

KAMIL KĘDRA, KRZYSZTOF STEREŃCZAK, ANNA GAZDA

Modele stosowane do opisu architektury drzew i możliwości ich praktycznego wykorzystania w leśnictwie*

Tree architecture descriptive models with forestry applications

ABSTRACT

Kędra K., Stereńczak K., Gazda A. 2020. Modele stosowane do opisu architektury drzew i możliwości ich praktycznego wykorzystania w leśnictwie. Sylwan 164 (9): 707-718. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylvan.2020076>.

The qualitative and quantitative descriptive models of tree architecture differ in the degree of complexity and the way of mapping tree structure, and thus, are of varied use in forestry. The qualitative, Hallé-Oldeman models, serve as a framework for analyzing tree architecture and help define the different components of a tree branching system. Among the quantitative models (here: horizontal, three-dimensional or vertical ones) the horizontal representations are the most parsimonious, and proved to be useful for examining the effects of competition process and the light conditions within the forest understory. The three-dimensional representations (Quantitative Structural Models; QSMs) have the widest range of applications as they may be used for deriving both the two-dimensional traits (such as crown length or branch height) and the volumetric traits (such as tree crown volume or wood volume). At the same time they are the most complex ones. The vertical models were used to study the impact of local terrain shape and wind conditions on tree architecture, but the way of deriving such models from the QSMs seems excessively laborious. However, we highlight here also a photogrammetric method, which allows to obtain an analogous model in much simpler way. Both three-dimensional and vertical representations are useful for determining the wood quality features. Three-dimensional models can be used to accurately measure tree woody biomass, while horizontal models can be used for reliable biomass estimations.

KEY WORDS

forest modelling, forest ecosystems, remote sensing, geometry

ADDRESSES

Kamil Kędra ⁽¹⁾ – e-mail: k.kedra@ibles.waw.pl
Krzysztof Stereńczak ⁽¹⁾, Anna Gazda ⁽²⁾

⁽¹⁾ Zakład Geomatyki, Instytut Badawczy Leśnictwa; Sękocin Stary, ul. Braci Leśnej 3, 05-090 Raszyn

⁽²⁾ Katedra Bioróżnorodności Leśnej, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie; al. 29 Listopada 46, 31-425 Kraków

*Badania częściowo finansowane przez MNiSW w ramach subwencji SUB/040011-D019/2020 (Katedra Bioróżnorodności Leśnej Uniwersytetu Rolniczego im. Hugona Kołłątaja w Krakowie).

Wstęp

Architektura drzewa to wzajemny, przestrzenny układ elementów, z których się ono składa [Barthélémy 1991; Barthélémy, Caraglio 2007; Martin-Ducup i in. 2016]. Za takie elementy zwykle przyjmuje się części systemu ugałęzienia, np. odrębne gałęzie lub przyrosty roczne [Room i in. 1994]. Ze względu na specyfikę części nadziemnej oraz podziemnej drzewa mówi się o nadziemnej architekturze drzewa lub architekturze korony [Poorter i in. 2003, 2006; Bayer i in. 2013] oraz architekturze systemu korzeniowego [de Reffye i in. 1995; Coutts 1983; Pregitzer i in. 2002; Barcezi i in. 2018]. Dodatkowo wyróżnia się architekturę hydrauliczną drzewa, jako systemu przewodzącego wodę [Zimmermann 1978; Tyree, Ewers 1991; Cruiziat i in. 2002]. W najlepszym przypadku wszystkie wymienione aspekty powinny być rozpatrywane łącznie [Tyree 1988]. Jednak w praktyce, ze względu na złożoność tych zagadnień, badania skupiają się zwykle na jednym wybranym aspekcie.

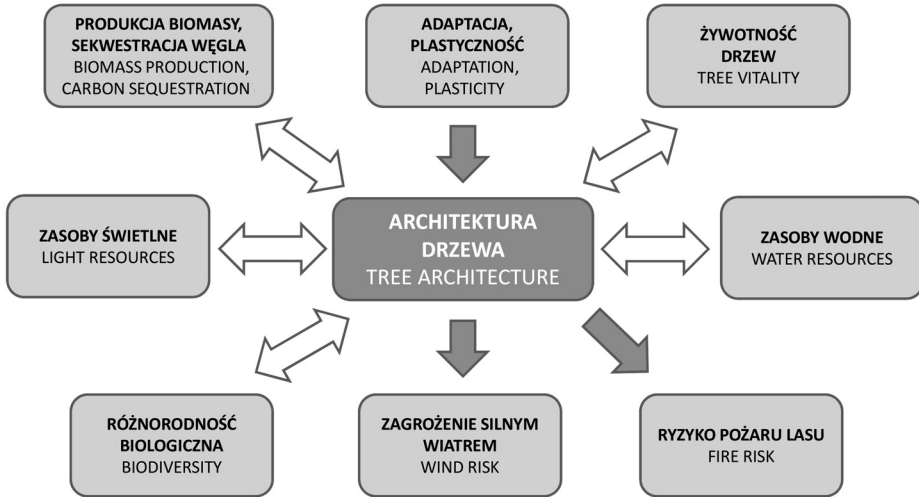
Dzięki rozwojowi swojej architektury drzewa zyskują optymalny dostęp do niezbędnych zasobów [Barbeito i in. 2014; Stützel, Kahlen 2016]. Cechy architektury drzewa, takie jak liczba, grubość, długość i kąt osadzenia gałęzi, dynamicznie reagują na zmiany w środowisku [Hallé, Oldeman 1970; Hallé i in. 1978; Oldeman 1990; Barthélémy 1991; Hallé 2001; Barthélémy, Caraglio 2007]. Dane dotyczące wybranych elementów architektury drzew (skala mniejsza niż całego drzewa) mogą stanowić ważny predyktor cech w większych skalach: całego drzewa oraz drzewostanu, zarówno ilościowych, jak i jakościowych [de Reffye i in. 1995; Forrester i in. 2017]. Wielu autorów podkreśla, że niedostatek i trudność pozyskania danych opisujących architekturę dojrzałych drzew, rosnących w różnych kombinacjach czynników zewnętrznych to główne bariery w testowaniu hipotez dotyczących zależności pomiędzy architekturą, warunkami wzrostu oraz produkcją biomasy [Forrester i in. 2017; Pyörälä i in. 2018; Jackson i in. 2019a] i dalszego zastosowania takiej wiedzy, np. w modelowaniu wzrostu drzewostanów [Feng i in. 2012]. Jednak dotychczasowe (raczej fragmentaryczne) badania z zakresu architektury drzew potwierdziły już dużą przydatność takich danych do objaśniania zmienności drzewostanów pod względem produkcji biomasy i sekwestracji węgla [Feng i in. 2012; Forrester i in. 2017], potencjalnej bioróżnorodności [Oldeman 1990], wykorzystania przestrzeni dostępnej dla wzrostu drzew [Takahashi 1996; Barbeito i in. 2014; van de Peer i in. 2017], ich żywotności [Rust, Roloff 2002; Lee i in. 2014], odporności na silny wiatr [Jackson i in. 2019a] oraz pożar [Parsons i in. 2011], a także wykorzystania dostępnych zasobów [de Reffye i in. 1995; Stützel, Kahlen 2016] (ryc. 1).

Celem pracy było porównanie aktywnych sposobów jakościowego i ilościowego opisu nadziemnej architektury drzew pod względem możliwości ich wykorzystania w leśnictwie. Szczególną uwagę poświęcono modelom ilościowym – ze względu na ich dynamiczny rozwój, za sprawą dostępu do szerokiego wachlarza narzędzi teledetekcyjnych.

Ogólna charakterystyka modelu opisującego architekturę drzewa

Model architektury drzewa reprezentuje przestrzenną konfigurację systemu ugałęzienia drzewa poprzez rozłożenie całości systemu ugałęzienia na określone elementy składowe oraz określenie wzajemnych powiązań przestrzennych pomiędzy nimi (elementy struktury pnia i korony drzewa). Ze względu na rodzaj elementów składowych nadziemny system ugałęzienia drzewa jest systemem jednorodnym. Rośliny, w tym drzewa, są organizmami modułowymi, które rosną poprzez „dodawanie kolejnych” określonych jednostek [Room i in. 1994; Barthélémy, Caraglio 2007].

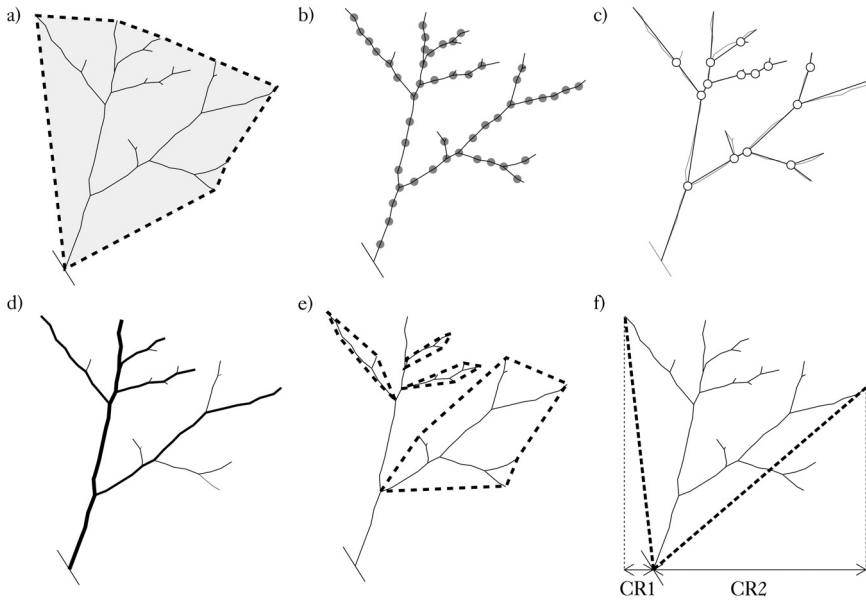
Opracowano szereg sposobów wyróżnienia elementów składowych nadziemnej, zdrewniałej części drzewa (ryc. 2). Podstawowym modułem jest międzywęźle [Room i in. 1994], czyli



Ryc. 1.

Relacje wybranych, ważnych dla wielofunkcyjnego leśnictwa aspektów z architekturą drzewa
 Relationships of selected aspects important for multifunctional forestry with the tree architecture

strzałki wskazują kierunek możliwych relacji: jednokierunkowych (wpływ danego aspektu na architekturę drzewa lub odwrotnie) oraz dwukierunkowych
 arrows indicate the direction of possible relationships: one-way (the impact of a given aspect on the tree architecture or vice versa) and two-way



Ryc. 2.

Reprezentacja ogólna (a) oraz różne sposoby wyodrębnienia elementów systemu drzewa: podział na międzywęźla (b), podział na segmenty (c), rzędowość rozgałęzień (linie różnej grubości symbolizują różne rzędy rozgałęzień) (d), podsystemy ugałęzienia (ograniczone przerywaną linią) (e) i promienie korony (CR1, CR2) (f) na przykładzie buka pospolitego

Global representation of a tree branching system (a) and several methods of defining tree's elements: internodes (b), segments (c), axes (line weight denotes different orders of axes) (d), branching subsystems (e) and crown radii (CR1, CR2) (f) for *Fagus sylvatica* L. individual

odcinek pnia lub gałęzi pomiędzy dwoma sąsiednimi węzłami (miejscami, w których znajdowały się pąki wegetatywne). W praktyce, w przypadku dojrzałych drzew, stosuje się większe jednostki, np. segmenty (obejmujące od jednego do kilku międzywęźli, np. odcinki pomiędzy rozgałęzieniami) lub podsystemy (gałęzie wraz z ich odgałęzieniami). Wyróżnia się dwa typy struktury drzew: scentralizowaną (biomechaniczną) oraz niescentralizowaną (fizjologiczną), w zależności od tego, czy uwaga skupiona jest na relacjach biomechanicznych, czy na transporcie wody i substancji odżywczych. W pierwszym przypadku pień drzewa stanowi pewien element centralny, który ma wpływ na wszystkie rozgałęzienia [Mattheck 1998; Loehle 2016]. Modele opisujące architekturę drzew implementują założenia struktury biomechanicznej drzewa, jednak wyróżnia się także modele strukturalno-funkcjonalne [Sievänen i in. 2014], które mogą stosować założenia obu typów struktury drzewa jednocześnie.

Modele jakościowe

Jakościowe modele architektury drzew bazują na cechach niemierzalnych, takich jak typ wzrostu głównej osi drzewa czy sposób rozmieszczenia odgałęzień (tab. 1). Modele te wyprzedzają chronologicznie modele ilościowe i stanowią dla nich podstawę teoretyczną, służącą do identyfikacji poziomów organizacji systemu ugałęzienia oraz wyodrębnienia jednorodnych elementów [de Reffye i in. 1995]. Opisano 23 typy architektoniczne drzew [Hallé, Oldeman 1970; Hallé i in. 1978], które określane są nazwiskami znanych botaników. Modele te stanowią kombinację jednej lub większej liczby wybranych cech jakościowych (tab. 1) [Bell 1991].

Do sklasyfikowania różnorodności gatunków drzew europejskich wystarczy zaledwie kilka modeli Hallé-Oldemana (HO). Najliczniejszą reprezentację gatunków przedstawiają modele Rauha i Trolla (ryc. 3). W obu przypadkach rozmieszczenie odgałęzień jest rytmiczne (cecha gatunków drzew strefy umiarkowanej). Model Rauha cechuje monopodialny wzrost głównej osi, podczas gdy model Trolla jest bardziej plastyczny i zakłada wzrost mono- lub sympodialny. Drugą różnicę stanowi typ wzrostu odgałęzień: ortotropowy w modelu Rauha i początkowo plagiotropowy w modelu Trolla (gałęzie mogą ulec wtórnemu uniesieniu, poprzez działanie drewna reakcyjnego). W ogólnym zarysie model Rauha reprezentuje gatunki światłożądne i wczesnosukcesyjne, natomiast model Trolla – cienioznośne i późnosukcesyjne.

Autorzy modeli HO podkreślają fakt, że środowisko wzrostu drzewa może mieć ogromny wpływ na jego architekturę [Oldeman 1990]. Zwłaszcza w przypadku gatunków plastycznych modyfikacje powtarzanego wzorca (określonego modelu HO) mogą doprowadzić do zaniku jego

Tabela 1.

Podstawowe cechy jakościowe wykorzystywane w klasyfikacji architektonicznej drzew zgodnie z metodą Hallé-Oldemana [1970]

Main qualitative traits used to classify trees to one of the Hallé-Oldeman architectural models [1970]

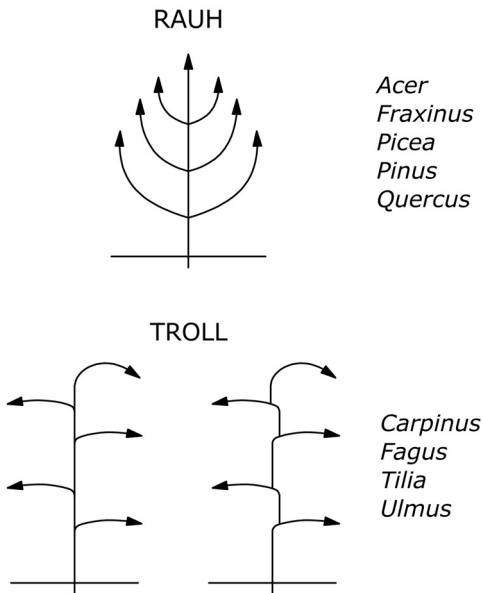
	Poziom cechy Trait level	
Typ wzrostu osi głównej Main axis growth pattern	monopodialny pień monopodial stem	sympodialny pień sympodial stem
Rozmieszczenie odgałęzień Branching pattern	rytmiczne rhythmic branching	ciągłe continuous branching
Typ odgałęzień Type of branches	odgałęzienia ortotropowe orthotropic branches	odgałęzienia plagiotropowe plagiotropic branches
Rozmieszczenie pąków generatywnych Flowering pattern	szczytowe pąki kwiatowe terminal flowering	boczne pąki kwiatowe lateral flowering

Tabela 2.

Elementy składowe, struktura, charakterystyczne cechy ilościowe, a także czynniki zewnętrzne, których relacje z architekturą drzew badano z wykorzystaniem wybranych modeli ilościowych służących do jej opisu

Elements, structure, specific quantitative traits, and the external factors whose relationships with tree architecture were studied using selected models of its description

	Horyzontalne Horizontal	Trójwymiarowe Three-dimensional	Wertykalne Vertical
Elementy	odcinki zawarte w płaszczyźnie poziomej	odcinki lub proste bryły geometryczne zawarte w przestrzeni trójwymiarowej	odcinki lub proste bryły geometryczne rzutowane na płaszczyznę pionową
Elements	segments projected onto a horizontal plane	usually cylinders within a 3D-space	segments or cylinders projected onto a vertical plane
Struktura	uproszczona, scentralizowana	biomechaniczna struktura drzewa	uproszczona, biomechaniczna struktura drzewa
Structure	simplified centralized	biomechanical	simplified biomechanical
Cechy ilościowe	promienie korony, horyzontalna powierzchnia rzutu korony	horyzontalne, wertykalne, objętościowe	liczba, grubość i kąt osadzenia gałęzi, wertykalna powierzchnia rzutu korony
Quantitative traits	crown radii, horizontal crown projection area	horizontal, vertical and volumetric traits	branch number, diameter, angle, crown sail area
Czynniki zewnętrzne	konkurencja, warunki świetlne	konkurencja, warunki świetlne, rzeźba terenu, warunki wietrzne	rzeźba terenu, warunki wietrzne
External factors	competition, light conditions	competition, light and wind conditions, relief	wind conditions, local topography
Przykłady badań	Grote 2003; Piboule i in. 2005; Fleck i in. 2011; Pretzsch i in. 2015; Kędra i in. 2016	Disney i in. 2018; Jackson i in. 2019b; Pyörälä i in. 2018	Jackson i in. 2019a; Martin-Ducup i in. 2018; Sumida i in. 2002
References			



Ryc. 3.

Porównanie modeli Rauha (monopodialny pień i ortotropowe odgałęzienia) oraz Trolla (monopodialny lub sympodialny pień i początkowo plagiotropowe odgałęzienia) [Hallé i in. 1978]

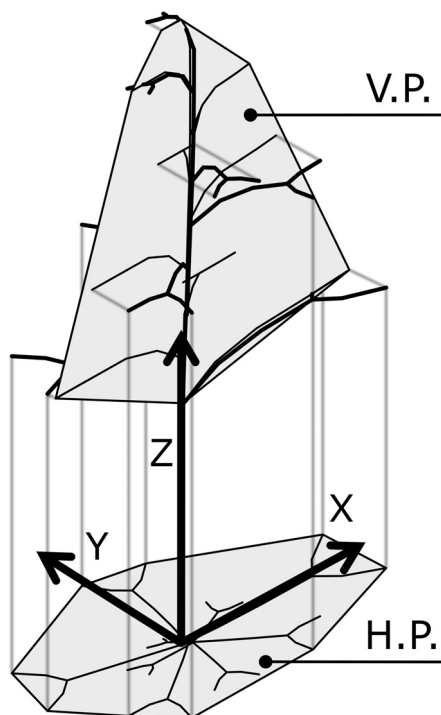
Comparison of Rauh (monopodial stem and orthotropic branches) and Troll (monopodial or sympodial stem and initially plagiotropic branches) models [Hallé i in. 1978]

cech charakterystycznych [Oldeman 1990]. Drzewa rozwijające się według tego samego modelu mogą wytworzyć bardzo zróżnicowane korony i odwrotnie: drzewa należące do różnych modeli mogą tworzyć podobne do siebie korony [Fisher, Hibbs 1982]. Stąd duże znaczenie modeli opisujących architekturę drzew w sposób ilościowy, mogących służyć do wyjaśnienia przyczyn takiej zmienności.

Modele ilościowe

Kędra [2019] przyjął podział modeli ilościowych, służących do opisu architektury drzew, na reprezentacje horyzontalne, trójwymiarowe oraz wertykalne (ryc. 4, tab. 2). W literaturze przedmiotu zaznacza się taki właśnie podział, ze względu na różną przydatność modeli do badań nad wpływem różnych czynników na architekturę drzew, a także różnice pomiędzy zestawami ilościowych cech architektury, które można uzyskać na podstawie różnych typów modeli.

REPREZENTACJE HORYZONTALNE. Horyzontalne reprezentacje architektury drzew stanowią przedstawienie systemu ugałęzienia drzewa w odniesieniu do płaszczyzny poziomej (rzut na taką płaszczyznę). Jest to jedyny sposób opisu architektury drzewa, który można zrealizować we względnie prosty sposób, czyli bez wykorzystania zaawansowanych technik teledetekcji [Fleck i in. 2011]. Taka metoda polega na pomiarze określonej liczby promieni korony drzewa w terenie, z wykorzystaniem klinometru oraz taśmy mierniczej. W tym przypadku promień korony jest najprostszym możliwym modułem systemu ugałęzienia (ryc. 2f), czyli segmentem mającym początek u podstawy drzewa oraz koniec w miejscu dominującego merystemu wierzchołkowego wybranego odgałęzienia (najdalej horyzontalnie wysuniętego w określonym kierunku). Całościowa (globalna, holistyczna) reprezentacja korony drzewa (rzut korony) uzyskiwana jest poprzez połączenie zewnętrznych punktów kolejnych segmentów.



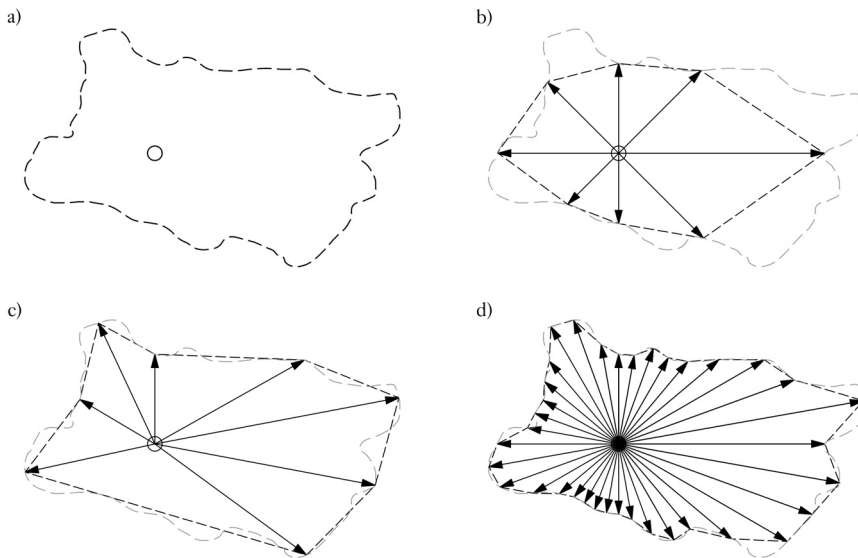
Ryc. 4.

Sposoby reprezentacji architektury drzewa w przestrzeni trójwymiarowej (współrzędne XYZ) oraz w odniesieniu do płaszczyzny poziomej (H.P.; współrzędne XY) lub pionowej (V.P.; współrzędne XZ)

Types of an tree architecture representation within three-dimensional space (XYZ coordinates) as well as in respect to a horizontal (H.P.; XY coordinates) or vertical (V.P.; XZ coordinates) planes

Opisano dwa typy horyzontalnej reprezentacji architektury drzewa, w oparciu o promienie korony [Fleck i in. 2011]: promienie rozłożone równomiernie (np. mierzone w 8 głównych kierunkach geograficznych) oraz promienie charakterystyczne, rozłożone w zależności od kształtu rzutu korony drzewa (ryc. 5). Pierwsza z wymienionych metod może prowadzić do pominięcia znacznej części zmienności kształtu rzutu korony drzewa (ryc. 5b). W drugim przypadku (ryc. 5c) problemem pozostaje powtarzalność pomiaru, ponieważ różni obserwatorzy w różny sposób mogą ocenić kierunek promieni charakterystycznych. Wydaje się, że najdokładniejszą metodą jest pomiar dużej liczby promieni korony, np. 36 promieni rozłożonych co 10 stopni kąta poziomego (ryc. 5d), jednak taki sposób czyni metodę znacznie bardziej czasochłonną. Mimo znacznego uproszczenia systemu ugałęzienia przedstawione reprezentacje horyzontalne są przydatnym sposobem opisu architektury drzew. Mogą być wykorzystane do określenia poziomej powierzchni wzrostu drzewa, ilości biomasy oraz sekwestracji węgla [Pretzsch i in. 2015], a także wielkości asymetrii korony i stopnia płastyczności drzewa względem poziomu lokalnej konkurencji [Grote 2003; Piboule i in. 2005; Kędra i in. 2016]. Takie modele są również przydatne do określenia sposobu wykorzystania dostępnej przestrzeni przez korony drzew oraz warunków świetlnych panujących w dolnym piętrze drzewostanu [Piboule i in. 2005].

REPREZENTACJE TRÓJWYMIAROWE. Trójwymiarowe modele architektury drzew (Quantitative Structure Model, QSM) przedstawiają nadziemny system ugałęzienia drzewa przy pomocy ciągów prostych brył geometrycznych: najczęściej walców o zmiennych parametrach, ale także sfer lub graniastosłupów [Hackenberg i in. 2015].



Ryc. 5.

Rzeczywisty kształt rzutu korony drzewa (a) i trzy sposoby otrzymania horyzontalnej reprezentacji architektury drzewa: promienie korony wyznaczone w 8 kierunkach geograficznych (b), 8 charakterystycznych promieni korony [Fleck i in. 2011] (c) i 36 równomiernie rozłożonych promieni korony (d) na przykładzie buka pospolitego

Actual shape of a horizontal crown envelope projection (a) and three methods for deriving the horizontal tree architecture representation: crown radii spaced according to the eight cardinal directions (b), flexible (characteristic) crown directions [Fleck et al. 2011] (c) and 36 evenly spaced directions for *Fagus sylvatica* L. individual

okrąg symbolizuje podstawę drzewa; circle indicates tree base

drzewa przy pomocy tzw. szkieletu, czyli ciągów odcinków (w przestrzeni trójwymiarowej), które odpowiadają osiom pni i gałęzi. Często obie reprezentacje (liniowa i objętościowa) są ze sobą połączone (odcinki szkieletu są osiami brył geometrycznych). Aktywne metody uzyskania QSM bazują na technikach teledetekcji, takich jak skanowanie laserowe i fotogrametria [Bournez i in. 2017]. Pozyskanie danych może być wspomagane wykorzystaniem dronów [Liang i in. 2019]. W przypadku fotogrametrii proces prowadzący do otrzymania takiego modelu składa się z 4 podstawowych etapów: wykonania serii zdjęć drzewa z różnych kierunków, przetworzenia ich na trójwymiarową chmurę punktów (niestrukturalny model geometryczny), obróbki chmury punktów (np. usunięcie zbędnych punktów i grupowanie punktów należących do pojedynczego drzewa lub jego poszczególnych odgałęzień) oraz manualnego, automatycznego lub częściowo zautomatyzowanego dopasowania określonych modułów (odcinków lub brył) do chmury punktów, tak żeby możliwie najdokładniej odwzorować strukturę systemu ugałęzienia drzewa. W przypadku skanowania laserowego dwa ostatnie etapy pozostają bez zmian, natomiast są poprzedzone etapem zeskanowania drzewa w terenie (chmura punktów jest bezpośrednim produktem skanowania). Każdy z wymienionych etapów realizowany jest z pewnym błędem, który ma wpływ na jakość wynikowego QSM. Kluczowa jest dokładność opisu systemu ugałęzienia chmurą punktów. Dostępne techniki różnią się jakością pozyskiwanych danych. Najdokładniejsze chmury punktów są produktem naziemnego skanowania laserowego, natomiast fotogrametria jest tańszą, lecz mniej dokładną alternatywą [Liang i in. 2015]. Nie mniej ważny jest sposób opisu modułów geometrycznych na chmurze punktów.

Opracowano szereg procedur prowadzących do otrzymania QSM, różniących się wykorzystanym oprogramowaniem, stopniem automatyzacji oraz dokładnością wynikowego modelu [Dassot i in. 2012; Raunonen i in. 2013; Hackenberg i in. 2015; Bournez i in. 2017]. Przyjmuje się, że najdokładniejsza jest metoda manualna [Bournez i in. 2017], jednak bardzo czasochłonna i wymagająca dużej uwagi (chmury punktów mogą składać się z milionów punktowych obserwacji). Trójwymiarowe modele opisujące architekturę drzew mogą służyć do badania dowolnych relacji wewnętrznych (pomiędzy elementami systemu ugałęzienia) oraz zewnętrznych (między systemem ugałęzienia a środowiskiem wzrostu drzewa). Badania wykorzystujące QSM skupiają się na pomiarach takich cech systemu ugałęzienia jak wysokość i kąt osadzenia oraz średnica gałęzi. Te cechy mają duży wpływ na jakość surowca drzewnego i są jednocześnie skrajnie trudne do zmierzenia bez zastosowania technik teledetekcji [Pyörälä i in. 2018]. QSM może posłużyć także do dokładnego określenia biomasy i poziomu sekwestracji węgla w drzewie, z podziałem na poszczególne części systemu ugałęzienia [Disney i in. 2018]. Opracowanie QSM otworzyło również drogę do symulacyjnych badań nad odkształceniami mechanicznymi drzew pod naporem wiatru [Jackson i in. 2019b].

REPREZENTACJE WERTYKALNE. Reprezentacje wertykalne bazują zwykle na trójwymiarowych modelach ilościowych. W tym przypadku QSM jest rzutowany na określoną płaszczyznę pionową. Jackson i in. [2019a] wykorzystali wertykalne modele architektury wybranych drzew liściastych do określenia powierzchni pionowych rzutów ich systemów ugałęzienia (sail area). Ta cecha istotnie przyczyniła się do wyjaśnienia zmienności krytycznej siły wiatru łamiącej drzewo. Sumida i in. [2002] wykorzystali wertykalną reprezentację architektury drzewa w badaniu nad wpływem stopnia nachylenia stoku na liczbę, długość i pionowe kąty osadzenia gałęzi. Martin-Ducup i in. [2018] stwierdzili wysoką przydatność wertykalnych cech architektury drzew do wyjaśnienia zmienności względnego zagęszczenia biomasy w profilu pionowym drzewostanu. Dodatkowo wertykalne reprezentacje QSM często służą do zobrazowania trójwymiarowych modeli drzew [Calders i in. 2018].

Alternatywną metodą generowania wertykalnej reprezentacji architektury drzewa (bez potrzeby tworzenia trójwymiarowego QSM) może być zastosowanie prostej metody fotogrametrycznej przy użyciu pojedynczego zdjęcia cyfrowego (Single Image Photogrammetry, SIP), przy heurystycznym założeniu, że otrzymany obraz systemu ugałęzienia drzewa można traktować jak jego projekcję na teoretyczną płaszczyznę pionową, prostopadłą do kierunku wykonywanego zdjęcia. W tym przypadku opis architektury drzewa odbywa się w trzech etapach: wykonanie zdjęcia w terenie, transformacja zdjęcia (redukcja zniekształceń perspektywicznych) oraz wektoryzacja systemu ugałęzienia. Całość pracy kameralnej można wykonać z wykorzystaniem otwartego oprogramowania QGIS. Model wertykalny wymaga określenia azymutu („kierunku”) płaszczyzny pionowej, względem której będzie rozpatrywana architektura drzewa. Możliwe są dwie przesłanki do wyznaczenia takiego kierunku: wzdłuż charakterystycznego profilu drzewa, czyli zawierającego największy promień korony lub kierunek nachylenia drzewa, albo kierunek warunkowany celem wykorzystania modelu, np. w zależności od badanego czynnika zewnętrznego: prostopadły lub równoległy do dominującego kierunku wiatru czy też prostopadły do kierunku nachylenia stoku. Metodę SIP testowano m.in. z wykorzystaniem 31 drzew buka pospolitego w wyżynnym, naturalnym lesie bukowym w Ojcowskim Parku Narodowym [Gazda, Kędra 2017], a także z wykorzystaniem 54 drzew dębu bezszypułkowego na terenie obszaru eksperymentalnego OPTMix, w centralnej Francji [Kędra i in. 2019]. W obu przypadkach z powodzeniem przeprowadzono zaplanowane pomiary, a ponadto w drugim z badań potwierdzono przydatność metody SIP poprzez porównanie z naziemnym skanowaniem laserowym.

Podsumowanie

Przedstawione ilościowe sposoby reprezentacji architektury drzew różnią się stopniem złożoności oraz sposobem odwzorowania struktury drzewa (tab. 2) i co za tym idzie – możliwościami zastosowania w leśnictwie i praktyce leśnej. Tabela 3 podsumowuje przydatność tych modeli poprzez cechy ilościowe, które można uzyskać z ich pomocą, do szacowania i pomiaru jakości oraz ilości surowca drzewnego. Wydaje się, że modele horyzontalne mają najbardziej ugruntowaną formę, choć ciągle pozostają wątpliwości metodyczne co do sposobu wyznaczania kierunków promieni korony (ryc. 5). Takie reprezentacje architektury drzew okazały się przydatne do badań nad procesem konkurencji oraz kształtowaniem się warunków świetlnych w drzewostanie przy zachowaniu prostoty modelu. Natomiast ograniczenie zastosowania modeli horyzontalnych wynika przede wszystkim z ich uproszczonej struktury i braku wiernej reprezentacji systemu ugałęzienia, przez co nie są przydatne do bezpośredniego określania cech związanych z jakością surowca drzewnego (tab. 3). Modele trójwymiarowe mają potencjalnie najszersze zastosowanie w leśnictwie. Można przy ich pomocy określić tzw. cechy objętościowe korony (objętość całej korony, miąższość grubizny) i jednocześnie bardzo szczegółowe dane dotyczące biomasy drzewnej, a także dowolne reprezentacje dwuwymiarowe. Jednak ograniczeniem stosowania modeli trójwymiarowych jest złożoność i kosztowność procesu uzyskania QSM. Reprezentacje wertykalne mogą służyć do badań nad wpływem rzeźby terenu i warunków wietrznych na architekturę drzew oraz do uproszczonej analizy podziału biomasy drzewnej pomiędzy różnymi częściami drzewa (np. pień vs. korona). W pracy przybliżono metodę fotogrametryczną (SIP), która pozwala uzyskać model wertykalny w prosty i względnie szybki sposób [Gazda, Kędra 2017; Kędra i in. 2019]. Kolejnym etapem w kierunku wdrożenia metody SIP powinna być jej automatyzacja w możliwie wysokim stopniu. Modele horyzontalne i wertykalne mogą łącznie dostarczyć podobnych informacji o architekturze drzew jak modele trójwymiarowe (tab. 2 i 3), jednak w ograniczonym zakresie (z wyłączeniem pomiaru cech objętościowych).

Tabela 3.

Wybrane cechy ilościowe, które można uzyskać przy pomocy modeli horyzontalnych (H), trójwymiarowych (3D) lub wertykalnych (V) oraz ocena ich przydatności do szacowania lub pomiaru jakości oraz ilości surowca drzewnego

Selected quantitative traits that can be obtained using horizontal (H), three-dimensional (3D) or vertical (V) models and the assessment of their suitability for estimating or measuring the quality (Jakość) and quantity (Ilość) of wood material

		H	3D	V	Jakość	Ilość
Drzewo Tree	DBH	-	+	+	-	+
	H	-	+	+	-	+
Korona Crown	CPA	+	+	-	+	+
	CW	+	+	+	+	+
	CL	-	+	+	+	-
	CWA	+	+	+	+	-
Gałąź Branch	BH	-	+	+	+	-
	BD	-	+	+	+	+
	BA	-	+	+	+	-
	BV	-	+	-	+	+

DBH – pierśnica, H – wysokość, CPA – powierzchnia rzutu korony, CW – szerokość korony, CL – długość korony, CWA – asymetria korony, BH – wysokość gałęzi, BD – grubość gałęzi, BA – kąt osadzenia gałęzi, BV – miąższość gałęzi
DBH – diameter at the breast height, H – tree height, CPA – crown projection area, CW – crown width, CL – crown length, CWA – crown width asymmetry, BH – branch height, BD – branch diameter, BA – branch angle, BV – branch volume

Literatura

- Barbeito I., Collet C., Ningre F. 2014. Crown responses to neighbor density and species identity in a young mixed deciduous stand. *Trees-Structure and Function* 28: 1751-1765. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-014-1082-2>.
- Barczy J. F., Rey H., Griffon S., Jourdan C. 2018. DigR: a generic model and its open source simulation software to mimic three-dimensional root-system architecture diversity. *Annals of Botany* 121: 1089-1104. DOI: <https://doi.org/10.1093/aob/mcy018>.
- Barthélémy D. 1991. Levels of organization and repetition phenomena in seed plants. *Acta Biotheoretica* 39: 309-323. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf00114184>.
- Barthélémy D., Caraglio Y. 2007. Plant architecture: A dynamic, multilevel and comprehensive approach to plant form, structure and ontogeny. *Annals of Botany* 99: 375-407. DOI: <https://doi.org/10.1093/aob/mcl260>.
- Bayer D., Seifert S., Pretzsch H. 2013. Structural crown properties of Norway spruce (*Picea abies* L. Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) in mixed versus pure stands revealed by terrestrial laser scanning. *Trees-Structure and Function* 27: 1035-1047. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-013-0854-4>.
- Bell A. D. 1991. *Plant form: an illustrated guide to flowering plant morphology*. Oxford University Press, Oxford.
- Bournez E., Landes T., Saudreau M., Kastendeuch P., Najjar G. 2017. From TLS point clouds to 3D models of trees: A comparison of existing algorithms for 3D tree reconstruction. *ISPRS Archives Proceedings of the 7th Workshop on 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures XLII-2/W3*: 113-120. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-113-2017>.
- Calders K., Origo N., Burt A., Disney M., Nightingale J., Raunonen P., Akerblom M., Malhi Y., Lewis P. 2018. Realistic Forest Stand Reconstruction from Terrestrial LiDAR for Radiative Transfer Modelling. *Remote Sensing* 10. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs10060933>.
- Coutts M. P. 1983. Root architecture and tree stability. *Plant and Soil* 71: 171-188. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf02182653>.
- Cruziat P., Cochard H., Ameglio T. 2002. Hydraulic architecture of trees: main concepts and results. *Annals of Forest Science* 59: 723-752. DOI: <https://doi.org/10.1051/forest:2002060>.
- Dassot M., Colin A., Santenoise P., Fournier M., Constant T. 2012. Terrestrial laser scanning for measuring the solid wood volume, including branches, of adult standing trees in the forest environment. *Computers and Electronics in Agriculture* 89: 86-93. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.08.005>.
- Disney M. I., Vicari M. B., Burt A., Calderys K., Lewis S. L., Raunonen P., Wilkes P. 2018. Weighing trees with lasers: advances, challenges and opportunities. *Interface Focus* 8. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsfs.2017.0048>.
- Feng L., de Reffye P., Dreyfus P., Auclair D. 2012. Connecting an architectural plant model to a forest stand dynamics model-application to Austrian black pine stand visualization. *Annals of Forest Science* 69: 245-255. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0144-5>.
- Fisher J. B., Hibbs D. E. 1982. Plasticity of tree architecture – specific and ecological variations found in Aubreville's model. *American Journal of Botany* 69: 690-702. DOI: <https://doi.org/10.2307/2442959>.

- Fleck S., Moelder I., Jacob M., Gebauer T., Jungkunst H. F., Leuschner C. 2011. Comparison of conventional eight-point crown projections with LiDAR-based virtual crown projections in a temperate old-growth forest. *Annals of Forest Science* 68: 1173-1185. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0067-1>.
- Forrester D. I., Tachauer I. H. H., Annighoefer P., Barbeito I., Pretzsch H., Ruiz-Peinado R., Stark H., Vacchiano G., Zlatanov T., Chakraborty T., Saha S., Sileshi G. W. 2017. Generalized biomass and leaf area allometric equations for European tree species incorporating stand structure, tree age and climate. *Forest Ecology and Management* 396: 160-175. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.04.011>.
- Gazda A., Kędra K. 2017. Tree architecture description using a single-image photogrammetric method. *Dendrobiology* 78: 124-135. DOI: <https://doi.org/10.12657/denbio.078.012>.
- Grote R. 2003. Estimation of crown radii and crown projection area from stem size and tree position. *Annals of Forest Science* 60: 393-402. DOI: <https://doi.org/10.1051/forest:2003031>.
- Hackenberg J., Spiecker H., Calders K., Disney M., Raunonen P. 2015. SimpleTree-An Efficient Open Source Tool to Build Tree Models from TLS Clouds. *Forests* 6: 4245-4294. DOI: <https://doi.org/10.3390/f6114245>.
- Hallé F. 2001. *Branching in Plants*: Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Hallé F., Oldeman R. A. A. 1970. *Essai sur l'Architecture et la Dynamique de Croissance des Arbres Tropicaux*. Paris, Masson.
- Hallé F., Oldeman R. A. A., Tomlinson P. B. 1978. *Tropical trees and forests: an architectural analysis*. Springer-Verlag, Berlin.
- Jackson T., Shenkin A., Kalyan B., Zions J., Calders K., Origo N., Disney M., Burt A., Raunonen P., Malhi Y. 2019a. A new architectural perspective on wind damage in a natural forest. *Frontiers in Forests and Global Change* 1. DOI: <https://doi.org/10.3389/ffgc.2018.00013>.
- Jackson T., Shenkin A., Wellpott A., Calders K., Origo N., Disney M., Burt A., Raunonen P., Gardiner B., Herold M., Fourcaud T., Malhi Y. 2019b. Finite element analysis of trees in the wind based on terrestrial laser scanning data. *Agricultural and Forest Meteorology* 265: 137-144. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.11.014>.
- Kędra K. 2019. *Modele stosowane do opisu architektury drzew i możliwości praktycznego wykorzystania*. Rozprawa doktorska. APD UR, Kraków.
- Kędra K., Barbeito I., Dassot M., Vallet P., Gazda A. 2019. Single-image photogrammetry for deriving tree architectural traits in mature forest stands: a comparison with terrestrial laser scanning. *Annals of Forest Science* 76: 5. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-018-0783-x>.
- Kędra K., Barbeito I., Gazda A. 2016. New angular competition index and tree crown projection model. 2016 IEEE International Conference on Functional-Structural Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (FSPMA): 106-109.
- Lee C. A., Voelker S., Holdo R. M., Muzika R. M. 2014. Tree architecture as a predictor of growth and mortality after an episode of red oak decline in the Ozark Highlands of Missouri, U.S.A. *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere* 44: 1005-1012. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2014-0067>.
- Liang X. L., Wang Y. S., Jaakkola A., Kukko A., Kaartinen H., Hyyppä J., Honkavaara E., Liu J. B. 2015. Forest Data Collection Using Terrestrial Image-Based Point Clouds From a Handheld Camera Compared to Terrestrial and Personal Laser Scanning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 53: 5117-5132. DOI: <https://doi.org/10.1109/tgrs.2015.2417316>.
- Liang X. L., Wang Y. S., Pyörälä J., Lehtomäki, M., Yu X. W., Kaartinen H., Kukko A., Honkavaara E., Issaoui A. E. I., Nevalainen O., Vaaja M., Virtanen J. P., Katoh M., Deng S. Q. 2019. Forest in situ observations using unmanned aerial vehicle as an alternative of terrestrial measurements. *Forest Ecosystems* 6. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40663-019-0173-3>.
- Loehle C. 2016. Biomechanical constraints on tree architecture. *Trees-Structure and Function* 30: 2061-2070. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-016-1433-2>.
- Martin-Ducup O., Schneider R., Fournier R. A. 2016. Response of sugar maple (*Acer saccharum*, Marsh.) tree crown structure to competition in pure versus mixed stands. *Forest Ecology and Management* 374: 20-32. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.04.047>.
- Martin-Ducup O., Schneider R., Fournier R. A. 2018. Analyzing the Vertical Distribution of Crown Material in Mixed Stand Composed of Two Temperate Tree Species. *Forests* 9. DOI: <https://doi.org/10.3390/f9110673>.
- Matthäck C. 1998. *Design in Nature: Learning from Trees*. Springer, Berlin.
- Oldeman R. A. A. 1990. *Forests: elements of silvology*. Springer-Verlag, Berlin.
- Parsons R. A., Mell W. E., McCauley P. 2011. Linking 3D spatial models of fuels and fire: Effects of spatial heterogeneity on fire behavior. *Ecological Modelling* 222: 679-691. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.10.023>.
- van de Peer T., Verheyen K., Kint V., Van Cleemput E., Muys B. 2017. Plasticity of tree architecture through interspecific and intraspecific competition in a young experimental plantation. *Forest Ecology and Management* 385: 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.11.015>.
- Piboule A., Collet C., Frochot H., Dhote J. F. 2005. Reconstructing crown shape from stem diameter and tree position to supply light models. I. Algorithms and comparison of light simulations. *Annals of Forest Science* 62: 645-657. DOI: <https://doi.org/10.1051/forest:2005071>.

- Poorter L., Bongers L., Bongers F. 2006. Architecture of 54 moist-forest tree species: Traits, trade-offs, and functional groups. *Ecology* 87: 1289-1301. DOI: [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2006\)87\[1289:aomtst\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2006)87[1289:aomtst]2.0.co;2).
- Poorter L., Bongers F., Sterck F. J., Woll H. 2003. Architecture of 53 rain forest tree species differing in adult stature and shade tolerance. *Ecology* 84: 602-608. DOI: [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2003\)084\[0602:aorfts\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2003)084[0602:aorfts]2.0.co;2).
- Pregitzer K. S., DeForest J. L., Burton A. J., Allen M. F., Ruess R. W., Hendrick R. L. 2002. Fine root architecture of nine North American trees. *Ecological Monographs* 72: 293-309. DOI: <https://doi.org/10.2307/3100029>.
- Pretzsch H., Biber P., Uhl E., Dahlhausen J., Rötzer T., Caldentey J., Koike T., van Con T., Chavanne A., Seifert T., du Toit B., Farnden C., Pauleit S. 2015. Crown size and growing space requirement of common tree species in urban centres, parks, and forests. *Urban Forestry & Urban Greening* 14: 466-479. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.04.006>.
- Pyörälä J., Liang X. L., Saarinen N., Kankare V., Wang Y. S., Holopainen M., Hyypä J., Vastaranta M. 2018. Assessing branching structure for biomass and wood quality estimation using terrestrial laser scanning point clouds. *Canadian Journal of Remote Sensing* 44: 462-475. DOI: <https://doi.org/10.1080/07038992.2018.1557040>.
- Raumonen P., Kaasalainen M., Akerblom M., Kaasalainen S., Kaartinen H., Vastaranta M., Holopainen M., Disney M., Lewis P. 2013. Fast Automatic Precision Tree Models from Terrestrial Laser Scanner Data. *Remote Sensing* 5: 491-520. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs5020491>.
- de Reffye P., Houllier E., Blaise F., Barthélémy D., Dauzat J., Auclair D. 1995. A model simulating above-ground and belowground tree architecture with agroforestry applications. *Agroforestry Systems* 30: 175-197.
- Room P. M., Maillette L., Hanan J. S. 1994. Module and metamer dynamics and virtual plants. *Advances in Ecological Research* 25 (25): 105-157. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0065-2504\(08\)60214-7](https://doi.org/10.1016/s0065-2504(08)60214-7).
- Rust S., Roloff A. 2002. Reduced photosynthesis in old oak (*Quercus robur*): the impact of crown and hydraulic architecture. *Tree Physiology* 22: 597-601.
- Sievänen R., Godin C., DeJong T. D., Nikinmaa E. 2014. Functional-structural plant models: a growing paradigm for plant studies. *Annals of Botany* 114: 599-603. DOI: <https://doi.org/10.1093/aob/mcu175>.
- Stützel H., Kahlen K. 2016. Editorial: Virtual Plants: Modeling Plant Architecture in Changing Environments. *Frontiers in Plant Science* 7. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01734>.
- Sumida A., Terazawa I., Togashi A., Komiyama A. 2002. Spatial arrangement of branches in relation to slope and neighbourhood competition. *Annals of Botany* 89: 301-310. DOI: <https://doi.org/10.1093/aob/mcf042>.
- Takahashi K. 1996. Plastic response of crown architecture to crowding in understorey trees of two co-dominating conifers. *Annals of Botany* 77: 159-164. DOI: <https://doi.org/10.1006/anbo.1996.0018>.
- Tyree M. T. 1988. A dynamic model for water flow in a single tree: evidence that models must account for hydraulic architecture. *Tree Physiology* 4: 195-217.
- Tyree M. T., Ewers F. W. 1991. The hydraulic architecture of trees and other woody plants. *New Phytologist* 119: 345-360. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1991.tb00035.x>.
- Zimmermann M. H. 1978. Hydraulic architecture of some diffuse-porous trees. *Canadian Journal of Botany-Revue Canadienne De Botanique* 56: 2286-2295.