

**JACEK BOROWSKI<sup>1</sup>, MAŁGORZATA PSTRĄGOWSKA<sup>1</sup>,  
PIOTR SIKORSKI<sup>1</sup>, JAN ORZECZOWSKI<sup>2</sup>,  
JERZY MAKOWSKI<sup>2</sup>**

**Wyniki badań nad fotograficzną metodą pomiaru  
przyrostów drzew  
z zastosowaniem komputerowego programu DENDRO\***

Investigation results of the photographic method of tree increment  
evaluation using computer program DENDRO\*

<sup>1</sup>Katedra Ochrony Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego,  
ul. Nowoursynowska 166, 02-787 Warszawa

<sup>2</sup>Wydział Mechatroniki, Politechnika Warszawska,  
ul. św. A. Boboli 8, 02-525 Warszawa

<sup>1</sup>Department of Environmental Protection, Warsaw Agricultural University – SGGW,  
Nowoursynowska street 166, 02-787 Warsaw, Poland  
e-mail: borowski@alpha.sggw.waw.pl

<sup>2</sup>Mechatronics Division, Warsaw University of Technology,  
Saint A. Bobola Str. 8, 02-525 Warsaw, Poland

**ABSTRACT:** The photographic method of tree increment evaluation is based on comparison and analysis of tree images, taken from the same standpoint in a specific period of time. The result is an assessment of tree crown growth and size of trees. Images were processed with DENDRO. The article describes consecutive steps from taking pictures to obtaining final results. It defines also causes of errors on the basis of analysis of tree images taken in a series of shots. The deviation from azimuth in position of measuring instruments and setting of the camera flash do not considerably influence the results of the measurements. The greatest errors appear due to changes in the distance between the tree and the measuring instruments (stage of picture taking) and the variation in crown outline (stage of photo processing).

**Key words:** terrestrial photography, tree measurement, tree increment

---

\*Praca finansowana przez Ministerstwo Nauki i Informatyzacji w ramach projektu badawczego No 3P04G 05324.

\*This study was supported by the Ministry of Scientific Research and Information Technology – research project No 3P04G 05324.

## Wstęp

Nowoczesne technologie pozwalają na tworzenie nowych metod pomiarowych. Dąży się do tego, aby były dokładniejsze, tańsze, mniej czasochłonne, dawały możliwość powszechnego wykorzystania i przeprowadzania dużej liczby prób. Zastosowanie nowych rozwiązań daje możliwości innego spojrzenia na badany problem i oceniania go na podstawie parametrów, których wcześniej nie dawało się zmierzyć.

Stworzenie fotograficznej metody pomiaru przyrostów drzew ma na celu szybki i prosty sposób rejestracji i analizy danych, umożliwiający przebadanie dużej liczby drzew. Ważne jest, aby metoda pozwalała wyciągać wnioski dotyczące rozwoju drzew. Jej opracowanie związane było z poszukiwaniem syntetycznego sposobu porównania wzrostu drzew rosnących w odmiennych warunkach siedliskowych. Do sprawnego przeprowadzenia analiz został stworzony program komputerowy DENDRO, który w pełni wykorzystuje atuty, jakie daje cyfrowy zapis obrazu.

Fotografia jest obecnie bardzo chętnie wykorzystywaną metodą badawczą, przede wszystkim z powodu dużych możliwości, jakie stwarza przy opracowywaniu danych. Ponadto rejestruje obraz w sposób szybki i precyzyjny. Fotografia w przejrzysty sposób uwidacznia zmiany zachodzące w czasie, dlatego fotomonitoring znajduje zastosowanie w badaniach nad dynamiką sezonową zbiorowisk leśnych, procesami sukcesji i regeneracji, a także degradacji zbiorowisk roślinnych (Koop 1989, Faliński 2001, Hall 2002). Zdjęcia wykonywane „ku górze” służą analizie sklepienia lasu, umożliwiają ocenę zwarcia, prześwitów i otwarć, a także zmiany w pokroju koron (Englund et al. 1999, Faliński 2001). Przekształcanie zdjęć, na przykład w dwubarwną grafikę, umożliwia uproszczenie analizy danych (Silbernagel, Moeur 2001). Fotografie okapu lasu mogą również służyć ocenie rozwoju pojedynczych drzew dzięki możliwości uchwycenia zarysu ich koron (Brown et al. 2000). Wykorzystanie fotografii poziomych umożliwia uzyskanie obrazu pionowego profilu lasu, który przedstawia na przykład rozkład gęstości ulistnienia jego sklepienia (Koike 1985), lub precyzyjniejsze opisanie złożonych struktur roślinnych (Marsden et al. 2002).

Do fotograficznego pomiaru pojedynczych drzew wykorzystuje się różne rozwiązania techniczne. W zależności od celu badań, mogą to być szacunkowe ale szybkie metody pomiarowe, których celem jest uzyskanie przybliżonej wartości wysokości i pierśnicy (Clark et al. 1999, Clark et al. 2000), bardziej skomplikowane, służące wyliczeniu wysokości, powierzchni i objętości korony na podstawie wyskalowanych zdjęć, uzyskanych z dwóch kierunków wzajemnie do siebie prostopadłych (Pyysalo 2004), bądź precyzyjne, ale czasochłonne, gdzie wyznacza się współrzędne drzewa w przestrzeni na przykład przy użyciu kamery stereometrycznej (Olenderek 1992).

Istnieją również wcześniejsze warianty fotograficznej metody pomiaru przyrostów drzew. Umożliwiały one określenie przyrostu długości pędów

obwodowych korony oraz przyrostu powierzchni jej rzutu pionowego (Borowski et al. 2004, Rylke 2004).

Celem pracy jest zaprezentowanie fotograficznej metody pomiaru przyrostów drzew i wstępna ocena błędów powstających przy jej stosowaniu.

## **Fotograficzna metoda pomiaru przyrostu drzew**

Fotograficzna metoda pomiaru przyrostu drzew została stworzona dla potrzeb badania przyrostów pojedynczych drzew, rosnących w środowisku silnie zurbanizowanym – w Warszawie i zblizonym do naturalnego – na skraju Lasu Kabackiego i Puszczy Kampinoskiej. Do porównania wzrostu drzew wykorzystuje się zdjęcia wykonane przed rozpoczęciem i po zakończeniu przez nie cyklu wegetacyjnego.

Drzewa fotografuje się w stanie bezlistnym, nocą, przy silnym oświetleniu lampą błyskową, co powoduje wyraźne oddzielenie drzew od tła fotografii. Następnie fotografie analizuje się przy pomocy programu komputerowego, który umożliwi określenie takich parametrów jak: wysokość drzewa i korony, szerokość korony, powierzchnia przekroju i jej objętość, a także wypełnienie, czyli widoczną powierzchnię gałęzi w danym rzucie i sumę ich długości<sup>1</sup>. Można również mierzyć wielkości zmian wymienionych parametrów w stosunku do ich wartości z roku ubiegłego. Roczny przyrost parametrów wyrażony jest w procentach.

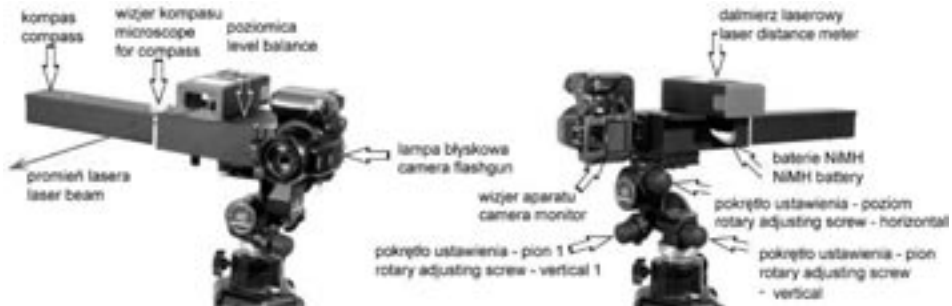
### **Terminy wykonywania zdjęć**

Ze względu na długi w polskim klimacie okres spoczynku drzew, zdjęcia mogą być wykonywane przez cały okres zimy i wczesną wiosną. Te drzewa, których owocostany pozostają do wiosny, powinny być fotografowane jak najpóźniej, kiedy owoce już opadną. W praktyce zdjęcia wykonuje się w rocznych odstępach czasu, wczesną wiosną. Zdjęcie zrobione w danym sezonie wegetacyjnym jest jednocześnie zdjęciem porównawczym dla sezonu następnego.

### **Wyposażenie**

Do wykonania zdjęć w terenie wykorzystuje się cyfrowy aparat fotograficzny (Fuji Fine Pix 6200), statyw z poziomicą, urządzenie pozycjonujące (dalmierz laserowy Bosch DLE 150 i kompas), lampę błyskową o dużej mocy (Metz Mecablitz 60 ct.) zsynchronizowaną poprzez czujnik optyczny z lampą błyskową aparatu. W skład zestawu wchodzi ponadto: lampa pomocnicza do oświetlenia drzewa podczas ustawiania ostrości, tyczka ze skalą oraz tablica z oznaczeniem umożliwiającym identyfikację drzewa. Ponieważ na kompas magnetyczny oddziałuje pole elektromagnetyczne wytwarzane przez aparat cyfrowy i dalmierz, jest on umieszczony na oddalonym od tych urządzeń ramieniu wykonanym z

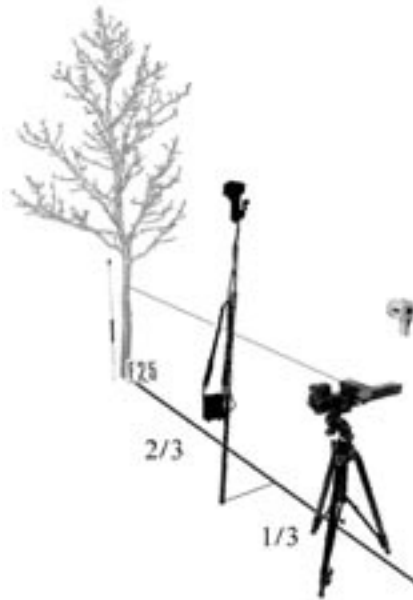
materiału niemagnetycznego. Statyw umożliwia sprawne poziomowanie aparatu i urządzenia pozycjonującego. Libella statywu określa jednocześnie poziom dla wszystkich urządzeń. Wszystkie wymienione elementy tworzą razem przyrząd pomiarowy (ryc. 1). Lampa błyskowa zamontowana jest na teleskopowej tyczce, aby umożliwić oświetlenie całego drzewa. Tyczka używana do skalowania jest biało-czarna i matowa, aby nie odbijała światła, nie zawiera dodatkowych podziałów poza przyjętą, metrową skalą.



Ryc. 1. Przyrząd pomiarowy – aparat fotograficzny z urządzeniami pozycjonującymi  
 Fig. 1. Measuring instrument – camera with positioning equipment

### Wybór pozycji, ustawienie przyrządu pomiarowego i narzędzi pomocniczych

Wykonując zdjęcie w pierwszym sezonie wegetacyjnym należy znaleźć taką pozycję, przy której korona fotografowanego drzewa nie będzie przysłaniana przez korony sąsiednich drzew ani inne obiekty (słupy, latarnie, budynki). Należy również zwrócić uwagę na tło fotografii, aby w obrysie korony nie znajdowały się obiekty jasne lub mogące ulec rozświetleniu. Trzeba przewidzieć przyszłe rozmiary rozwijającej się korony. Musi to być pozycja, przy której drzewo zmieści się w kadrze i wypełni go przy najkrótszej ogniskowej. Kolejne zdjęcia wykonywane są przy tej samej ogniskowej, w wyjątkowych tylko przypadkach, w miarę przyrostu drzewa ogniskowa może być wydłużana za pomocą „zoomu”, co umożliwi zdjęcia ze stałej pozycji. Zdjęcie wykonuje się pod kątem w stosunku do płaszczyzny ziemi, jednak wcześniej aparat musi zostać wypoziomowany, aby umożliwić precyzyjne ustalenie pozycji. Definiuje się ją odległością między aparatem a drzewem mierzoną za pomocą dalmierza laserowego wycelowanego w pień i azymutem kompasowym. Ze względu na pokrój drzew, których korony zwykle charakteryzują się większą wysokością niż szerokością, kadrowanie jest pionowe. Lampa błyskowa ustawiana była po lewej stronie statywu, w 2/3 odległości między nim a drzewem. Tyczkę ze skalą ustawiano przy pniu drzewa, a u jego podstawy tablicę identyfikacyjną (ryc. 2). Przy wykonywaniu zdjęć zastosowano przysłonę 2,8 i czas naświetlania równy 1/60 s. Ostrość obrazu



Ryc. 2. Ustawienie przyrządu pomiarowego i narzędzi pomocniczych  
 Fig.2. Setting of a measuring instrument and auxiliary tools

ustawiano w trybie automatycznym. Zdjęcie zapisywane było w formacie JPEG z rozdzielczością 1280×960 pikseli. Stosunkowo niska rozdzielczość wynika z chęci uproszczenia zapisu obrazu, ułatwia to dalsze – i tak skomplikowane – przetwarzanie komputerowe.

### Wykonanie zdjęcia

Podczas wykonywania zdjęcia dalmierz laserowy jest wycelowany w centralną partię drzewa. Ponieważ zdjęcia wykonuje się nocą, należy, w miarę potrzeby, oświetlić drzewo lampą pomocniczą, aby sprawdzić jego położenie w kadrze, a także oświetlić koronę podczas ustawiania ostrości. Lampa błyskowa powinna być także wycelowana na połowę wysokości drzewa, aby światło rozprasało się możliwie równomiernie, oświetlając zarówno pędy wierzchołkowe jak i dolne gałęzie korony oraz pień (ryc. 3).

### Komputerowe opracowanie i analiza fotografii

Każde wykonane zdjęcie opatrzone jest datą, danymi dotyczącymi lokalizacji obiektu i orientacji przyrządu pomiarowego, oraz wprowadzone jest w stały układ współrzędnych. Wymiary drzewa określone są na podstawie współrzędnych punktów oznaczanych na fotografii. Aby uzyskać wartości pomiarów w jednostkach metrycznych zdjęcie należy precyzyjnie wyskalować, oznaczając punkty krańcowe



Ryc. 3. Fotografie nocne pięciu przykładowych drzew  
 pierwszy rząd od góry: rok 2003, drugi – 2004, trzeci – 2005

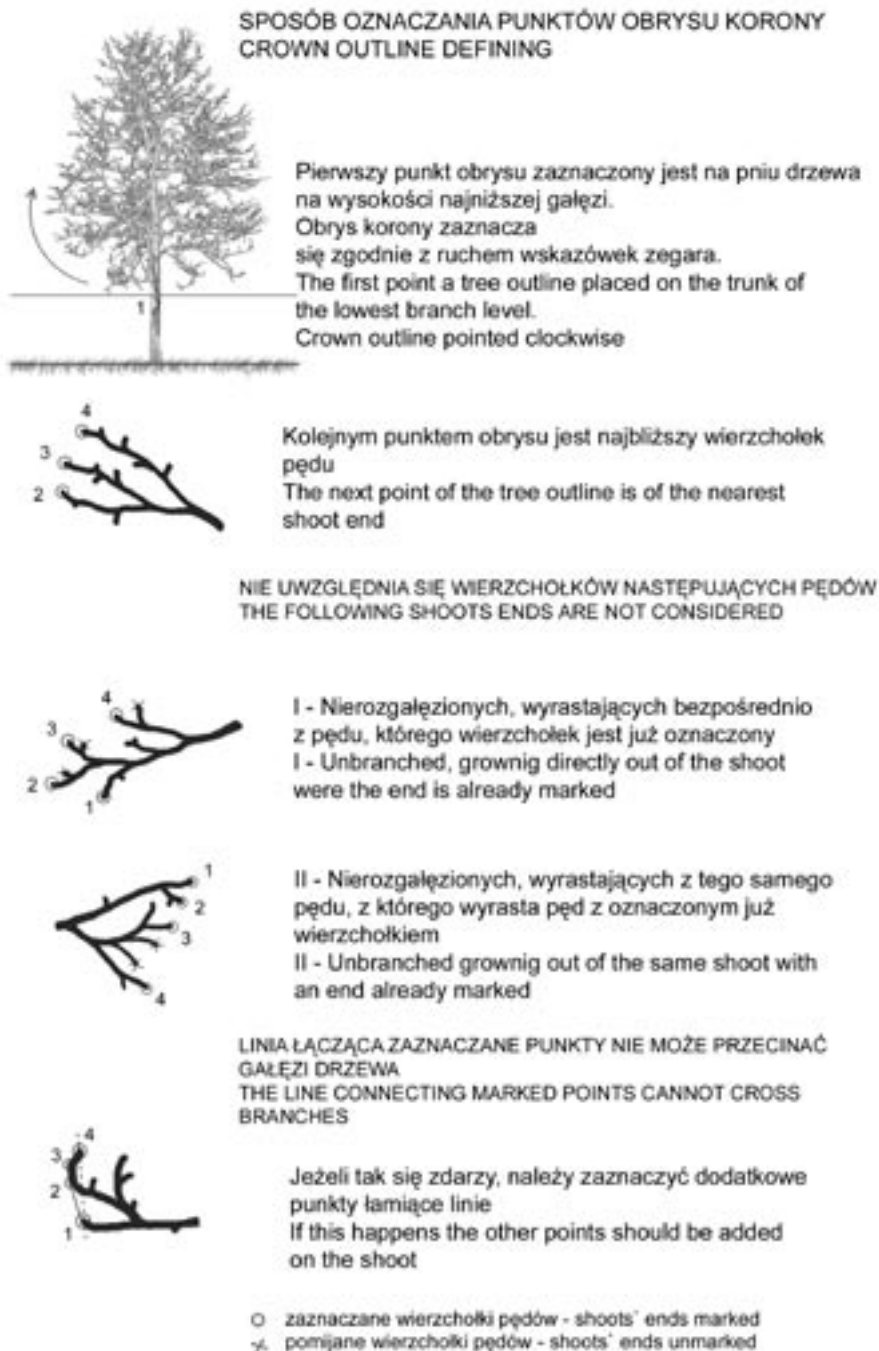
Fig. 3. Night pictures of five tree specimens:

first line from above – 2003, second – 2004, third – 2005

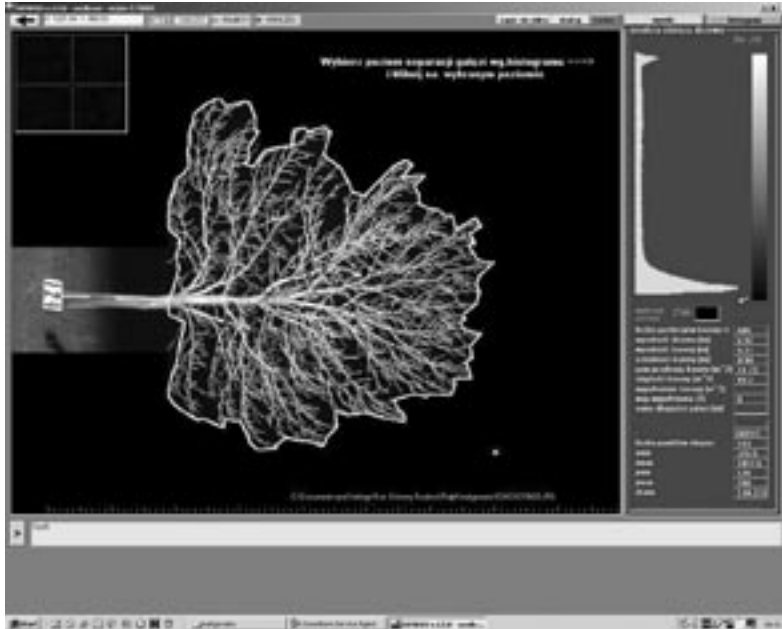
wzorca metra na widocznej na zdjęciu tyczce. Następnie oznacza się podstawę pnia drzewa i kolejne punkty obrysu korony. Sformułowaliśmy precyzyjne zasady wyboru punktów, konieczne do jednoznacznego, powtarzalnego sposobu obrysowywania korony. Zastosowanie tych zasad umożliwi ograniczenie liczby punktów załamania obrysu i w efekcie jego uproszczenie, co zmniejsza stopień komplikacji programu komputerowego (ryc. 4).

Po zamknięciu obrysu korony program rozpoczyna automatyczną analizę wskazanego obrazu, w wyniku której obliczane są następujące parametry: wysokość drzewa, wysokość i szerokość korony, powierzchnia rzutu pionowego korony; wyznaczone zostają osie obrotu dla teoretycznej bryły utworzonej na podstawie obrysu korony. Obliczona zostaje jej objętość.

Możliwość oddzielenia drzewa z tła fotografii, jaką dają zdjęcia wykonane w nocy (przy sztucznym oświetleniu), pozwala określić powierzchnię rzutu widocznych gałęzi oraz sumę ich długości. Wydzielenie oświetlonej powierzchni drzewa z tła następuje po oznaczeniu w pomocniczym, bocznym oknie jasności wybieranych gałęzi (ryc. 5). Histogram w bocznym oknie przedstawia rozkład jasności obrazu w granicach obrysu korony. Należy określić wartość poziomu jasności na tyle niską (obok jasności widocznej w oknie, jest ona również podawana numerycznie), aby obejmowała wszystkie pędy drzewa, ale i na



Ryc. 4. Zasada wyznaczania obrysu korony  
Fig. 4. Crown outline defining



Ryc. 5. Komputerowe opracowanie i analiza fotografii – obraz ekranu, etap separacji gałęzi drzewa z tła fotografii

Fig. 5. Processing and photograph analysis – view of screen, the stage of tree separation from the picture background

tyłe wysoką, aby jako gałęzie nie traktowane były elementy tła. Po oznaczeniu wypełnienia korony program automatycznie rozpoczyna zliczanie sumy długości widocznych gałęzi.

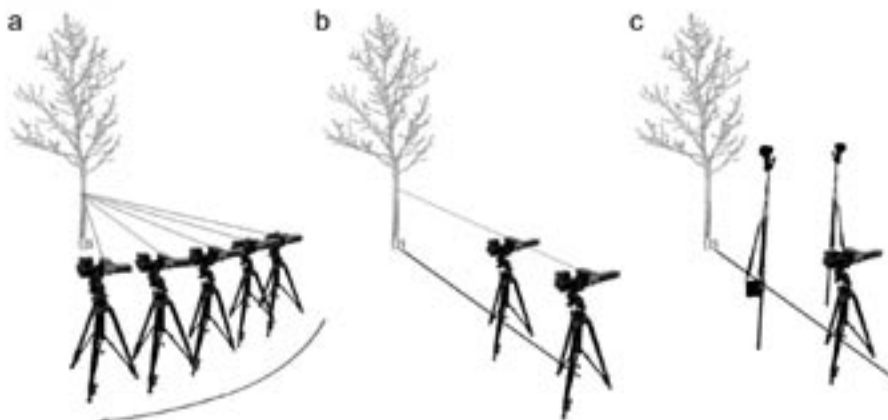
Analiza fotografii prowadzi do otrzymania wyników określających wielkość drzewa w jednostkach metrycznych – z wyjątkiem współczynnika wypełnienia, który jest wyrażonym procentowo stosunkiem powierzchni rzutu gałęzi do powierzchni rzutu korony. Takie opracowanie fotografii umożliwi porównanie zdjęć wykonanych po kolejnych sezonach wegetacyjnych i określanie przyrostu drzew przez obliczenie procentowej różnicy między poszczególnymi, odpowiadającymi sobie parametrami.

### **Metoda oceny błędów**

Na podstawie analizy wydzielonych etapów stosowania fotograficznej metody pomiaru przyrostów drzew określono potencjalne źródła powstawania błędów. Związane są one z koniecznością powtarzania tej samej procedury w odstępach rocznych odstępach. Błędy w wynikach mogą powstawać przy ustawianiu przyrządów podczas badań terenowych oraz w trakcie opracowania fotografii.

Podczas wykonywania zdjęć mogą zaistnieć trudności związane z ustaleniem





Ryc. 6. Ustawienie przyrządu pomiarowego przy badaniach wpływu: zmiany kąta na odczyty parametrów drzewa (a), zmiany odległości na odczyty parametrów drzewa (b), zmiany kierunku oświetlenia na odczyty parametrów drzewa (c)

Fig. 6 Setting of the measuring instrument while testing: the influence of the angle changes on the tree parameters reading (a), the influence of the distance changes on the tree parameters reading (b), the influence of the light direction changes on the tree parameters reading (c)

kierunku wykonania fotografii. Na kompas, za pomocą którego ustawia się kierunek, wpływa nie tylko pole elektromagnetyczne (stałe), wytwarzane przez sprzęty elektroniczne wchodzące w skład urządzenia pomiarowego, ale również inne urządzenia elektroniczne i magnetyczne (choćby w zaparkowanych w pobliżu samochodach) oraz duże przedmioty stalowe (płoty, studzienki kanalizacyjne itp.). Może zatem powstać błąd wynikający z dewiacji kompasu. Kolejnym problemem może stać się szybki rozwój korony drzewa, który spowoduje, że przestanie się ono mieścić w kadrze. Zmusza to do odsunięcia się od pierwotnego stanowiska lub wykluczenia drzewa z dalszych badań. Czasem pojawia się konieczność oświetlenia drzewa z innej strony z powodu zmian, jakie zaszły w sąsiedztwie, gdy np. rozrosły się drzewa rosnące w pobliżu. Z tych względów został przebadany wpływ na wyniki pomiarów następujących czynników: zmiany kierunku wykonywania zdjęcia, zmiany odległości między aparatem fotograficznym a drzewem, zmiany strony oświetlenia przez lampę błyskową.

Wpływ zmiany kierunku fotografowania badano na podstawie zdjęć wykonanych z kilku pozycji, przy azymucie zmienionym o kąt 5, 10, 15, 20° (ryc. 6 a).

Wpływ zmiany odległości ustawienia aparatu badany był na podstawie zdjęć wykonanych z dwóch dystansów – podstawowego oraz równego 2/3 dystansu podstawowego (ryc. 6 b).

Wpływ zmiany oświetlenia badano przez ustawianie lampy błyskowej z lewej oraz prawej strony aparatu (ryc. 6 c).

Badania przeprowadzono w oparciu o 105 zdjęć pięciu drzew o koronie rozbudowanej w różnym stopniu. Zdjęcia wykonywane były z 7 pozycji ustawienia aparatu i lampy, w 3 powtórzeniach. Dla każdego zdjęcia wykonano po trzy odczyty. Nie badano błędów spowodowanych nieprawidłowym ustawieniem tyczki do skalowania, nieprawidłowym ustawieniem aparatu oraz nieprawidłowym ustawieniem ostrości, ponieważ błędy te łatwo zauważyć i od razu dyskwalifikują one zdjęcie. Do badań wybierano drzewa, w których otoczeniu nie było elementów kolidujących z koronami bądź je przysłaniających. Fotografie opracowano za pomocą programu DENDRO. Otrzymane wyniki przeanalizowano metodami statystycznymi i przedstawiono w formie graficznej korzystając z programu STATGRAPHICS. Wskazano przyczyny powstawania największych błędów.

Analiza komputerowa zawiera błędy wynikające z tego, że opracowujący dane zdjęcie musi za każdym razem wskazać na fotografii punkty charakterystyczne. Wyszczególniono błędy wynikające z:

- różnego odczytu skali
- wyboru pędów do oznaczania obrysu korony
- przesunięcia kursora przy oznaczaniu punktów obrysu korony.

Ich łączny wpływ przeanalizowano na podstawie 225 odczytów zdjęć (po 9 dla każdego z 25 ujęć). Dla każdego ujęcia określono procentową różnicę między poszczególnymi odczytami a ich średnią arytmetyczną. Wskazano maksymalne i średnie błędy bezwzględne dla każdego z obliczanych parametrów wielkości drzewa.

Wpływ błędu odczytu skali oceniono na podstawie wielkości średnich i maksymalnych błędów bezwzględnych w odczycie skali. Błąd odczytu wyników pomiarów parametrów drzewa jest wprost proporcjonalny do błędu odczytu skali.

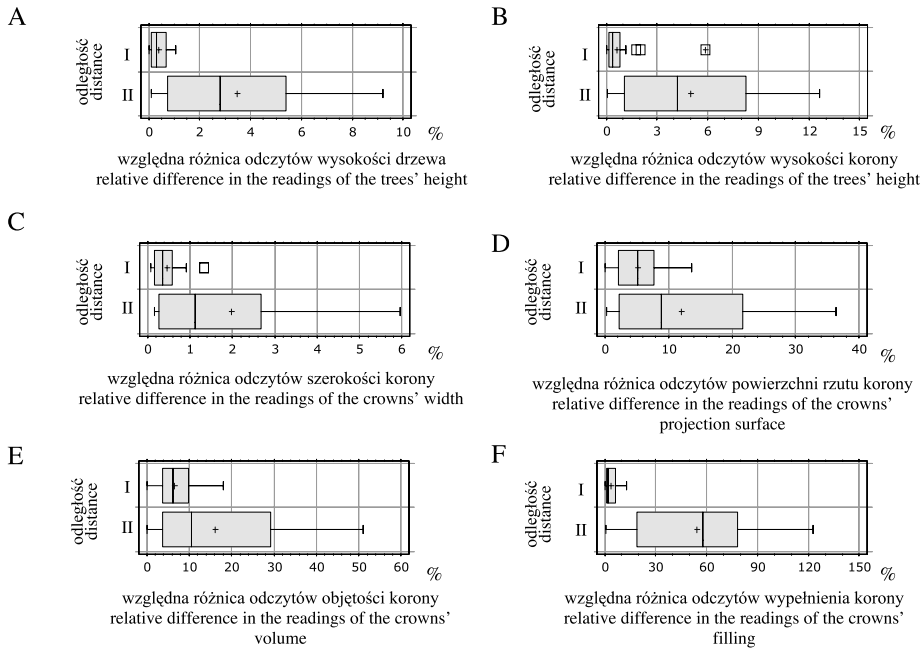
Aby ocenić błąd wynikający z konieczności wyboru pędów podczas oznaczania obrysu korony, opracowywano trzy przykładowe zdjęcia, z których każde analizowane było 10-krotnie w dwóch seriach: pierwszej, gdy obrys korony wykonywano według zasady oznaczania najbliższych wierzchołków pędów, ale każdorazowo wybierano kolejne punkty obrysu, i drugiej – kiedy postępowano również według powyższej zasady, ale z następującą modyfikacją: gdy raz wybrane wierzchołki zostały określone na rysunku pomocniczym, za każdym razem wybierano te same wierzchołki pędów, a różnica w odczytach wynikała z niewielkiego przesunięcia kursora przy wskazywaniu odpowiedniego punktu na zdjęciu. Przy wykonywaniu obydwu serii punkty wzorca skali były jednakowe, zdefiniowane współrzędnymi.

## **Wyniki**

### **Błędy powstające podczas wykonywania zdjęcia**

Analiza statystyczna wyników pomiarów poszczególnych parametrów drzew jako funkcji zmiany pozycji urządzenia pomiarowego wykazała, że największy wpływ na wartość odczytów ma zmiana odległości między aparatem

a fotografowanym drzewem. Różnice w pomiarach parametrów liniowych nie przekraczały 5%, większe różnice występowały przy pomiarach powierzchni rzutu korony (6,8%) oraz objętości korony (9,7%). Szczególnie duże różnice zaistniały między pomiarami wypełnienia korony i wyniosły 50,7% (ryc. 7).

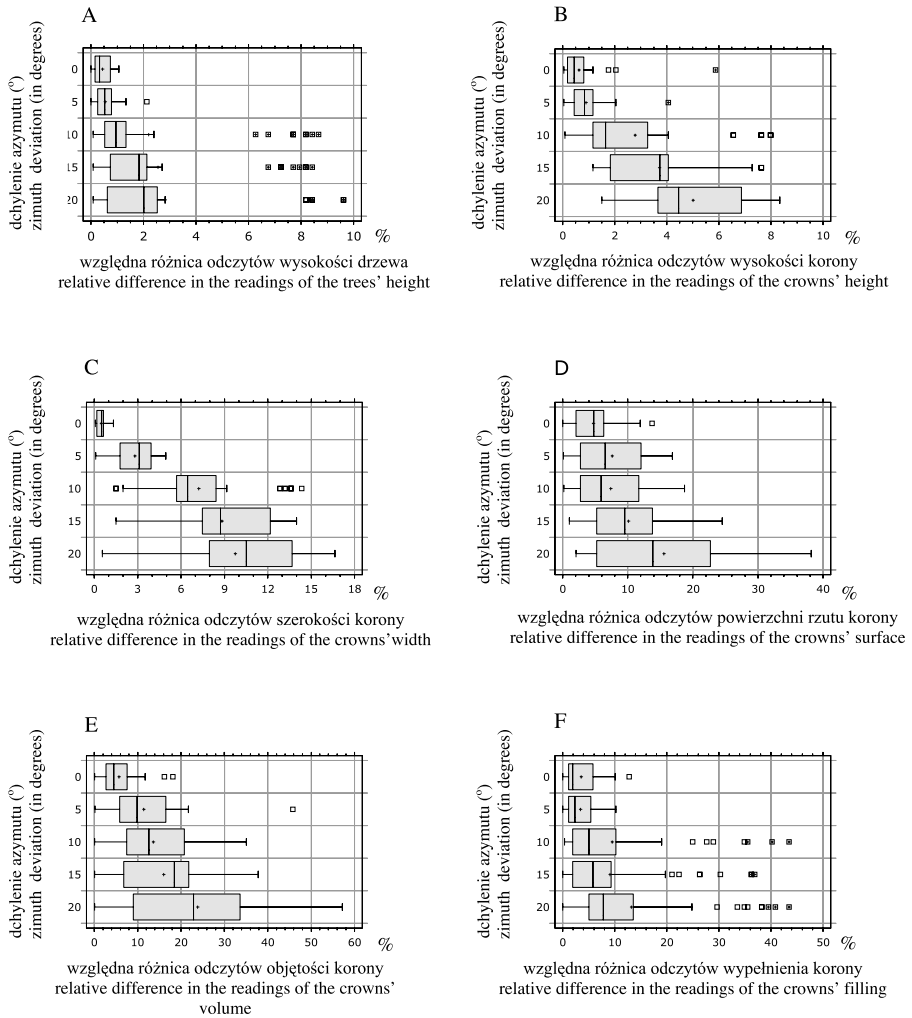


Ryc. 7. Wielkości błędów powstających w skutek zmiany odległości między drzewem a przyrządem pomiarowym. I – odległość prawidłowa, II – odległość zwiększona o 1/3 dystansu  
A – wysokość drzewa, B – wysokość korony, C – szerokość korony, D – powierzchnia rzutu korony, E – objętość korony, F – wypełnienie korony

Fig. 7. Errors due to changes in the distance between the tree and the measuring instrument, I – correct distance, II distance increase by 1/3, A – tree height, B – crown height, C – crown width, D – crown projection surface, E – crown volume, F – crown filling

Zmiana kierunku wykonywania fotografii o  $5^\circ$  nie powodowała istotnych statystycznie różnic w pomiarach wysokości drzewa i wysokości korony oraz jej wypełnienia. Błąd pomiaru szerokości korony wynosił 2,3%, powierzchni przekroju – 2,9%, a objętości – 5,7%. Zwiększenie kąta odchylenia azymutu o 10, 15 lub  $20^\circ$  powodowało wzrost wielkości błędu. Krzywoliniowa analiza regresji wykazała wyraźny przyrost liniowy błędu pomiaru szerokości korony. Przy odchyleniu przyrządu pomiarowego o  $20^\circ$  wynosił on 9,2%. Największym błędem obarczony był pomiar objętości korony i wynosił 18,1% (ryc. 8).

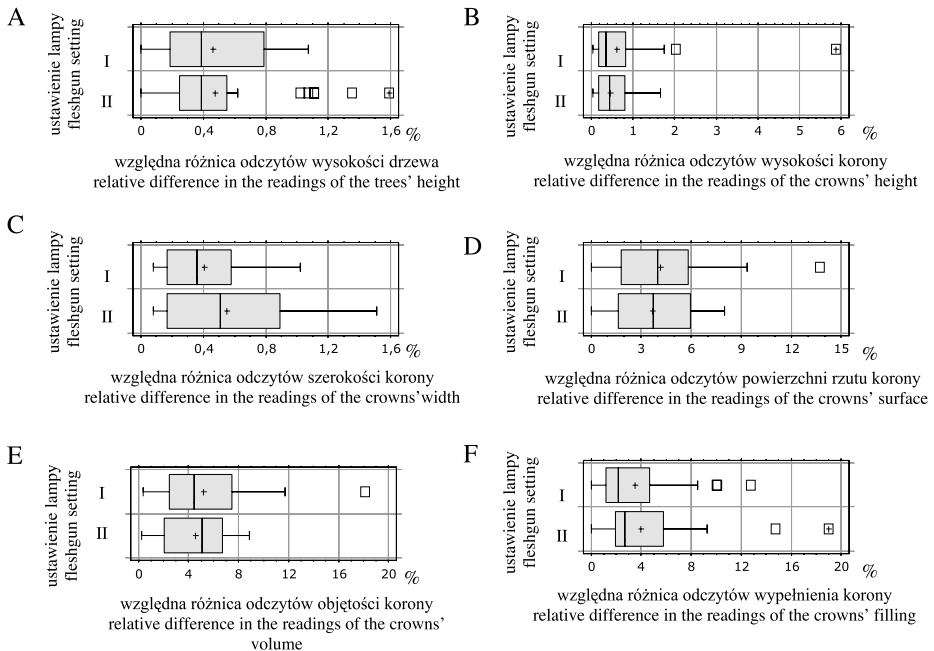
Pomiary drzewa wykonywane przy zmiennym kierunku oświetlenia nie wykazywały różnic istotnych statystycznie (ryc. 9).



Ryc. 8. Wielkości błędów powstających przy zmianie kierunku wykonywania fotografii o kąt 5, 10, 15, 20 stopni. A – wysokość drzewa, B – wysokość korony, C – szerokość korony, D – powierzchnia rzutu korony, E – objętość korony, F – wypełnienie korony  
 Fig. 8. Errors due to changes of the picture taking direction (deviation of azimuth by 5°, 10°, 15°, 20°). A – tree height, B – crown height, C – crown width, D – crown projection surface, E – crown volume, F – crown filling

## Błędy powstające podczas komputerowego opracowania fotografii

Pomiary liniowe, a więc wysokość drzewa, wysokość korony i szerokość korony, są obarczone małym błędem i wynikają z niedokładności w oznaczaniu



Ryc. 9. Wielkości błędów powstających w skutek zmiany kierunku oświetlenia

I – lampa błyskowa z prawej strony, II – lampa błyskowa z lewej strony

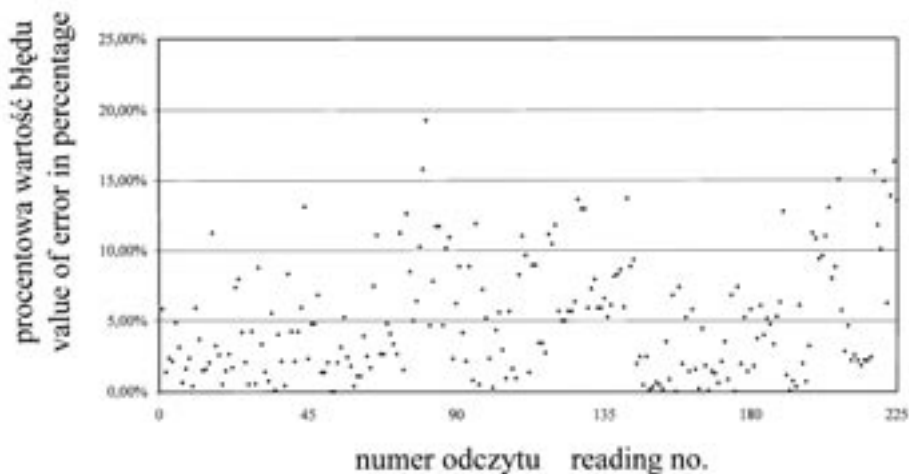
A – wysokość drzewa, B – wysokość korony, C – szerokość korony, D – powierzchnia rzutu korony, E – objętość korony, F – wypełnienie korony

Fig. 9. Errors due to changes of the light direction. I – flashgun on the right, II – flashgun on the left, A – tree height, B – crown height, C – crown width, D – crown projection surface, E – crown volume, F – crown filling

punktów podstawy pnia, wierzchołka drzewa, oraz wierzchołków bocznych pędów korony. Maksymalny błąd wynosił 5,9% i dotyczył pomiaru wysokości korony. Maksymalny błąd w odczycie wysokości drzewa wynosił 1,6%, a błąd w odczycie szerokości korony – 2,0%. Średnie błędy odczytu nie przekraczały 0,5% (tabela 1).

Dużym błędem obarczone są odczyty powierzchni rzutu i objętości korony, co wynika z różnego oznaczania punktów obrysu korony – niejednoznacznego jej określenia bądź nieprecyzyjnego oznaczania wierzchołków pędów. Maksymalny błąd powierzchni rzutu korony wynosił 19,3%, przy średnim błędzie 5,1% (tabela 1, ryc. 10). Dla objętości korony największa różnica wynosiła 34%. W granicy błędu wynoszącej 25% mieściło się 95% odczytów, a średni błąd wynosił 7,1% (tabela 1, ryc. 11).

Błędy w odczycie wypełnienia korony zależą w najwyższym stopniu od wyboru poziomu jasności dla gałęzi drzewa na fotografii. Maksymalny błąd odczytu wynosił 18,0%, przy średnich błędach 3,5% (tabela 1).



Ryc. 10. Błędy bezwzględne pomiaru powierzchni rzutu korony  
Fig. 10. Absolute errors of the crown projection surface measurement



Ryc.11. Błędy bezwzględne pomiaru objętości korony  
Fig.11. Absolute errors of the crown volume measurement

Na wszystkie odczyty ma wpływ różnica w oznaczeniu górnego i dolnego punktu wzorca metra na tyczce, ponieważ na jej podstawie wyliczane są wszystkie badane parametry. Maksymalna różnica skali wynosi 1,3% a średnia – 0,2% (tabela 1).

Tabela 1 – Table 1

Maksymalne i średnie błędy bezwzględne odczytów parametrów powstające podczas opracowania fotografii

Maximum and average absolute errors of the parameter reading while processing photographs

	wysokość drzewa height of a tree	wysokość korony height of a crown	szerokość korony width of a crown	powierzchnia rzutu korony crown projection surface	objętość korony crown volume	wypełnienie korony crown filling	skala scale
maksymalna różnica w odczycie maximum reading's difference	1,6%	5,9%	2,0%	19,3%	34,5%	18,0%	1,3%
średni błąd average error	0,4%	0,4%	0,4%	5,1%	7,1%	3,5%	0,2%

Błędy wynikające z różnic w precyzji oznaczania wierzchołków pędów jako punktów obrysu korony wynosiły: dla parametrów liniowych – średnio 0,2%; dla powierzchni rzutu korony średnio 0,7% oraz dla objętości korony – 0,8%. Były to błędy wielokrotnie mniejsze niż pojawiające się podczas opracowania zdjęć, gdy przebieg obrysu korony drzewa musiał być za każdym razem na nowo określany (tabela 2).

Tabela 2 – Table 2

Średnie i maksymalne błędy odczytów dla różnych sposobów oznaczania punktów obrysu korony  
Maximum and average reading errors for different markings on the crown outline

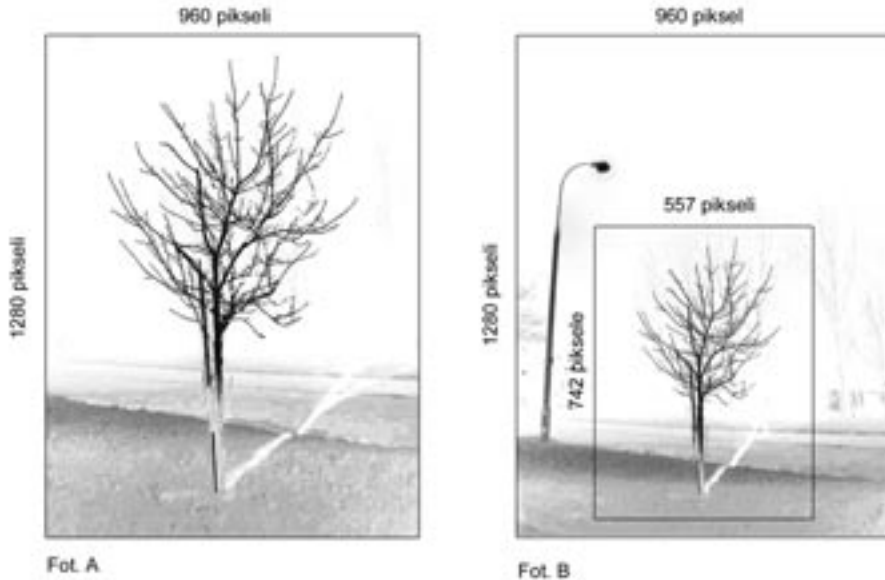
punkty obrysu korony	średni błąd average error		błąd maksymalny maximum error	
	zawsze te same wierzchołki pędów shoots' ends always the same	każdorazowo wybierane wierzchołki pędów shoots' ends chosen every time	zawsze te same wierzchołki pędów shoots' ends always the same	każdorazowo wybierane wierzchołki pędów shoots' ends chosen every time
wysokość drzewa height of a tree	0,2%	0,5%	0,7%	1,6%
wysokość korony height of a crown	0,2%	0,4%	0,4%	1,5%
szerokość korony width of a crown	0,1%	0,5%	0,8%	1,4%
powierzchnia rzutu korony crown projection surface	0,7%	3,6%	2,2%	11,2%
objętość korony crown volume	0,8%	4,4%	2,5%	15,4%

## Dyskusja

Tworząc fotograficzną metodę pomiaru przyrostu drzew założyliśmy, że przyrost rzutu korony drzewa obserwowanego z jednej strony wyraża przyrost całego drzewa. Widok korony z każdej strony jest inny, ale zakładamy, że każdy z nich wyraża te same tendencje, ponieważ swobodnie rosnące drzewo zachowuje symetrię korony (Suski 1986).

Każde zdjęcie, jako dwuwymiarowy zapis struktury przestrzennej, obarczone jest błędem wynikającym ze skrótu perspektywicznego. Płaski obraz drzewa zniekształca zarówno długość pędów jak i kąty między nimi. Najmniej zniekształcony jest obraz pędów rosnących w płaszczyźnie równoległej do płaszczyzny fotografii. Czynnikiem dodatkowo wpływającym na skrót perspektywiczny obrazu jest to, że płaszczyzna fotografii nie jest pionowa. Fotograficzna metoda pomiaru przyrostów drzew w dużym stopniu unika błędów pomiarowych, które wynikają ze zniekształceń powodowanych skrótami perspektywy, ponieważ opiera się na porównywaniu fotografii wykonywanych corocznie z tego samego miejsca (Pyysalo 2004). Zniekształcenia te można traktować jako czynnik stały.

Błąd wynikający ze skrótu perspektywicznego powinien być najbardziej widoczny przy porównywaniu pomiarów opartych o zdjęcia wykonywane z różnych odległości. Jednak zmiana odległości powoduje równoczesne działanie



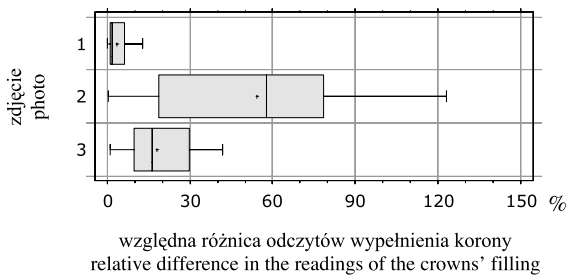
Ryc. 12. Różna rozdzielczość obrazu drzewa na fotografiach wykonywanych z różnej odległości.

Fotografia A – zdjęcie wykonane z bliska; Fotografia B – zdjęcie wykonane z daleka

Fig. 12. Different tree image resolution on photographs taken from various distances

Photo A – picture taken from a short distance; Photo B – picture taken from a far distance





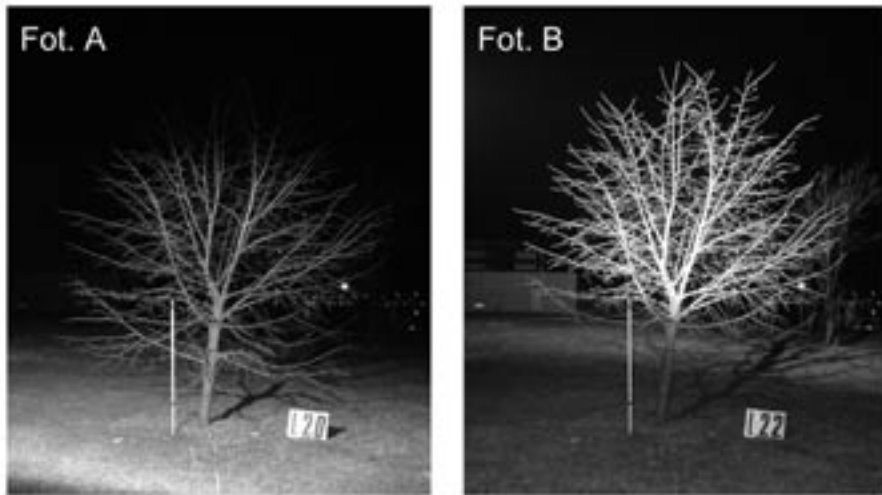
Ryc.13. Wpływ zmiany odległości i rozdzielczości na pomiar wypełnienia korony. 1 – zdjęcie wykonane z bliska, 2 – zdjęcie wykonane z daleka, 3 – zdjęcie wykonane z daleka – skadrowane  
 Fig.13. Influence on the distance and resolution change on the crown filling measurement, 1 – picture taken from a short distance, 2 – picture taken from a far distance, 3 – picture taken from a far distance – framed

dwóch czynników. W miarę oddalenia się obserwatora od drzewa zmienia się kąt, pod jakim ustawiona jest oś obiektywu, co powoduje zmianę wzajemnego układu gałęzi na fotografii, a jednocześnie zmniejsza się rozdzielczość obrazu (ryc. 12), co potęguje błąd. Na podstawie wykonanych analiz nie sposób rozdzielić wpływu obu tych czynników na wynik.

Wpływ rozdzielczości obrazu na otrzymane wyniki jest szczególnie widoczny w przypadku pomiaru wypełnienia korony. Okazuje się jednak, że jeżeli pierwotnie zbyt mały obraz drzewa zwiększymy tak, aby drzewo wypełniało cały kadr (1280×960 pikseli), to otrzymane wyniki są do siebie zbliżone (ryc. 13). Po przeprowadzonych badaniach okazało się, że zdecydowanie największy wpływ na wyniki pomiarów ma zmiana odległości między przyrządem pomiarowym a drzewem. Należy jej unikać, ponieważ w kolejnych latach te same części drzewa odwzorowywane są z coraz mniejszą rozdzielczością.

Zmiana azymutu powoduje, że fotografowany jest nieco inny profil drzewa. Wraz ze zmianą kąta obserwacji zmienia się układ gałęzi względem siebie, co powoduje, że pędy przedstawione są w innym skrócie perspektywicznym i wzajemnie się przysłaniają. W wyniku przeprowadzonych obserwacji stwierdzono jednak, że odchylenie azymutu przyrządu pomiarowego o 5° od pozycji wyjściowej nie powoduje istotnej różnicy w odczytach pomiarów parametrów drzewa.

Bezwzględny warunkiem uzyskania prawidłowego zdjęcia jest prawidłowe oświetlenie. Widoczne powinny być zarówno pędy wierzchołkowe jak i podstawa korony. Zdjęcia, które nie spełniają tego warunku, nie mogą być poddane analizie (ryc. 14 i 15). Zmiana kierunku oświetlenia powoduje powstanie różnic w ocienianiu się pędów. Gałęzie dobrze oświetlone mogą stać się mniej widoczne, a słabo widoczne – wyraźne. Mimo to okazało się, że zmiana kierunku oświetlenia, a więc ustawienie lampy z lewej bądź z prawej strony, nie miała istotnego wpływu na wyniki pomiarów.

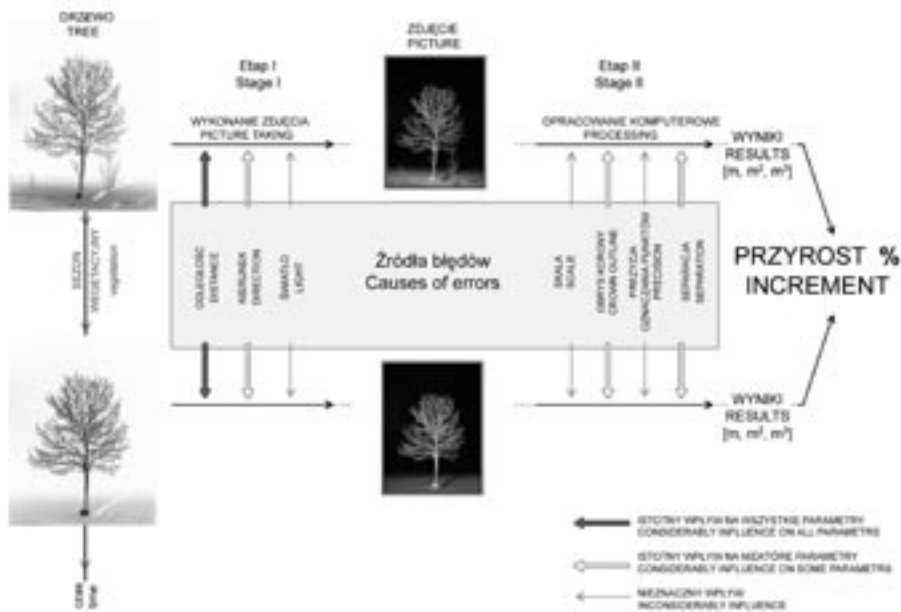


Ryc. 14. Przykłady nieprawidłowo oświetlonego drzewa. Fotografia A – niedoświetlone pędy wierzchołkowe; Fotografia B – niedoświetlona podstawa korony drzewa  
 Fig. 14. Examples of a badly lit tree. Photo A – under-exposed top shoots;  
 Photo B – under-exposed base of a tree crown

Wykonywane zdjęcia muszą być ostre. Rozmywanie się obrazu gałęzi utrudnia identyfikację pędów, a także fałszuje pomiar powierzchni gałęzi (wypełnienia korony). Ustawienie ostrości zdjęcia w nocy wymaga dodatkowego oświetlenia drzewa.

Zdjęcia powinny być wykonywane tak, aby w obrysie korony drzewa nie znajdowały się inne elementy np. gałęzie innych drzew, latarnie, słupy, billboardy itp. Drzewo nie może być nimi przysłonięte. Jeżeli w tle fotografii znajdują się „obce” elementy, zdjęcie można poddać retuszowi przy pomocy dowolnego programu graficznego. Takie działania pozwolą na wykorzystanie posiadanej fotografii, choć bardzo zwiększą pracochłonność jej obróbki. Technika wykonywania zdjęć nocą, gdy oświetlane jest jedynie wybrane drzewo, sprawia, że elementy tła przestają być widoczne. Problem pojawia się wtedy, gdy niepożądane obiekty znajdują się w bliskim sąsiedztwie drzewa i mogą być równocześnie z nim rozświetlone przez lampę błyskową.

Kolejnym warunkiem, umożliwiającym prawidłową analizę fotografii, jest właściwe odczytanie skali. Skala jest podstawowym odniesieniem do wszystkich pomiarów. Tyczka używana do skalowania powinna stać pionowo, w tej samej odległości od przyrządu pomiarowego, w jakiej znajduje się pień drzewa. Błąd powstały na skutek różnego odczytu skali okazał się niewielki: średni dla 225 odczytów wynosił 0,2%, (tabela 1). Wzorzec metra w zależności od odległości wykonywania zdjęcia składał się na badanych fotografiach ze 175 do 220 pikseli. Różnica jednego piksela w oznaczaniu wymiarów na fotografii powoduje błąd odczytu wymiarów liniowych, który wynosi od 0,45 do 0,57 cm na metrze.



Ryc.15. Fotograficzna metoda pomiaru przyrostów drzew – schemat postępowania, źródła powstawania błędów oraz ich wpływ na wyniki pomiaru

Fig.15. Photographic method of tree increment evaluation – procedure, causes of errors

Zazwyczaj punkty końcowe wzorca widoczne są bardzo wyraźnie i oznaczenie ich nie sprawia kłopotów, błąd powstaje wtedy, gdy błysk lampy powoduje rozmycie pola białego tyczki lub gdy ocieniają ją gałęzie drzewa.

Precyzja oznaczania punktów obrysów korony w bardzo małym stopniu wpływa na odczyty parametrów drzewa. Ma większe znaczenie dla pomiarów powierzchni przekroju i objętości korony niż dla wyników pomiarów liniowych. Średnie błędy odczytów nie przekraczają 1,0% (tabela 2).

Określenie granicy korony jest zawsze sprawą umowną, szczególnie, jeżeli wyznaczamy ją dla drzewa nieulistnionego. Obrys korony powinien być określany w taki sposób, aby wyrażał jej specyficzny kształt, był prosty w wykonaniu, a co najważniejsze – jednoznaczny. Powinien umożliwiać obserwację zmian zachodzących w ciągu kolejnych sezonów wegetacyjnych. W przeprowadzonych badaniach stosowano początkowo prostą zasadę oznaczania najbliższych kolejnych wierzchołków pędów. Ten pozornie oczywisty sposób okazał się szczególnie trudny w przypadku drzew, które tworzą liczne krótkopędy, jak na przykład jarzęby. Obrys korony wcinął się często głęboko między gałęzie drzewa, ponadto zastosowana metoda powodowała oznaczanie bardzo dużej liczby punktów. Powodowało to wydłużanie czasu opracowania fotografii i obciążenie programu komputerowego. Dlatego zmodyfikowaliśmy zasadę i sformułowaliśmy reguły, które wykluczały oznaczanie nierozgałęzionych pędów bocznych, przez

co ograniczały liczbę tworzących obrys korony punktów (ryc. 4).

Okazało się, że błędy w pomiarach parametrów drzewa były kilkakrotnie mniejsze, kiedy wyeliminowaliśmy każdorazowy wybór wierzchołków pędów tworzących obrys korony. Stwierdziliśmy, że spośród badanych czynników powodujących powstawanie błędów (precyzji oznaczania wzorca metra, precyzji oznaczania punktów obrisu korony, wyboru pędów tworzących obrys), dwa pierwsze mają niewielkie znaczenie. Można zatem stwierdzić, że błędy powstające na etapie opracowywania komputerowego, są zawinione przez operatora i wynikają z pomyłek i niejednoznaczności wyboru pędów tworzących obrys korony. Być może należy szukać lepszych i prostszych sposobów tworzenia obrisu korony nieulistnionych drzew.

Błędy w odczytach parametrów liniowych drzewa obliczone na podstawie 225 prób były niewielkie, ich średnia wartość mieściła się w granicach 0,5%. Dużo większymi błędami obarczona była natomiast powierzchnia przekroju i objętość korony – odpowiednio – 5% i 7%. Maksymalne różnice pomiędzy odczytami były znaczące i dochodziły do 20% w przypadku powierzchni przekroju korony i 35% objętości korony drzewa (tabela 14). Błędy tej wielkości były incydentalne i spowodowane były nieprzebraniem zasad tworzenia obrisu korony. Szczególnie mogło się to zdarzać przy obrysowywaniu takich koron, których wierzchołki pędów były oddalone od siebie o podobną odległość, a co za tym idzie decyzyja, który z wierzchołków jest bliższy stawała się kłopotliwa i podlegała subiektywnej ocenie. Dlatego w czasie badań wprowadzono modyfikację programu, która umożliwia ocenę odległości między wierzchołkami pędów. Etapy, w których powstają błędy, przedstawiono na rycinie 14.

Kształt korony drzewa może się zmieniać nie tylko z powodu przyrostu pędów na długość lub ich utraty, ale także na skutek odchylenia się gałęzi i zmiany odległości między wierzchołkami pędów. Zmiany wartości powierzchni przekroju lub objętości korony nie zawsze mówią wprost o przyroście drzewa, szczególnie, jeżeli obserwacji dokonujemy po jednym sezonie wegetacyjnym. Różnice stają się wyraźne, gdy obserwujemy rozwój drzewa przez kilka kolejnych lat.

Zmiana układu gałęzi nie ma wpływu na wypełnienie korony, czyli widoczną na fotografii powierzchnię rzutu gałęzi. Wypełnienie jest wielkością uwzględniającą każdy rodzaj przyrostu i obejmuje wszystkie fazy wzrostu drzewa. Pomiar zmian tego parametru pozwala uwzględnić nie tylko przyrost długopędów, ale także przyrosty krótkopędów i pędów odroślowych, pędów syleptycznych i proleptycznych, ponadto uwzględnia przyrost grubości pędów, a także tworzenie się nowych. Jest to niewątpliwą zaletą tworzonej metody, w stosunku do innych metod, na przykład opierających się na pomiarach przyrostów długopędów.

Stosunek powierzchni widocznych gałęzi do powierzchni przekroju korony wyraża jej gęstość. Wskaźnik ten umożliwia śledzenie rozwoju drzewa nie tylko przez obserwacje wzrostu wielkości korony, ale także sposobu jej przyrastania. Drzewo przy niezbyt dużym wzroście korony może bardzo się zagęszczać lub odwrotnie – intensywny wzrost niewielkiej nawet liczby pędów może powodować,

że powierzchnia rzutu i objętość koron ulegnie znacznemu powiększeniu. Opisywanie przyrostu drzewa za pomocą innych niż dotychczas parametrów, a więc wysokości, szerokości, powierzchni korony i jej objętości, lub pomiaru pojedynczych długopędów, może się okazać bardzo cenne w przypadku drzew o nietypowym wzroście, na przykład drzew przyulicznych, na których przyrost mają często duży wpływ różne czynniki stresowe.

Wypełnienie korony określa się na podstawie wyseparowanych z tła fotografii jasnych powierzchni pędów w obrębie obrysu korony. Oświetlenie drzewa lampą błyskową powoduje rozświetlenie jego gałęzi przy kontrastowym, zaciemnionym tle. Separacja następuje po określeniu poziomu jasności gałęzi. Do jej oznaczenia pomocny jest histogram przedstawiający sposób rozkładania się jasności pikseli w obrębie zaznaczonej korony. Należy znaleźć taki poziom jasności, który włączyłby do analizy wszystkie gałęzie drzewa. W praktyce jego znalezienie jest niemożliwe. Często na fotografii znajdują się gałązki ciemniejsze od najjaśniejszych elementów tła. Dodatkowym utrudnieniem, być może w największym stopniu powodującym błędy odczytu, jest format – JPEG, w jakim zapisywane są zdjęcia. Kompresja obrazu przy zapisywaniu w tym formacie powoduje upłynnienie kontrastów i ostrych kształtów. W efekcie tło bezpośrednio przylegające do gałązki na fotografii jest rozświetlone przez nieznaczną niwelację kontrastu. Kiedy poszukujemy jasności granicznej dla drzewa i tła, jej poziom może być jeszcze niewystarczający dla włączenia słabiej oświetlonych pędów, a jednocześnie – jako pędy traktowane jest już tło wokół najjaśniejszych gałęzi. Ponieważ oświetlenie drzewa na kolejnych fotografiach nigdy nie jest identyczne, trudno znaleźć sposób na jednoznaczne określenie poziomu jasności. Maksymalny błąd odczytu w badaniach wyniósł 18,0%, średnio 3,5% (tabela 1). Wybraliśmy takie fotografie drzew, które były dogodnie do analiz. Na większości z nich nie było widać żadnych obcych elementów, w pozostałych przypadkach zdjęcia zostały wyretuszowane. Należy przypuszczać, że przy analizie innych zdjęć, gdzie tło jest bardziej zróżnicowane, problem oddzielenia drzewa od tła okaże się jeszcze bardziej istotny. Wypełnienie korony okazało się parametrem bardzo wrażliwym na różnice w oznaczaniu jasności granicznej wybieranej dla oddzielenia gałęzi drzewa od tła fotografii. W nowszych testowanych obecnie wersjach programu DENDRO próbujemy zastąpić je parametrem określającym sumę długości wszystkich pędów widocznych na fotografii. Parametr ten we wstępnych badaniach okazał się mniej zmienny niż wypełnienie korony.

W fotograficznej metodzie pomiaru przyrostów drzew wykorzystuje się fotografie drzew znajdujących się w okresie spoczynku. W naszym klimacie umożliwia to długi okres badań. Metoda jest dostatecznie dokładna, aby wykorzystywać ją zarówno do pomiaru wielkości drzewa, jak i jego przyrostów. Szczególnie przydatna wydaje się w przypadku drzew o wysokości około 10 m, nie badano jej dokładności przy drzewach wyższych.

Fotograficzna metoda pomiaru przyrostów drzew jest narzędziem mogącym służyć do różnego rodzaju badań. W pierwszej kolejności są to badania przyrostów,

które zależą od wpływu środowiska. Możliwe jest porównywanie wzrostu drzew tych samych gatunków rosnących w różnych siedliskach, na przykład w terenie zurbanizowanym i pozamiejskim, na różnych glebach czy na stanowiskach o zróżnicowanym stopniu zanieczyszczenia środowiska. Przy jej zastosowaniu można obserwować pojedyncze drzewa o szczególnym znaczeniu, na przykład pomniki przyrody, albo śledzić rekonwalescencję drzew po silnym przycinaniu lub przesadzaniu. Metoda mogłaby służyć badaniom nad sposobem odtwarzania korony po jej częściowej utracie, analizie zmian pokrojowych, obserwacji reakcji pojedynczego drzewa na nagłą zmianę warunków wodnych lub świetlnych, na przykład podczas inwestycji budowlanych.

Fotografowanie pojedynczego drzewa nie jest bezwzględnie koniecznym warunkiem stosowania metody. Można ją wykorzystać do badań kilku drzew rosnących w niewielkiej grupie. Może okazać się przydatna do obserwacji przestrzennego oddziaływania na siebie drzew sąsiadujących. Mogłaby również służyć do opisanego tempa i sposobu wzrostu poszczególnych gatunków. Przez zastosowanie fotografii uzyskuje się trwały zapis poszczególnych etapów rozwoju drzewa. Przy wykonywaniu zdjęć więcej niż jednego profilu można uzyskać informacje dotyczące wpływu czynników zewnętrznych na symetrię korony.

Metoda może być nadal udoskonalana, rozwijana a także uproszczana, na przykład przez całkowite zautomatyzowanie analizy zdjęcia. Jednocześnie udoskonalenie metody nie musi prowadzić do utraty danych uzyskanych w ubiegłych latach. Jest to podstawowa zaleta metod fotograficznych, które umożliwiają rejestrację stanu istniejącego i archiwizowanie danych, w tym i takich, które w momencie pozyskiwania nie są jeszcze uwzględniane w badaniach. Wykorzystanie ich może nastąpić znacznie później w kolejnych etapach badań, czasem o zgoła innym charakterze.

## Wnioski

- Na końcowe wyniki pomiarów przyrostów drzew mają wpływ zarówno błędy powstające przy wykonywaniu zdjęcia, jak i podczas przetwarzania fotografii.
- Najpoważniejszym źródłem błędów występujących na etapie wykonywania fotografii była zmiana odległości ustawienia przyrządu pomiarowego.
- Zmiana kierunku wykonywania zdjęcia powoduje znaczące różnice w wartościach tylko niektórych pomiarów, w tym największe w pomiarach powierzchni przekroju i objętości korony.
- Oświetlanie drzewa z prawej lub lewej strony nie ma istotnego wpływu na wartości pomiarów.
- Największe błędy powstające na etapie opracowania fotografii powodowane są przez różnice w oznaczaniu obrysu rzutu korony, w najwyższym stopniu wpływają one na wartości powierzchni rzutu i objętości korony.
- Spośród parametrów drzewa najmniejszym błędem obarczone są pomiary

liniowe, a więc wysokość drzewa oraz wysokość i szerokość korony.

- Wypełnienie korony okazało się parametrem trudnym do precyzyjnego oznaczenia ze względu na nie dość jednoznaczne określenie punktu granicznego jasności gałęzi na fotografii. Proponujemy zastosowanie parametru wyrażającego sumę długości pędów, który jest mniej zmienny niż wypełnienie korony.

### Literatura

- BOROWSKI J., GOSPODARCZYK A., 2004. Application of the photographic tree-crowns gains measure method in ecological reserches. *Ann. Warsaw Agricult. Univ. – SGGW, Horticult. Landsc. Architect.* 25: 245-252.
- BOROWSKI J., ORZECZOWSKI J., MAŁKOWSKI J., 2004. Photographic metod of shots and tree-crowns gains measurment. *Elektronika* 8-9: 237-240.
- BROWN P. L., DOLEY D., KEENAN R. J., 2000. Estimating tree crown dimensions using digital analysis of vertical photographs. *Agricultural and Forest Meteorology* 100: 199–212.
- CLARK N., SCHMOLDT D., ARAMAN P., 1999. Development of a digital camera tree evaluation system. Southern Research Station, USDA Forest Service – Blacksburg, Virginia.
- CLARK N. A., WYNNE R. H., SCHMOLDT D. L., WINN M., 2000. An assessment of the utility of a non-metric digital camera for measuring standing trees. *Comp.& Electronics in Agricult.*, 151–169.
- ENGLUND S., O'BRIEN J., CLARK D., 1999. Evaluation of digital and film hemispherical photography and spherical densiometry for measuring forest light environments. *Can. J. For. Res.* 30: 1999-2005.
- FALIŃSKI J. B., 2001. Przewodnik do długoterminowych badań ekologicznych. Wyd. Naukowe PWN, Warszawa.
- HALL F. C. 2002: Photo Point monitoring handbook. US Dept. of Agricult., General Technical Report PNW-GTR-526.
- KOIKE F., 1985. Reconstruction of two-dimensional tree and forest canopy profiles using photographs. *J. Appl. Ecol.* 22: 921-929.
- KOOP H., 1989. Forest Dynamics. Silvi-Star, Wageningen.
- MARSDEN S., FIELDING A., MEAD C., HUSSIN M. Z., 2002. A technique for measuring the density and compexity of understorey vegetation in tropical forests. *Forest Ecol. Manag.* 165: 117-123.
- OLENDEREK H., 1992. Numerical model of tree obtained with the photogrammetric method and its use for determining the volume of thickwood. *Ann. of Warsaw Agricult. Univ. – SGGW, For. and Technol.* 43: 47-52.
- PYYSALO U., 2004. Tree crown determination using terrestrial imaging for laser scanned individual tree recognition. *Inst. of Photogrammetry and Remote Sensing, Univ. of Technology, Helsinki.*
- RYLKE J. (red.), 2004. Podstawy tworzenia fotograficznej metody pomiaru przyrostów pędów i korony drzew. *Przyroda i miasto* 4: 265-279.

- SILBERNAGEL J., MOEUR M., 2001. Modeling canopy openness and understory gap patterns based on image analysis and mapped tree data. *Forest Ecol. Manag.* 149: 217-233.
- SUSKI Z., 1986. Parametry dendrometryczne jako podstawa oceny ekologicznej wartości drzew w terenach zieleni miejskiej (praca doktorska). Rkps., Bibl. Główna SGGW, Warszawa.

### **Przypisy**

<sup>1</sup> suma długości pędów jest uwzględniona w nowszej wersji programu, która powstała w czerwcu 2005.