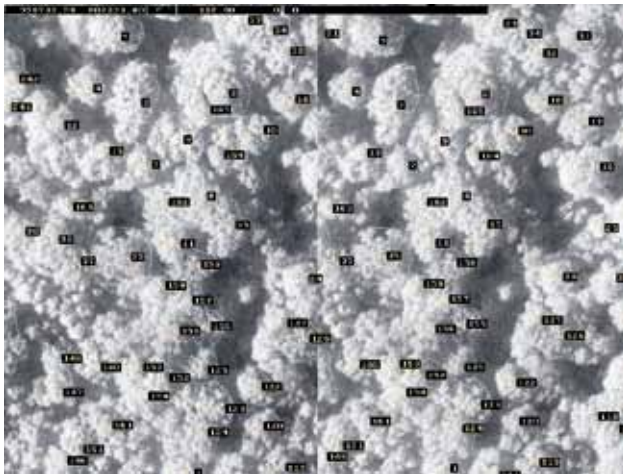
Proste prace na materiałach analogowych (kreślenie i pomiary) można realizować z wykorzystaniem stereoskopów. Stereoskopowa obserwacja i pomiary na zdjęciach polega na jednoczesnej dwuocnej obserwacji dwóch zdjęć (tzw. stereogramów), wykonanych z dwóch punktów w przestrzeni, wynikiem której jest możliwość oceny odległości i wzajemnego położenia oglądanych przedmiotów.

Jeśli wynikiem opracowania ma być rysunek konturów obiektów (np. koron drzew), wówczas można rysować bezpośrednio na jednym ze zdjęć lub użyć materiał transparenty. Należy jednak pamiętać, że rysunek obarczony będzie wszystkim omówionymi wcześniej zniekształ-

ceniami geometrycznymi wynikającymi z istoty odwzorowania obiektów przestrzennych na zdjęciu lotniczym w rzucie środkowym. Sama dokładność rysowania również jest niewielka – błąd położenia wynosi ok. $0,1 \pm 0,2$ mm, co przy skali zdjęć np. 1:10 000 oznacza błąd 1÷2 m w terenie. Wartość pomiarową mają jedynie fragmenty obrazu położone w pobliżu środka zdjęcia. W dobie powszechnej dostępności systemów komputerowych ten sposób stereoskopowego opracowania obrazów ma obecnie bardzo ograniczone zastosowanie.

Właściwe opracowania stereoskopowe wykonuje się w fotogrametrii za pomocą cyfrowych stacji fotogrametrycznych – systemów składających się z dwóch komponentów: oprogramowania oraz sprzętu, pozwalających na wykonywanie prac fotogrametrycznych z wykorzystaniem stereoskopowych lub pojedynczych obrazów cyfrowych. Obrazy obserwowane są na monitorach wyposażonych w stereoskop, korzysta się także z kilku innych metod tworzenia efektu stereoskopowego, np. anaglifu.

W modelu stereoskopowym można rysować granice obiektów oraz wykonywać pomiary odległości i pól powierzchni. Wrysowana treść jest umiejscowiona przestrzennie – obserwator ma wrażenie, że punkty, linie lub poligony znajdują się na konkretnej wysokości w modelu, np. na koronach drzew (ryc. 24). Zaletą opracowań wykonywanych stereoskopowo jest to, że znaczek pomiarowy można osadzić dokładnie nawet na mało kontrastowych szczegółach, co jest w zasadzie niemożliwe przy opracowywaniu treści pojedynczych zdjęć (bez korzystania z efektu stereoskopowego). Oznacza to, że np. dużo łatwiej jest wskazać położenie wierzchołków drzew.



Ryc. 24. Kontury koron drzew i ich wierzchołki wyznaczone na zdjęciu lotniczym (kanał podczerwieni) z wykorzystaniem obserwacji stereoskopowej na cyfrowej stacji fotogrametrycznej (Będkowski 2006)

Fig. 24. Crowns contours and their tops recognized stereoscopically on IR-images with digital photogrammetric station

Wyniki pomiarów mogą być przeniesione do systemów informacji przestrzennej w celu dalszego opracowania, np. przy produkcji map oraz numerycznych modeli terenu lub numerycznych modeli pokrycia terenu.

W praktyce fotogrametrycznej pracuje się nie na pojedynczych stereogramach, lecz na dużych blokach zdjęć, które są łączone w procesie aerotriangulacji. Poprawne wykonanie

opracowania wymaga dobrej znajomości tematyki, opanowania technologii i oprogramowania oraz dostępu do odpowiedniego sprzętu.

Stereoskopowa obserwacja i pomiar usprawnia interpretację treści zdjęcia oraz wskazywanie i pomiar szczegółów o małej wyrazistości. Takimi szczegółami są np. wierzchołki koron drzew. Trójwymiarowy model ułatwia osadzenie linii i konturów na odpowiednich miejscach mierzonych obiektów. Wyniki opracowania mogą być zachowane w postaci cyfrowej i eksportowane do innych systemów przetwarzania informacji przestrzennych.

Aby skorzystać z obserwacji stereoskopowej niezbędne jest posiadanie odpowiedniego oprogramowania i sprzętu. Należy także odpowiednio przygotować modele (bloki modeli). Czynniki te powodują, że przedstawiony sposób opracowania zdjęć, aczkolwiek pozwalający uzyskać bardzo dobre rezultaty, nie jest powszechnie dostępny.

Zakończenie

W opracowaniu przedstawiono podstawy teoretyczne i uwarunkowania wykorzystania jednego tylko rodzaju materiałów fotogrametrycznych – zdjęć lotniczych – do pomiarów drzew. Zaproponowano rozwiązania, polegające na stosowaniu łatwych metod, nie wymagające specjalistycznego przetwarzania zdjęć. Użytkownicy mogą jednak dysponować różnorodnym sprzętem i oprogramowaniem, co pozwoli im korzystać np. z ortofotomap lub danych skanowania laserowego itp.

Obszernym zagadnieniem, wymagającym osobnego rozpatrzenia, jest dokładność pomiarów. W tym miejscu zaznaczę jedynie, że zależy ona od skali zdjęć, ich rodzaju, rodzaju i stanu obiektu, zastosowanej technologii fotogrametrycznej. Możliwe jest uzyskanie wielkości charakteryzujących położenie i kształt drzew z dokładnością do kilkudziesięciu centymetrów. Ze względu na brak miejsca, zainteresowanych czytelników muszę w tym miejscu odesłać do specjalistycznej literatury.

Literatura

- Będkowski K. 2014. Metodyka pomiaru średnic koron drzew wolnostojących oraz średnic koron drzew i odstępów między koronami w zadrzewieniach liniowych metodami teledetekcji. Ekspertyza dla ARiMR. Katedra Urządzania Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa, SGGW w Warszawie (niepublikowane).
- Będkowski 2006. Fotogrametryczna metoda oceny stanu i zmian wysokościowej struktury warstwy koron w drzewostanach. Wyd. SGGW, Warszawa.
- Będkowski K., Piekarski E. 2014: Podstawy fotogrametrii i teledetekcji dla leśników. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Ciołkosz A., Miszalski J., Olędzki J.R. 1999. Interpretacja zdjęć lotniczych. WN PWN, Warszawa.
- Huss J. (red.); Akça A.; Hildebrandt G.; Kenneweg H.; Peerenboom H.G.; Rhody B. 1984. Luftbildmessung und Fernerkundung in der Forstwirtschaft. Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe.

Krzysztof Będkowski

Katedra Urządzania Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa
SGGW w Warszawie
krzysztofbedkowski@tlen.pl