

**OCENA ORTOMOZAIK OBRAZÓW UZYSKANYCH ZA POMOCĄ
BEZZAŁOGOWEGO STATKU LATAJĄCEGO DO OKREŚLANIA
WYBRANYCH CECH DENDROMETRYCZNYCH DRZEW
W DRZEWOSTANACH SOSNOWYCH**

**EVALUATION OF THE ORTHO-MOSAIC OBTAINED BY UNMANNED
AERIAL VEHICLE TO DETERMINE SELECTED DENDROMETRIC
VARIABLES OF TREES IN PINE STANDS**

Krzysztof Stereńczak, Krzysztof Będkowski

Katedra Urządzania Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa, Wydział Leśny
Szkola Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

SŁOWA KLUCZOWE: leśnictwo, zdjęcia niemetryczne, cechy taksacyjne

STRESZCZENIE: Wielospektralne zdjęcia cyfrowe, uzyskane za pomocą niemetrycznych kamer cyfrowych przenoszonych przez bezzałogowy statek latający, wykorzystano do utworzenia ortomozaiki o rozdzielczości przestrzennej 0.15 m. Na podstawie ortomozaiki określono cechy dendrometryczne pojedynczych drzew sosny oraz położenie tych drzew w drzewostanie. W terenie zmierzono pierśnice drzew, tj. grubości pni na wysokości 1.3 m. oraz rozpiętość koron, tj. odległość między jej krawędziami na dwóch kierunkach – NS oraz EW, co pozwoliło na obliczenie pola powierzchni jej rzutu. Zasięgi tych samych koron wektoryzowano na ortomozajkach oraz obliczono pole powierzchni. Sprawdzono siłę związku pomiędzy cechami pojedynczych drzew zmierzonymi w terenie oraz pomiędzy polem powierzchni rzutów poziomych koron, określonym na podstawie wyników uzyskanych w terenie, a polem obliczonym na podstawie wyników wektoryzacji na ortomozajce. W obydwu przypadkach uzyskano wysokie wartości wskaźnika determinacji R^2 . Ostatnim etapem analiz rzutów poziomych koron było porównanie wyników wektoryzacji z pomiarem pierśnicowego pola przekroju w terenie. Powierzchnia rzutu poziomego określona w wyniku wektoryzacji na ortomozajce była lepiej skorelowana z pierśnicowym polem przekroju drzew niż pole powierzchni określone na podstawie wyników pomiaru terenowego. Związki pomiędzy pierśnicą i wielkością korony zmierzoną w terenie oraz wielkością korony zmierzoną na ortomozajce mogą być przydatne w inwentaryzacji zapasu (miąższości drewna) szczególnie na powierzchniach pokłeskowych. Uzyskane wyniki są zadowalające z punktu widzenia potrzeb wstępnego szacowania szkód powodowanych przez czynniki katastroficzne oraz inwentaryzacji przestrzeni leśnej, np. na potrzeby badań ekologicznych.

1. WPROWADZENIE

Zdjęcia lotnicze są od dawna wykorzystywane w wielu krajach do określania cech taksacyjnych drzewostanów. W tym celu prowadzone są pomiary w modelach stereoskopowych, rzadziej natomiast na pojedynczych zdjęciach. Na podstawie zdjęć

określa się m.in. liczbę drzew w drzewostanie, zwarcie, skład gatunkowy, wysokość drzew i drzewostanu, a w sposób pośredni, na podstawie wielkości koron, także tzw. pierśnicę, czyli grubość pni na wysokości 1.3 m. Wielkości te służą m.in. do ustalenia zapasu, czyli miąższości drewna w drzewostanie. Literatura z tego zakresu jest bardzo bogata, zagadnienia te są także treścią podręczników z zakresu fotogrametrii leśnej (np. Gieruszyński 1948, Rudzki 1964, Suchich *et al.* 1977, Akça *et al.* 1984, Hildebrandt 1996, Piekarski 2000). Poważną wadą pomiarów kształtów koron drzew w modelach stereoskopowych jest brak widoczności części koron z powodu ich odwzorowania w rzucie środkowym. Obserwator jest zmuszony do zamknięcia obwodu korony, nie znając jej pełnego kształtu. Innym zjawiskiem jest lokalizowanie obwodu korony zbyt wysoko, przez co jej niższe i szersze części nie są uwzględniane. Mimo tych trudności udowodniono, że pomiary fotogrametryczne koron drzew (i wysokości drzew) mogą dostarczyć wiarygodnych danych, które mogą być wykorzystane w inwentaryzacji lasów.

Las jest tworem przestrzennym. Budowa lasu – m.in. skład gatunkowy, rozmieszczenie drzew, struktura przestrzenna pozioma i pionowa – są przez leśników świadomie kształtowane, gdyż ma to znaczenie dla dalszego rozwoju lasu i uzyskiwanych efektów w postaci drewna. Pomiary w modelach stereoskopowych są najlepszym, ale zarazem najbardziej pracochłonnym sposobem ustalania cech taksacyjnych opisujących las. Przeszkodą utrudniającą powszechne stosowanie tego sposobu korzystania ze zdjęć jest konieczność posiadania odpowiedniego sprzętu i oprogramowania fotogrametrycznego oraz odpowiednio przeszkolonego personelu. Znacznie łatwiej jest natomiast zastosować do celów leśnych ortofotomapy, gdyż praktycznie w każdym nadleśnictwie na co dzień korzysta się z systemów informacji przestrzennej. Jedyne ograniczenia jest brak możliwości pomiaru na nich wysokości drzew oraz fakt, że termin wykonania ortofotomapy nie zawsze zbiega się z aktualnymi potrzebami inwentaryzacyjnymi przedsiębiorstwa leśnego. Jeśli uwzględnimy jeszcze niedogodności związane z procedurami zamawiania, przygotowania i realizacji nalotu oraz opracowania wyników, stają się oczywistymi motywy, które powodują wzrost zainteresowania leśników alternatywnymi technikami pozyskiwania obrazów, jakimi są systemy bezzałogowych statków latających. Obserwujemy dynamiczny rozwój zastosowań tych systemów, także w leśnictwie (Przywara 2012). Zaznaczmy przy tym, że w naszym kraju leśnicy jednak bardziej zainteresowani są wykorzystaniem zdjęć do oceny cech jakościowych lasu, np. witalności drzewostanów, szkód huraganowych lub pożarowych i ich kartowania, niż pomiarem dendrometrycznych cech lasu. Do tego celu stosują wypróbowane metody naziemne. Pamiętać należy także, że dokładność ustalenia powierzchniowego zasięgu zjawisk, tak metodami naziemnymi, jak i z wykorzystaniem zdjęć lotniczych, wystarczająca dla potrzeb leśnictwa, jest mniejsza od tej, do której przyzwyczajeni są fotogrametry i geodeci.

Ortomozajki tworzone są na podstawie bardzo dużej liczby zdjęć wykonywanych z pokładu bezzałogowego statku latającego (BSL, ang. UAV), z których wybierane są części obrazu położone blisko punktów głównych zdjęć. Obrazy są łączone automatycznie, z wykorzystaniem algorytmów korelacji obrazów, w jeden obraz (ortomozaikę), który ma cechy zbliżone do tzw. *true orthophoto*. Na obrazach takich korony drzew widoczne są w rzucie zbliżonym do ortogonalnego, co jest okolicznością sprzyjającą dla pomiarów ich wielkości, kształtu i położenia. Otwiera to szerokie możliwości wykorzystania ortomozaik

w badaniach budowy ekosystemów leśnych, szczególnie w obszarze wykorzystania przestrzeni przez pojedyncze drzewa i ich wzajemnych relacji. W pracy przeprowadzono badania mające na celu określenie możliwości zastosowania niemetrycznych wielospektralnych zdjęć cyfrowych pozyskanych za pomocą kamer przenoszonych przez bezzałogowy statek latający, do analizy wybranych cech dendrometrycznych drzew w drzewostanach sosnowych.

2. METODYKA BADAŃ

2.1. CEL BADAŃ

Badania miały na celu ocenę przydatności ortomozaik do pozyskiwania pomiarowych danych dotyczących lasów. Sprawdzone hipotezę, że za pomocą ortomozaik z bezzałogowego statku latającego można określać wielkości koron drzew sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L), a na ich podstawie, za pomocą związków korelacyjnych, ważną cechą taksacyjną, jaką jest średnica pni drzew na wysokości 1.3 m (tzw. pierśnica), a dokładnie powierzchnia pierśnicowego pola przekroju.

2.2. TEREN BADAŃ

Badania przeprowadzone zostały w czterech drzewostanach (tabela 1) uroczyska Głuchów będącego fragmentem Leśnego Zakładu Doświadczalnego w Rogowie, należącego do SGGW w Warszawie. Uroczysko Głuchów zajmuje powierzchnię 967.39 ha, z czego 905.42 ha stanowi powierzchnia zalesiona. Położone jest na terenie gminy Głuchów, w powiecie skierniewickim. Drzewostany, w których prowadzono badania, były jednopiętrowe, niekiedy z dość silnie rozwiniętym podszytem (warstwą krzewów).

Tabela 1. Podstawowe cechy drzewostanów objętych nalotem

GATUNEK GŁÓWNY	WIEK	ZADRZEWIENIE	WYSOKOŚĆ	ZWARCIE
So	64	0,7	22	umiarkowane
Db	76	0,8	21	pełne
So	54	0,8	17	pełne
So	65	0,8	21	umiarkowane

2.3. NIEMETRYCZNE WIELOSPEKTRALNE ZDJĘCIA CYFROWE

W analizach wykorzystano niemetryczne wielospektralne zdjęcia cyfrowe pozyskane za pomocą kamer przenoszonych przez bezzałogowy statek latający. Zdjęcia wykonano w czterech kanałach spektralnych: niebieskim, zielonym czerwonym i bliskiej podczerwieni mieszczących się w zakresie od 0.4 do ok. 1.1 μm długości fali promieniowania elektromagnetycznego. Zostały przetworzone automatycznie w programie EnsoMOSAIC (MosaicMill 2012) do postaci tzw. ortomozaik. Rozdzielczość ortomozaiki (terenowy wymiar piksela) wynosiła 0.15 m. Ponieważ zdjęcia pozyskane zostały

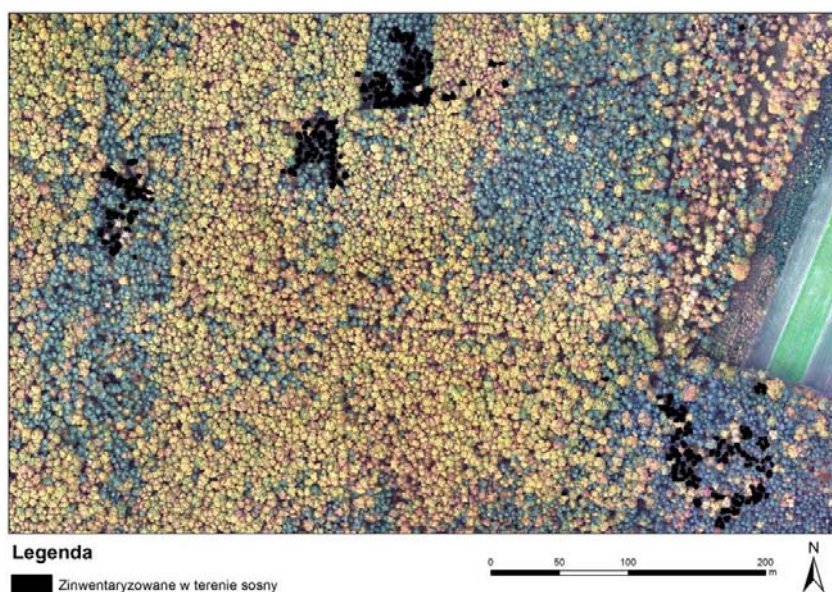
w październiku, uchwycono na nich jesienny aspekt fenologiczny, przejawiający się w zmianie zabarwienia koron drzew gatunków liściastych, dzięki czemu korony sosny wyraźnie odróżniały się na ich tle. Nalot pokrył około 45 ha obszaru leśnego (rys. 1).

Szczególność zastosowanych materiałów fotogrametrycznych przejawia się m.in w:

- Sensorze rejestrującym zdjęcia – zastosowano niemetryczne kamery cyfrowe Sigma DP2¹ odpowiednio zmodyfikowane, tak by rejestrowały zakresy promieniowania niebieskiego (B), zielonego (G), czerwonego (R) oraz podczerwonego (IR).
- Terminie wykonania zdjęć – zdjęcia wykonano w dniu 27 października 2011 r., w końcówce sezonu wegetacyjnego.
- Warunkach atmosferycznych i oświetleniowych – w czasie wykonywania zdjęć dominowało oświetlenie rozproszone, wynikające z faktu lekkiego zachmurzenia nieba. Otrzymane zdjęcia określane są jako bezcieniowe.
- Platformie przenoszącej kamerę – zastosowano bezzałogowy statek latający BSL (*UAV - Unmanned Aerial Vehicle*).

2.4. POWIERZCHNIE PRÓBNE

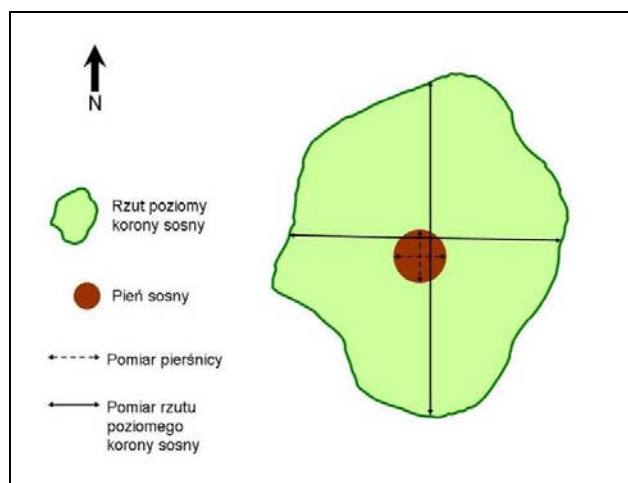
Na terenie pokrytym ortomozaiką założono 4 powierzchnie próbne w tych drzewostanach, których opis podano w tabeli 1. Odpowiednio dobrane położenie powierzchni próbnych gwarantowało uwzględnienie ewentualnych różnic spektralnych pomiędzy kolejnymi zdjęciami, (czyli fragmentami ortomozaiki) oraz naturalnych różnic przyrodniczych pomiędzy drzewostanami (rys. 1).



Rys. 1. Rozmieszczenie drzew sosny, zinventaryzowanych w terenie, na czterech powierzchniach badawczych, na tle ortomozaiki (kompozycja w barwach naturalnych RGB)

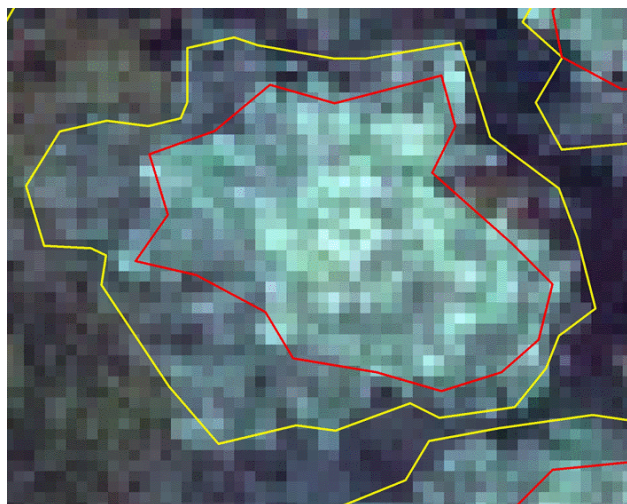
¹ Zestaw kamer był identyczny do tego, jaki zastosowała Zmarz (2011).

Podczas prac terenowych dla 56 drzew pomierzono w terenie wielkość rzutu poziomego korony oraz pierśnicę (grubość pnia na wysokości 1.3 m). Pomiar rzutu poziomego wykonany został w sposób uproszczony, przedstawiony na rys. 2. Pomiary średnicy korony i średnicy pnia wykonane zostały w dwóch kierunkach: N-S i E-W. Ich wartości średnie zastosowano w dalszych analizach.



Rys. 2. Sposób pomiaru pierśnicy i rzutu poziomego korony sosny

Ortomozaiki wykorzystano do zwektoryzowania (wykreślenia zasięgów) koron sosen, które uprzednio były zinwentaryzowane w terenie. Wektoryzację wykonano w dwóch wariantach (rys. 3), rejestrując zasięgi koron zwartych, tj. bez pojedynczych „odstających” gałęzi oraz całych koron.

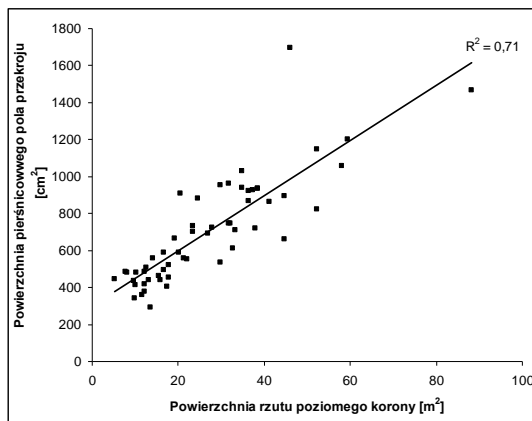


Rys. 3. Wektoryzacja zasięgu korony sosny na ortomozaice: korona zwarta (czerwona linia) i cała korona (żółta linia)

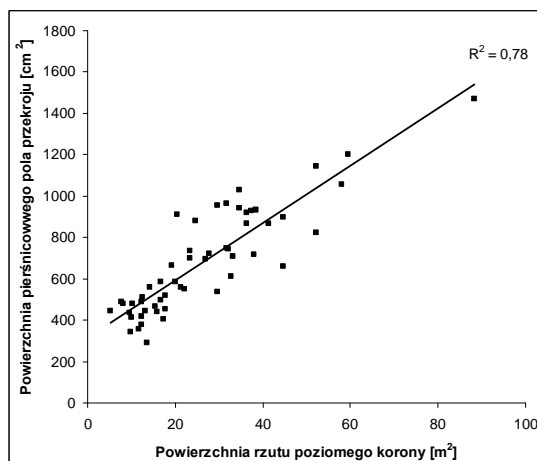
3. WYNIKI

3.1. ANALIZA ZASIĘGÓW KORON DRZEW

W pierwszej kolejności przetestowano siłę związku pomiędzy cechami pojedynczych drzew zmierzonymi w terenie. Należy zwrócić uwagę na to, że w terenie wykorzystana została bardzo szybka, przez co niezbyt dokładna, metoda pomiaru powierzchni rzutu poziomego korony. Korelacja pomiędzy pierśnicowym polem przekroju (powierzchnią przekroju drzewa na wysokości 1.3 m), a powierzchniami rzutów poziomymi ich koron wykazała jednakże wysokie wartości wskaźnika determinacji $R^2 = 0.71$ i $R^2 = 0.78$. W pierwszej analizie (rys. 4) wykorzystano wszystkie drzewa, a w drugiej (rys. 5), odrzucono 1 drzewo odbiegające, pod względem charakteryzujących je wielkości, od pozostałych. Drzewem tym była sosna rosnąca na skraju drzewostanu, w warunkach małej konkurencji międzyosobniczej.

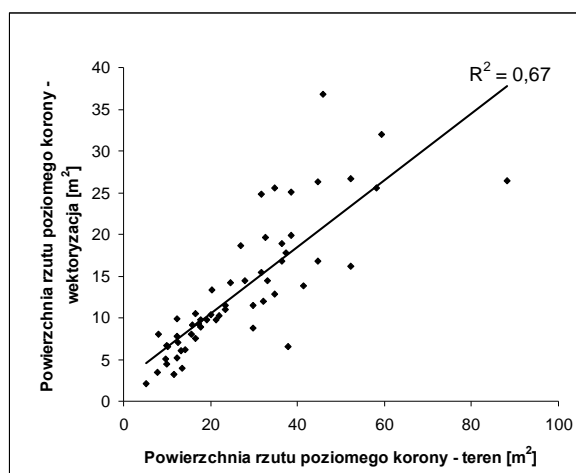


Rys. 4. Zależność pomiędzy cechami dendrometrycznymi drzew określonymi na podstawie pomiarów w terenie - powierzchnią rzutu poziomego korony i pierśnicowym polem przekroju (56 drzew)

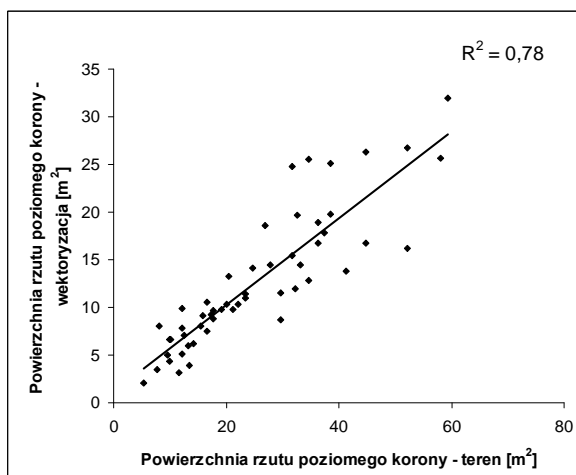


Rys. 5. Zależność pomiędzy cechami dendrometrycznymi drzew określonymi na podstawie pomiarów w terenie - powierzchnią rzutu poziomego korony i pierśnicowym polem przekroju (55 drzew)

W kolejnym etapie sprawdzono zależności pomiędzy powierzchnią rzutu poziomego korony określonym w terenie i obliczonym na podstawie wyników wektoryzacji na ortomozaice. Uzyskany współczynnik determinacji dla wszystkich drzew wyniósł 0.67 dla całych koron (rys. 6). Po odrzuceniu trzech skrajnych wyników (rys. 7) zaobserwowano wzrost wartości współczynników determinacji dla całych koron drzew do wartości 0.78. Odrzucono drzewa posiadające dużą liczbą gałęzi w dolnej partii koron, przez co te fragmenty koron nie zostały uwzględnione w określaniu całego zasięgu koron (2 przypadki). Ponadto odrzucono drzewo rosnące poza zwartym drzewostanem, gdyż jego warunki wzrostu znacznie odbiegały od tych, jakie panują w drzewostanie.



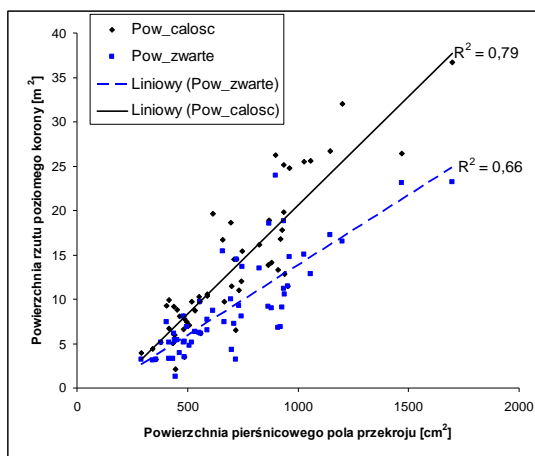
Rys. 6. Zależność pomiędzy powierzchnią rzutu poziomego całych koron określoną w terenie i obliczoną dla koron wektoryzowanych na ortomozaice (56 drzew)



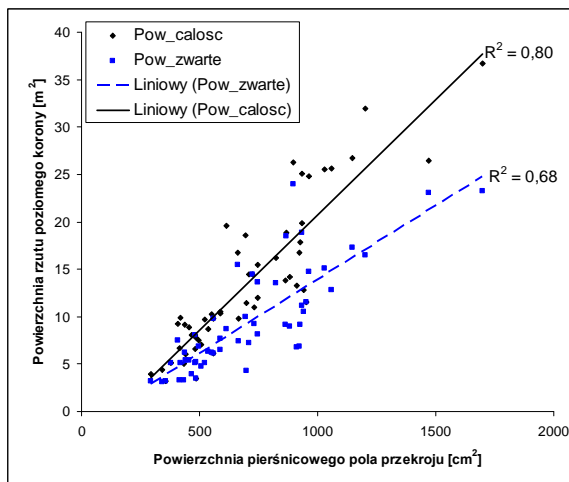
Rys. 7. Zależność pomiędzy powierzchnią rzutu poziomego całych koron, określoną w terenie i obliczoną dla koron wektoryzowanych na ortomozaice (53 drzewa)

3.2. ANALIZA PIERŚNICOWEGO POŁA PRZEKROJU

Ostatnim etapem analiz rzutów poziomych koron było porównanie wyników wektoryzacji z pomiarem powierzchni pierścnicowego pola przekroju w terenie (rys. 8 i 9). Dla wszystkich drzew współczynnik determinacji R^2 miał wartości: 0.79 i 0.66, odpowiednio dla całych koron i zwartych ich części. Zależność między pierścnicowym polem przekroju pnia i polem powierzchni całej korony zdigitalizowanej na ortofotomapie, była wyższa niż dla pierścnicowego pola przekroju pnia i polem powierzchni rzutu poziomego koron zmierzonych w terenie, nawet po usunięciu skrajnych (odstających) spostrzeżeń.



Rys. 8. Zależność pomiędzy pierścnicowym polem przekroju, a powierzchnią rzutu poziomego korony obliczoną na podstawie wyników wektoryzacji (56 drzew)



Rys. 9. Zależność pomiędzy pierścnicowym polem przekroju, a powierzchnią rzutu poziomego korony obliczoną na podstawie wyników wektoryzacji (52 drzewa)

Wartość współczynnika determinacji R^2 wzrosła po usunięciu ze zbioru dwóch skrajnych wartości (wielkość wektoryzowanej korony wskazywała na bardzo zredukowaną jej powierzchnię w stosunku do pierśnicowego pola przekroju – co było wynikiem problemów z interpretacją zasięgu koron drzew na zdjęciach) i wyniosła odpowiednio: dla całych koron – 0,80, a dla zwartych części koron – 0,68.

4. DYSKUSJA WYNIKÓW

Ważnym wynikiem analizy jest wskazanie na silny związek pola powierzchni rzutu poziomego korony drzewa, zmierzonego na ortomozaice, z polem przekroju pierśnicowego. Uzyskana w wyniku wektoryzacji powierzchnia rzutu poziomego koron była lepiej skorelowana z pierśnicowym polem przekroju dla całych koron, niż z wynikiem pomiaru terenowego. Cechy te są ze sobą silnie związane, a pomiar terenowy zasięgów koron, na skutek jego uproszczenia, dał mało dokładne wyniki. Ponadto wykazane zostały wysokie właściwości geometryczne obrazów wykonanych z niskiego pułapu. Uzyskane wyniki są podobne np. do wielkości określonych w badaniach rosyjskich. Suchich *et al.* (1977) dla 90-letniego drzewostanu sosnowego podają korelację między średnicą korony i pierśnicą pnia na poziomie $r = 0.7 \div 0.9$. Hildebrandt (1996) siłę tego związku, dla lasów niemieckich w niekorzystnych warunkach określa na $r \leq 0.5$, a w korzystnych $r > 0.8$. Akça *et al.* (1984) dla drzewostanu świerkowego podają natomiast $r = 0.83 \div 0.84$.

Różnice pomiędzy wariantem koron całych i „zwartych” wynikają z różnic w interpretacji zasięgu koron drzew. W wariacie korona „zwarta” obserwator wziął pod uwagę świetlistą część korony, najwyższą jej część, przez co kształt i powierzchnia uzyskanych w wyniku tego poligonów była zgeneralizowana. W wariacie koron całych wykorzystano możliwości posiadanych zdjęć bezcieniowych i dodatkowo analizowano przestrzenie pomiędzy koronami drzew. Dzięki temu otrzymano kształty i powierzchnię koron bardziej zbliżone do rzeczywistych.

Pomiar terenowy jest operacją pracochłonną, nawet dla tak prostej metody, jaką zastosowano w niniejszym projekcie. Niekiedy zastosowanie nawet tak uproszczonego wariantu pomiaru może być niemożliwe, np. w przypadku obecności w drzewostanie silnie rozwiniętego podszytu lub 2 piętra drzewostanu. Pomiar fotogrametryczny na ortomozaice, jest natomiast, jak wykazano, dokładny i mało pracochłonny. Ustalone zależności mogą być wykorzystane w inwentaryzacji drzewostanów. Szczególnie przydatne może to być w warunkach wstępnej analizy wielkości masy drewna, jaka pozostała na obszarach dotkniętych kłeskami. Są to z reguły tereny trudnodostępne, z dużą liczbą leżących drzew, do których bezpieczne dotarcie może być możliwe dopiero po długim czasie od zaistnienia kłeski. Wstępna analiza pozwala na dość szybkie zorientowanie się w wielkości zniszczeń i szacowaniu strat. Ponadto analiza pojedynczych drzew w zaproponowany w pracy sposób może pomóc w zdalnej inwentaryzacji drzew położonych na terenach trudnych do inwentaryzacji naziemnej – strome bądź niebezpieczne stoki, tereny podmokłe itp.

5. ADNOTACJA

W pracy wykorzystano zdjęcia wykonane podczas realizacji projektu 505-10-03260052, p.t. Ocena stanu zdrowotnego drzewostanów sosnowych na podstawie

niemetrycznych wielospektralnych zdjęć cyfrowych uzyskanych za pomocą bezzałogowego statku latającego, wyłonionego w 2011 r. w SGGW w Warszawie w ramach wewnętrznego trybu konkursowego.

6. LITERATURA

Akça A., Hildebrandt G., Huss J., Kenneweg H., Peerenboom H.G., Rhody B., 1984. Luftbildmessung und Fernerkundung in der Forstwirtschaft. Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe.

Gieruszyński T., 1948. *Zastosowanie fotogrametrii przy urządzaniu gospodarstw leśnych*. Instytut Badawczy Leśnictwa. Wydawnictwa Pomocnicze i Techniczno-Gospodarcze. Seria B, Nr 16.

Hildebrandt G., 1996. *Fernerkundung und Luftbildmessung für Forstwirtschaft, Vegetationskartierung und Landschaftsökologie*. Herbert Wichmann Verlag. Hüthig GmbH, Heidelberg.

Mosaic Mill 2012. MosaicMill Oy, Finlandia <http://www.ensomosaic.com/index.html> (dostęp. 18.09.2012).

Piekarski E., 2000. *Podstawy fotogrametrii i fotointerpretacji leśnej*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.

Przywara J., 2012. Inwazja dronów. *Geodeta* 10(209): 10-15.

Rudziński K., 1964. *Fotogrametria w leśnictwie*. PWRiL Warszawa.

Suchich W.I., Gusiew N.N., Daniulis E.P.M., 1977. *Aerometody w lesoustrojstwie*. Izdatielstwo Lesnaja Promyslennost, Moskwa.

Zmarz A. 2011. *Zastosowanie bezzałogowych statków latających do pozyskania danych obrazowych o lesie*. Rozprawa doktorska, Katedra Urządzenia Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa, Wydział Leśny SGGW w Warszawie.

EVALUATION OF THE ORTHO-MOSAIC OBTAINED BY UNMANNED AERIAL VEHICLE TO DETERMINE SELECTED DENDROMETRIC VARIABLES OF TREES IN PINE STANDS

KEY WORDS: forestry, non metric image, taxation traits

Summary

Multispectral images, acquired by digital non metric Sigma DP2 cameras, which were carried by Unmanned Aerial Vehicle - AVI-1 were used to produce orthoimages with 0.15 m ground resolution. Pictures were taken on 17 October 2011. Basing on them selected dendrometric characteristics of single scotch pine trees and their location were determined. Through field measurements both breast height diameters of tree's stems and crowns extends were established. These data were compared with crowns extends determined basing on crowns shapes digitized manually on orthoimages. Individual trees dendrometric characteristics were compared with crown width digitized on orthomosaic. Relationship between the characteristics of individual trees and crown segments obtained high values of determination up to $R^2=0,8$. The results are satisfactory for forestry purposes in order to acquire accurate and fast information about wood volume. UAV images may be used to analyse effects of damage factors acting on small areas also.

Dane autorów:

Dr inż. Krzysztof Stereńczak
e-mail: Krzysztof.Sterenczak@wl.sggw.pl
telefon: 22 593 82 17
fax: 22 593 82 07

Dr hab. inż. Krzysztof Będkowski, prof. SGGW
e-mail: Krzysztof.Bedkowski@wl.sggw.pl
telefon: 22 593 82 22
fax: 22 593 82 07