

Niektóre alternatywne sposoby pomiaru wysokości drzewa do powszechnie stosowanych

Some alternatives to commonly used methods of measuring the height of trees

ZBIGNIEW ADAMKIEWICZ

ul. Św. Wincentego 124/119, PL-03-291 Warszawa
e-mail: turkoczek@op.pl

Submitted: 14 August 2020; Accepted: 13 November 2020

ABSTRACT: Traditionally, methods of measuring tree height use the distance from a person, or instrument, to the trunk and the angle at which the top or the highest visible point in the canopy can be seen. However, such measurements sometimes give wrong results as the highest visible point in the crown may hide the actual top of the tree. Besides, the location of the tree may be challenging. Also, not always professional equipment is accessible. Here, selected traditional and modern methods of measuring a tree height are presented. Short descriptions of the photographic method, the “indented” measurement and the method which uses the comparison between the height of a tree and the sun’s position are presented.

Key words: tree height measurement

Wstęp

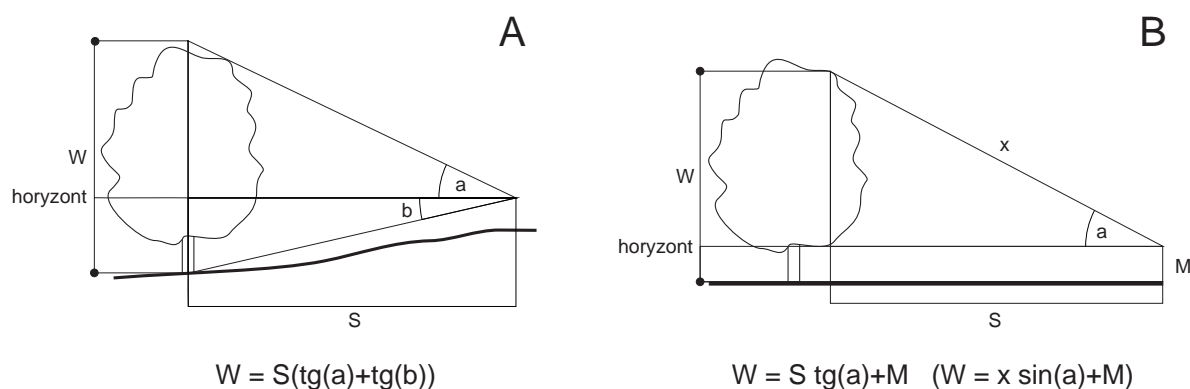
Do inwentaryzacji zaniedbanych założeń ogrodowych, projektowania założeń przestrzennych, badań naukowych, określenia wieku drzewa i wielu innych celów przydatna jest znajomość pełnego opisu drzewa, w tym jego wysokości. Każdy gatunek lub odmiana, rosnąc na wolnej przestrzeni, buduje koronę o typowym dla siebie kształcie. Gdy drzewa rosną w zwarciu, ich sylwetki ulegają przekształceniom. Korony sędziwych drzew na przestrzeni czasu często się deformują przez utratę części konarów wskutek działania wiatru, uderzeń piorunów lub przez wpływ zmian w ich otoczeniu. Do pomiaru wysokości drzewa należy podejść indywidualnie, dostosowując metodę pomiaru do rodzaju jego sylwetki.

Kiedy spacerując, podziwiamy naturę i trafiamy na jakieś drzewo, które nas zachwyca, to bez narzędzi do mierzenia, bo nie byliśmy na to przygotowani, nie pozosta-

jemy jednak zupełnie bezradni i jesteśmy w stanie opisać egzemplarz, nawet z podaniem dokładnie jego wysokości dzięki możliwości zastosowania metod pomiaru opisanych w tym artykule.

Chcąc zmierzyć rzeczywistą wysokość drzewa, możemy wprawdzie widzieć z daleka najwyższy jego fragment, podczas gdy z bliska prawie w połowie przypadków (Oven & More, 2009) przysłaniany jest on przez bliższe partie korony. Jednak tradycyjnie mierzymy z bliska, gdyż łatwiej wtedy określić odległość do pnia, a samego drzewa nic wtedy nie zasłania.

Wysokość opisujemy zawsze umowną miarą, jaką daje przyrząd mierniczy, bliską wprawdzie rzeczywistości, ale dla drzew o szczególnym znaczeniu przyrodniczym istotny jest precyzyjny pomiar. Dokładne określenie wysokości z poziomu terenu dla okazu o stożkowym pokroju korony zazwyczaj nie sprawia trudności. Jednak praktycznie



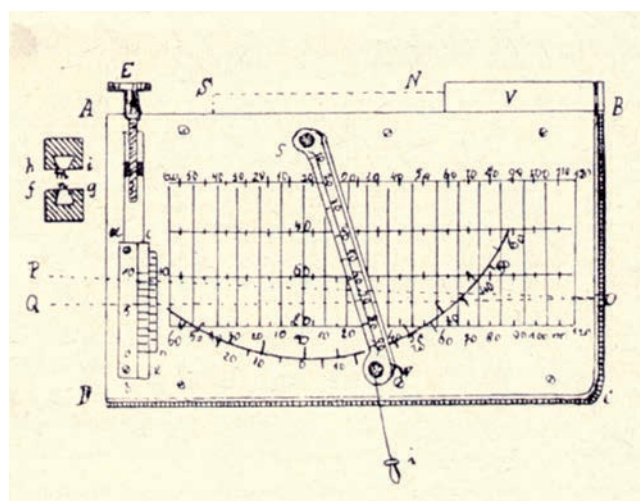
Ryc. 1. Porównanie (A) powszechnie stosowanego sposobu pomiaru wysokości drzewa (Avery & Burkhart, 2002) i (B) pomiaru wysokości z wykorzystaniem punktu leżącego niżej niż rzeczywista wysokość (wierzchołek jest zasłonięty przez gałęzie)

Fig. 1. Comparison of a commonly used method of measuring tree height (Avery & Burkhart, 2002) (on the left) and a method which relies on a point situated below the actual tree height when the crown top is hidden by some branches (on the right)

stosowane metody (ryc. 1) posługiwały się, i posługują nadal, głównie odmierzaniem odległości mierniczego od pnia i kąta (liczonego od poziomu), pod jakim widzi on wierzchołek lub najwyższy zarys gałęzi, co w efekcie, dzięki prostym obliczeniom tangensa, daje wartość wysokości, lecz często tylko przybliżoną. Nazwijmy tę metodę „pomiarem tangensa”. Sprawdza się ona do dziś w przypadku drzew o widocznym wierzchołku i pionowym wzroście (Avery & Burkhart, 2002). W innych przypadkach daje wynik najczęściej większy od rzeczywistego. Gdyby została zmierzona bezpośrednia odległość od mierniczego do miejsca najwyższego widocznego na drzewie i kąt wzniesienia ponad horyzont, to przy szerokim rozgałęzieniu wycelowany fragment byłby bliższy niż odległość do samego pnia często o kilka, a nawet o kilkanaście metrów. W efekcie takim prostym obliczeniem sinusa otrzymalibyśmy jednak wynik zaniżony w stosunku do rzeczywistej wysokości. Choć nie możemy zmierzyć tej odległości, możemy mimo to pomierzyć wysokość pod punktem pomiaru, uzyskując taki sam wynik, który to uzyskujemy przy zastosowaniu opisanych dalej sposobów. Nazwijmy dla odróżnienia tę metodę teoretycznym „pomiarem sinusa”. Przy kulistym zwieńczeniu korony drzewa rzeczywista wysokość jest równa średniej wyników pomiaru obu metod. W innym przypadku wprawny mierniczy może określić, który sposób jest lepszy i na ile pomiar jest bliższy rzeczywistości. Porównanie dokładności pomiarów tymi dwoma sposobami uwidoczniło na ilustracji 13 (warianty b i c). W przypadku tego drzewa (*Populus* sp.) pomiar sposobem „pomiaru sinusa” okazał się dokładniejszy.

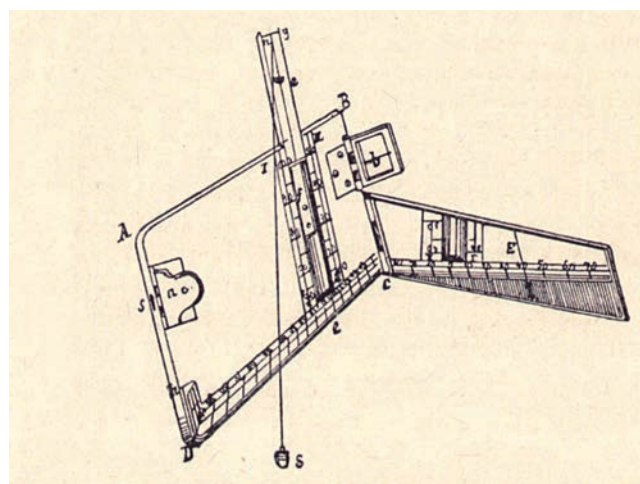
Historia pomiarów

Do „pomiaru tangensa” stosowane były dawniej oprócz teodolitu (instrumentu służącego do pomiarów kątów poziomych i pionowych) najczęściej ręczne wysokościomierze, które miały postać kwadrantu z naniesioną podziałką odpowiednią do odczytu wysokości drzewa. Umożliwiały one odczyt przez blokowanie pionowego pręta (ryc. 2) albo przez



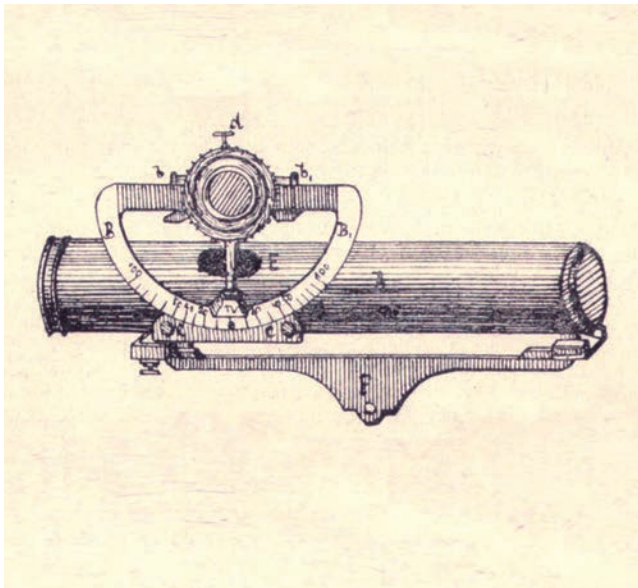
Ryc. 2. Hipsometr Winklera (Jastrzębski, 1924)

Fig. 2. Winkler hypsometer (Jastrzębski, 1924)

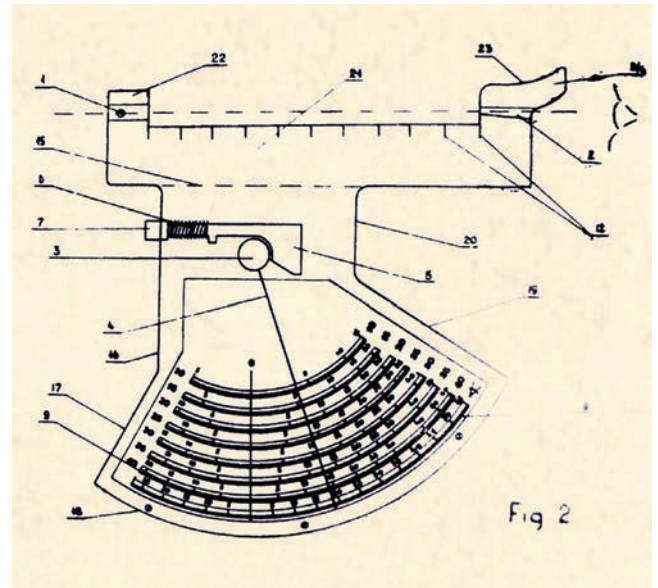


Ryc. 3. Hipsometr lusterkowy Faustmanna (Jastrzębski, 1924)

Fig. 3. Faustmann mirror hypsometer (Jastrzębski, 1924)



Ryc. 4. Diopter lusterkowy Abneya (Jastrzębski, 1924)
Fig. 4. Abney mirror diometer (Jastrzębski, 1924)



Ryc. 5. Wysokościomierz dr. Matusza (Matusz, 1961)
Fig. 5. Dr Matusz altimeter (Matusz, 1961)

jego obserwację za pomocą lusterka (ryc. 3). Innym przyrządem był często stosowany w Anglii wysokościomierz zaopatrzony w poziomnicę widoczną przez otwór w obudowie w ukrytym wewnątrz lusterku (ryc. 4). Poziomica, ręcznie poziomowana pozostaje po dokonaniu pomiaru w położeniu wskazującym na podziałce jego wynik (Jastrzębski, 1924). Podobna do omówionych konstrukcja (ryc. 5) została opracowana w Polsce w 1961 r. przez dr. Stanisława Matusza (Matusz, 1961).

Począwszy od lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku wraz z rozwojem techniki elektronicznej oparte na niej konstrukcje dalmierzów stały się wygodniejsze w stosowaniu, dokładniejsze oraz pozwoliły zarówno na „pomiar tangensa”, jak i „pomiar sinusa”. Jak dokładne są te przyrządy, może posłużyć poniższy przykład (ryc. 13). Z dużej odległości (119 m) pomiar dalmierzem Leica S910 wykazał wysokość 25,8 m. Jako rzeczywistą wysokość tego drzewa (*Populus* sp.), po zestawieniu z wynikami uzyskanymi za pomocą innych metod, które będą opisane dalej, przyjęto 25 m. Różnica w pomiarach bierze się stąd, że kształt korony ma istotny wpływ na ich dokładność. Kształt drzewa (odwrotnie stożkowy) nie pozwalał dojrzeć najwyższego miejsca, które zasłaniały szerokie rozgałęzienia.

Fotograficzna metoda pomiaru

Metoda określenia wysokości drzewa z wykorzystaniem fotografii stanowi uzupełnienie dla innych sposobów i pozwala, podobnie jak metody wyżej opisane, na pomiar z pewną dokładnością (a raczej niedokładnością). Polega ona na sfotografowaniu obiektu z dużej odległości tak, żeby horyzont znajdował się w środku zdjęcia (ryc. 6).



Ryc. 6. Przykład zdjęć z horyzontem w środku obrazu, a tym samym bez zniekształceń perspektywicznych
Fig. 6. Example of photos with the horizon in the center of the image and thus without perspective distortion

Gdy horyzont jest niewidoczny, należy aparat ustawić tak, żeby celował poziomo. Przy pniu powinien znajdować się dobrze widoczny obiekt o znanej wysokości. Może to być na przykład osoba o znanym wzroście, rower oparty o pień, jakiś znak przymocowany do pnia lub widoczne większe oznakowanie w poziomie odmierzone prostopadłe do kierunku celowania (ryc. 7). Odmierzona pionowo wielokrotność tej miary przy widocznym na zdjęciu wierzchołku drzewa

i prostym wzroście w efekcie oznacza dokładnie jego wysokość. Przy szerokiej koronie niedokładność jest taka, jak przy dotychczas omówionych, a dla dużego drzewa może być nawet większa, bo wtedy z większej odległości nasza znana miara może być tak mała, że aż trudna do precyzyjnego odmierzenia na zdjęciu. Dokonanie pomiaru z fotografii obarczonej skrótami perspektywicznymi (ryc. 8) jest bardzo trudne, a często wręcz niemożliwe (Bartel, 1928).



Ryc. 7. Prawidłowy pomiar dużego drzewa (*Quercus robur*). Wysokość drzewa i odległość pozioma nie podlegają zniekształceniu perspektywicznemu

Fig. 7. Correct tree measurement (*Quercus robur*). The tree height and the horizontal length are not subject to perspective distortion

Metoda pomiaru „z wcięciem”

Możliwość pomiaru dającego wynik taki jak „metoda sinusa”, zwłaszcza niewymagającego mierzenia odległości do drzewa, daje „metoda z wcięciem”. Wykorzystuje ona instrument pomiarowy pozwalający odczytać kąt (α) wzniesienia celownika. Polega na dwóch pomiarach (rys. 9) tego samego fragmentu drzewa. Jeden dający wynik kąta (a_1) wzniesienia i drugi – na tym samym poziomie oczu (p), lecz w innej odległości (różnica między nimi to odstęp d), dający wartość kąta a_2 . Obliczona wysokość (W) drzewa pod punktem pomiaru (ponad poziomem) wyraża się wzorem:

$$W = d \operatorname{tg}(a_1) \operatorname{tg}(a_2) (\operatorname{tg}(a_1) - \operatorname{tg}(a_2))^{-1} + p$$

Najdokładniejszy wynik otrzymamy, gdy mierzymy z poziomego gruntu.

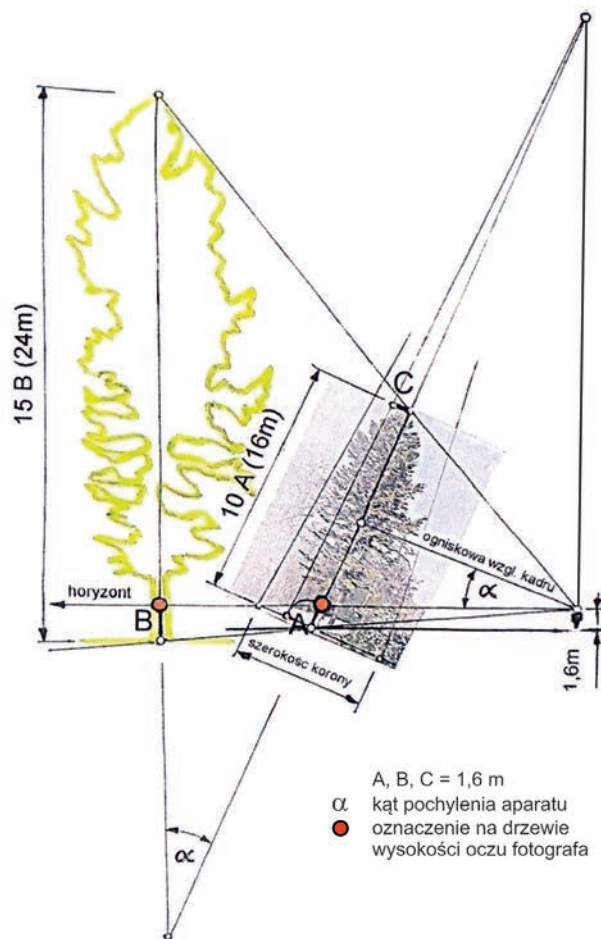
W przypadku odmierzania kąta aparatem fotograficznym należy znać głębokość tłuwę (f), czyli ogniskową obiektywu względem formatu zdjęcia dla standardowego ujęcia w swoim aparacie i przy odpowiadającym tej zależności formacie na dwóch zdjęciach zrobionych z odległości różniących się o dystans (d) pomierzyć wizerunki wierzchołka drzewa ponad horyzontem (h_1 i h_2). Wtedy obliczenie przyjmie postać:

$$W = dh_1h_2f^{-1}(h_1 - h_2)^{-1} \pm p$$

Przy czym jeśli grunt jest pochyły, należy podobnie pomierzyć odległości od horyzontu do podstawy pnia i wynik obliczenia dodać do odmierzonej części ponad horyzontem lub odjąć od niej, jeśli podstawa pnia znajduje się powyżej horyzontu. Dokładność pomiaru jest porównywalna do sposobu opisanego dalej (ryc. 13b).

Sposób pomiaru przez porównanie do wysokości słońca (opracowanie autorskie)

Drugim sposobem pomiaru „metodą sinusa”, który jest prowadzony z poziomego terenu, jest porównanie wysokości drzewa z aktualną wysokością słońca. Znając wysokości i azymuty słońca, po dwóch pomiarach tego samego fragmentu korony i po zmierzeniu niewielkiej odległości między stanowiskami, nawet bez znajomości dystansu (S) do drzewa, możemy uzyskać wynik bardzo zbliżony do rzeczywistego (ryc. 13b). Może do tego być przydatne obliczenie za pomocą powszechnego w użyciu kalkulatora kąta wzniesienia słońca równego kątowi widzenia wierzchołka drzewa i tym samym uzyskanie ważnego parametru dla pomiaru wysokości (W) drzewa. Do pojedynczego pomiaru znane muszą być następujące dane: współrzędne geograficzne pozycji drzewa: szerokość (φ) i długość (Ld), długość południka obowiązującej strefy czasu (Lz) (uwaga: długości wschodnie są ujemne, a zachodnie dodatnie), moment obserwacji, czyli kolejny dzień roku (T), godzina (tz) i odległość (S) od obserwatora do punktu namierzanego fragmentu drzewa. Wzór jest przybliżony i dla $\varphi = +52^\circ$ oraz wysokości 20 m może wykazać błąd średnio 10,5 cm zależnie od daty. Na wykresie (ryc. 10) uwidoczniono wymiar błędów w latach,



Ryc. 8. Przykład zniekształcenia perspektywnego przy zdjęciu wykonanym z bliska. Wymiary rzeczywiste znacznie przewyższają te odmierzane na fotografii (opracowanie autorskie)

Fig. 8. Example of perspective distortion when the photo was taken from a short distance. Actual dimensions exceed these measured in the photo (author's work)

w których ten wymiar odbiega najbardziej od rzeczywistości. W niższych szerokościach geograficznych błąd może być nieco większy, gdyż wynika z różnic obliczonych tangensów wysokości drzewa, a oczywiście są one większe, gdy różnice kątów wzniesienia słońca pozostają takie same. Tak na przykład w strefie równikowej szczególnie w godzinach bliskich południa taki bezwzględny wymiar błędu może być bardzo duży. Różnica między wynikającym z obliczenia a rzeczywistym kątem wzniesienia słońca ponad horyzont (ryc. 11) nie zależy od szerokości geograficznej, a maksymalny jej wymiar jest porównywalny z połową widocznej tarczy słońca.

$$W = Sh(1-h^2)^{-0,5} + p$$

gdzie:

$$h = |D \sin(\varphi) + \cos(\varphi) \cos(Lz - Ld + 15tz - M)(1 - D^2)^{0,5}|$$

$$\text{dla } T < 172, D = \sin(23,44^\circ) \cos((B - (T - 4)C)(T - 3) + 13)$$

$$\text{dla } T > 172, D = \sin(23,44^\circ) \cos((B - (367,25 - T)C)(368,25 - T) - 12,5)$$

$$B = 1,0318$$

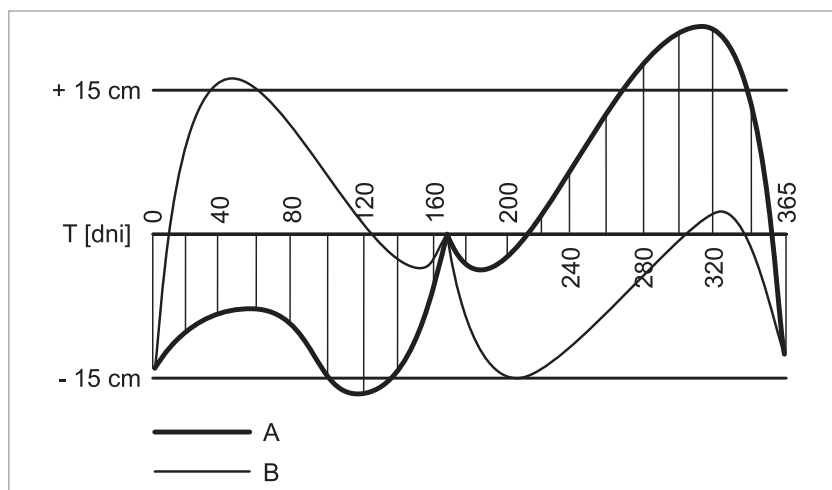
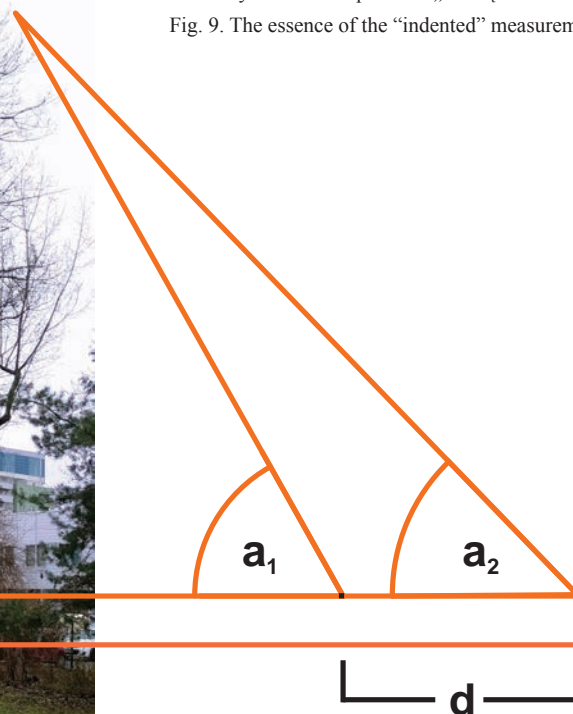
$$C = 0,0003$$

$$M = 2,4 \sin((T + 10) \times 720 / 365,25) + 1,9 \sin(T \times 360 / 365,25)$$

(za: Meeus, 1998)

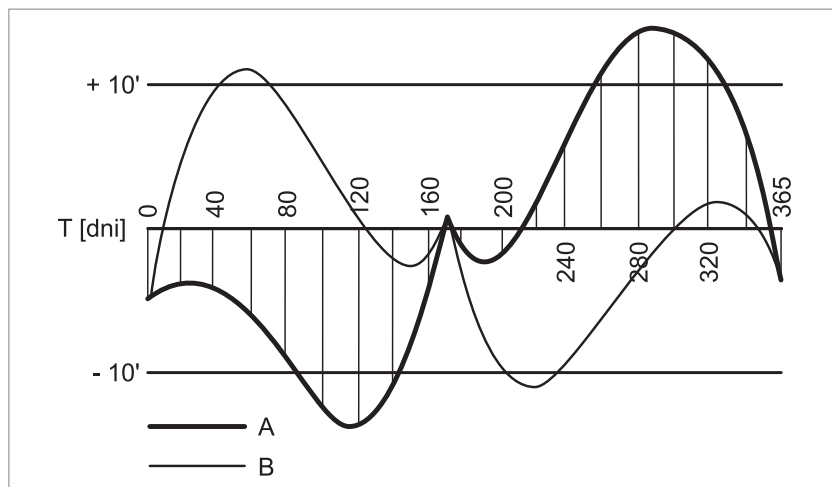


Ryc. 9. Zasada pomiaru „z wcięciem”
 Fig. 9. The essence of the “indented” measurement



Ryc. 10. Różnice między obliczoną wysokością drzewa o godzinie 12 a wysokością rzeczywistą dla drzewa o wysokości 20 m w różnych latach przy $\varphi = +52^\circ$ (A – pierwszy rok po przestępnym; B – rok przestępny) (Twarowski, 1960)

Fig. 10. Differences between the calculated height of a tree at 12 o'clock and the actual height of 20 and $\varphi = +52^\circ$ in different years (A – a year following the leap year, B – the leap year) (Twarowski, 1960)



Ryc. 11. Różnice między obliczonym kątem wzniesienia słońca ponad horyzont a kątem wzniesienia rzeczywistego w różnych latach (A – pierwszy rok po przestępnym; B – rok przestępny)

Fig. 11. Differences between the calculated angle of the sun's elevation above the horizon and the actual elevation angle in different years (A – a year following the leap year, B – the leap year)

Jeóli nie da sié bezpośrednio zmierzyó odleglóóci (S) do drzewa, można ją okreólió, dwukrotnie obliczajúc mierzóná wysokoóó (h_1 i h_2) z dwóch stanowisk odległych od siebie o moóliwá do pomierzenia na tym samym poziomie odleglóóó (c) (ryc. 12), oczywióóie po upływie odpowiedniego czasu. Operacja ta nie wpywa na dokládnóóó obliczenia.

$$W = Sh_1(1-h_1^2)^{-0.5}+p$$

gdzie: $S = c(k^2+1-2k \cos(\Delta A_z))^{-0.5}$

$$k = h_1h_2^{-1}(1-h_2^2)^{0.5}(1-h_1^2)^{-0.5}$$

$\cos(\Delta A_z) = \cos(A_{z2}-A_{z1})$, gdzie: przed półudniem $A_z = 90+A$,

a po półudniu $A_z = 270-A$

$$A = \arcsin((D+h \sin(\varphi))(\cos(\varphi))^{-1}(1-h^2)^{-0.5})$$

(za: Wsóólek, 2009)

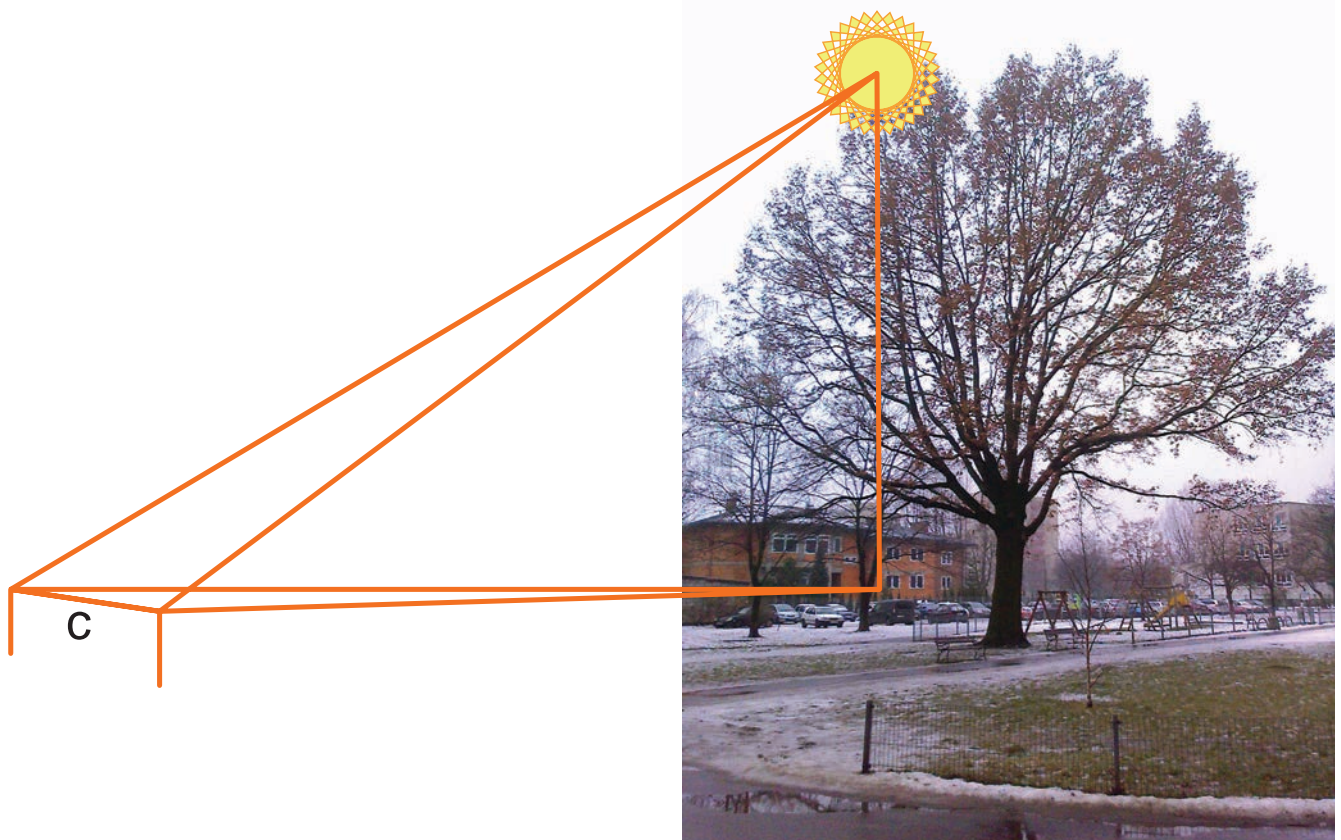
Obliczenia powyóósze nie wymagajúc korzystania z kalkulatora specjalistycznego dzieki temu, óe do sporóóadzenia wzorów narastanie dólugoóóci ekliptycznej potraktowano w sposób uproszczony jako specyficzny cióg sumy wyrazów.

Podsumowanie

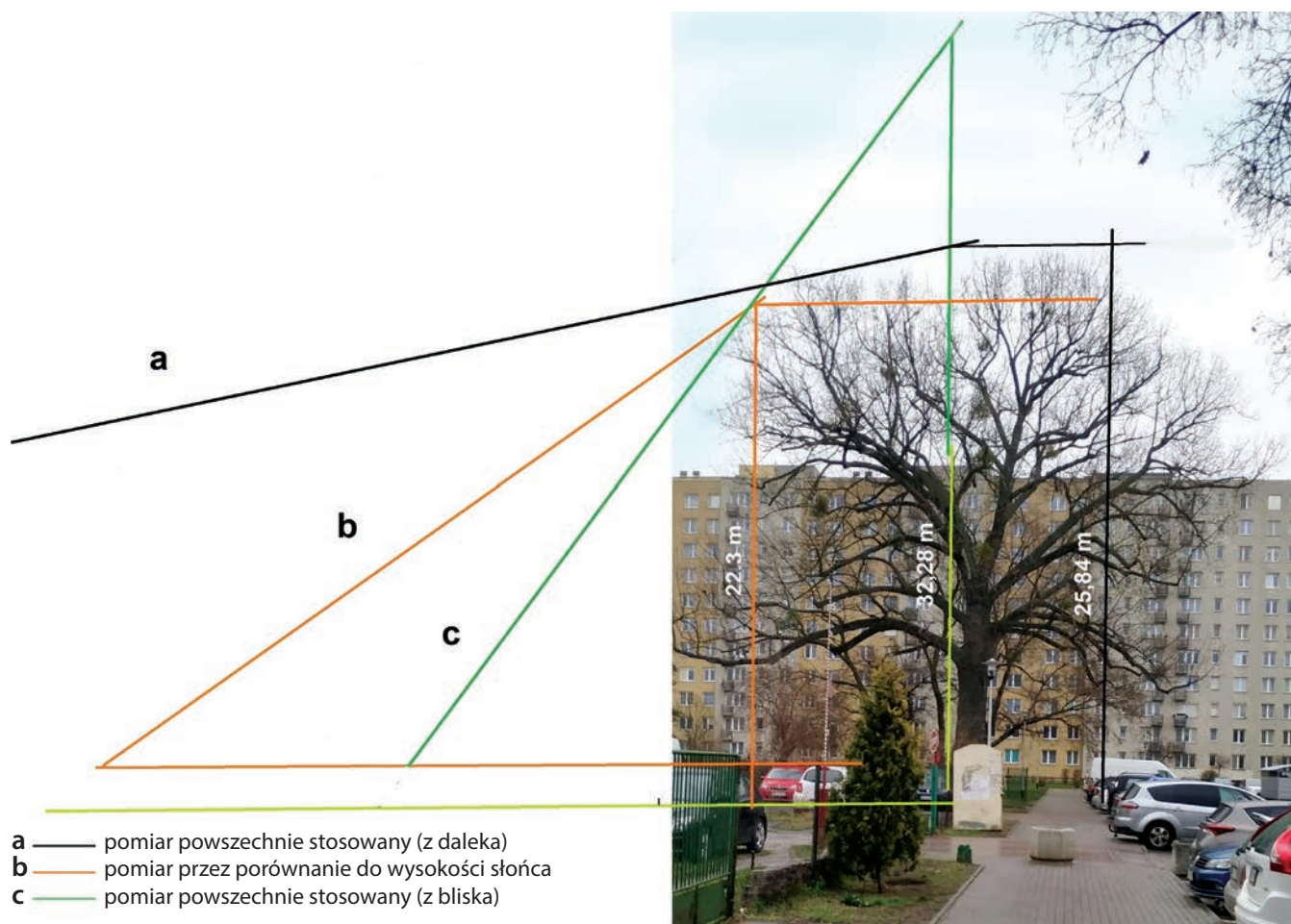
Opisane metody dotyczące obserwacji z dwóch punktów wprawdzie pozwalajúc na pomiar niewielkiej odleglóóci, ale wymagajúc dobrej pamieóci wzrokowej dla zapamiétania mierzónego fragmentu drzewa. Dla pomiaru sólncem to nie jedyna wada, gdyó dostępna musi byó strona odsóloneczna do drzewa, co wyklucza niektóre kierunki pomiaru. Dodajmy jeszcze oczywióóie utrudnienie zwiózane z patrzeniem wprost na sólóce. Róónorodnoóóó metod umoóliwia dokonanie pomiaru nawet tam, gdzie natrafiamy na utrudnienie przy zastosowaniu sposobu, do którego przywyóliómy. Przy duóej odleglóóóci taóma napotyka na przeszkody, punkt pomiarowy lasera bywa sólabo widoczny, a drzewo moóe byó ukryte wóóród innych drzew lub jego korona przybraóó nietypowy ksztalc. Niektóre z opisanych metod pomogúc osobie podróóujúczej wzbogacióó relacje o opis dendrologiczny.

Podziękowanie

Autor skláda podziękowanie Pani mgr Iwonie Gajewskiej za wszechstronná pomoc przy zmotywowaniu, dokonywaniu pomiarów i opinii redakcyjnej.



Ryc. 12. Sposób pomiaru przez porównanie do wysokoóci sólóca z dwóch pozycji
Fig. 12. A method of measurement by comparing the height of the sun from two positions



Ryc. 13. Pomiar tego samego drzewa różnymi metodami
 Fig. 13. The same tree measured using different methods

Literatura

- Avery TE, Burkhardt HE. 2002. Forest measurements. Boston: McGraw-Hill Education.
- Bartel K. 1928. Perspektywa malarska. T. 1. Lwów, Warszawa: Książnica Atlas.
- Dolatowski J, Seneta W. 2012. Dendrologia. Warszawa: PWN.
- Gazda A, Kędra K. 2017. Tree architecture description using a single-image photogrammetric method. Dendrobiology 78:124–135.
- Jastrzębski Z. 1924. Pomiar drzew pojedynczych. Przemysł: Książnica Naukowa.
- Latocha P, Rabsztyn J. 2010. Rośliny ozdobne w architekturze krajobrazu. Cz. 3. Warszawa: Hortpress.
- Matusz S. 1961. Wysokościomierz. Urząd Patentowy RP. pat. 44964.
- Meeus J. 1998. Astronomical algorithms. Wyd. 2. Virginia: Willman-Bell.
- Oven J, More D. 2009. Drzewa. 1600 gatunków i odmian drzew rosnących w Europie. Warszawa: Multico.
- Twarowski M. 1960. Słońce w architekturze. Warszawa Instytut Urbanistyki i Architektury, Arkady.
- Wszolek P, Kuźmich A. 2009. Elementy astronomii dla geografów. Kraków: Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego