

WIRTUALNY OGRÓD – O KOMPUTEROWYM MODELOWANIU I WIZUALIZACJI DRZEW

THE VIRTUAL GARDEN – ON THE COMPUTER MODELLING AND VISUALISATION OF TREES

Agnieszka Ozimek

Politechnika Krakowska, Instytut Architektury Krajobrazu

Postępująca w ostatnich latach cyfryzacja wymusza na projektantach implementację narzędzi cyfrowych. Stopniowo pojawiają się systemy, które umożliwiają parametryczne generowanie modeli, czy to architektonicznych, jak BIM (ang. *Building Information Model*), czy dotyczących krajobrazu – LIM (ang. *Landscape Information Model*).

Problematyka komputerowego modelowania krajobrazu jest bardzo rozległa. Obejmuje całe spektrum zagadnień dotyczących form terenu oraz jego pokrycia, w tym obiektów o charakterze kulturowym i przyrodniczym. W opracowaniu omówiono zagadnienia dotyczące tworzenia trójwymiarowych modeli drzew, w tym szczególnie struktur bazujących na L-systemach. Dzięki wykorzystaniu liczb losowych, a z drugiej strony – bardzo precyzyjnemu opisowi gramatyki przestrzennej, pozwalają one na generowanie niepowtarzalnych okazów drzew, które jednocześnie zachowują cechy charakterystyczne dla określonego gatunku. Porównano i oceniono dwa programy służące tworzeniu modeli drzew.

Słowa kluczowe: *Modelowanie drzew, L-system, Blender, 3DS Max, LIM.*

Recently, digital techniques have made a rapid progress, forcing designers to implement numerical tools. Gradually, the systems appear, which allow generation of parametric models, whether in architecture – BIM (Building Information Model), or in landscape architecture – LIM (Landscape Information Model).

In case of landscape the problem of computer modelling is very complex. It covers the whole spectrum of issues, starting from the landform to its cover, including objects of cultural and natural heritage. The paper discusses the issues concerning creation of three-dimensional models of trees, particularly, structures basing on L-systems. Thanks to the use of random numbers, and, on the other hand, very precise description of the spatial grammar, they enable creation of the unique examples of trees, which at the same time have the characteristics of the given species. Two programs for the generation of tree models were compared and evaluated.

Key words: *Trees modelling, L-system, Blender, 3DS Max, LIM.*

Wprowadzenie

W ostatnich latach nastąpił dynamiczny rozwój technologii cyfrowych, które coraz odważniej wkraczają do wszystkich dziedzin. Podążają za tym także wymogi prawne, które zobowiązują projektantów do wykonywania dokumentacji zgodnie ze standardami definiowanymi dla architektury jako BIM (ang.: *Building Information Modeling*) (Ruffle 1985: 385-389), a dla architektury krajobrazu – jako LIM (ang.: *Landscape Information Modeling*) (Sipes 2014: 3, 22, 30, 36).

W tym ostatnim przypadku standardy są jeszcze niedopracowane, zatem pozostaje tu obszerne pole badawcze, obejmujące zarówno dobór, jak i tworzenie odpowiednich narzędzi programistycznych służących do analiz, zestawień czy opracowywania projektów. Samo pojęcie modelowania krajobrazu można różnie interpretować, czy to jako tworzenia najprostszych, czysto fizycznych modeli (wizualizacji), czy szerzej – kreowania modeli funkcjonalnych (których przykładem może być model widoczności), albo też podejmowania prób w zakresie modelowania zjawisk zachodzących w przestrzeni lub w czasie (Ozimek i in. 2013: 67-88).

Należy mieć zawsze na uwadze, że wieloznaczne pojęcie „model”, zgodnie ze słownikową definicją, oznacza między innymi: *wzór, według którego coś jest lub ma być wykonane lub konstrukcję, schemat lub opis ukazujący działanie, budowę, cechy, zależności jakiegoś zjawiska lub obiektu* (Słownik języka polskiego 2016). Model będzie zatem zawsze pewnym przybliżeniem rzeczywistości. W związku z tym podejmując zadanie polegające na stworzeniu jakiegoś modelu, należy dokładnie sprecyzować wymagania, jakie ma on spełniać. Jest to warunek konieczny (choć nie zawsze wystarczający), aby zagwarantować użyteczność modelu jako ekwiwalentu rzeczywistego przedmiotu lub zjawiska. Jeżeli zatem naszym przedmiotem zainteresowania staje się krajobraz, pierwszym krokiem badawczym powinna być dogłębna analiza jego charakteru.

Na przeważających obszarach naszego kraju, krajobrazy czy to zurbanizowane, czy otwarte, zostały w znacznym stopniu przekształcone przez człowieka. Ogólnie można stwierdzić, że ich składowe można podzielić na tworzywo kulturowe, obejmujące budynki i infrastrukturę techniczną oraz tworzywo przyrodnicze, roślinne, pochodzenia naturalnego. Warto w tym miejscu nadmienić, że to drugie także w większości można zakwalifikować jako antropogeniczne. Krajobrazy pierwotne mają w Polsce charakter unikatowy (Bogdanowski, Łuczyńska-Bruzda i Novák 1973: 30-33).

O ile dosłownie rozumiane modelowanie obiektów architektonicznych jest zadaniem stosunkowo prostym, ze względu na fakt, że składają się z brył geometrycznych, o tyle komputerowe modelowanie roślin stanowi nie lada wyzwanie. W wielu projektach można zauważyć formy znacznie uproszczone, sprowadzone do brył geometrycznych. W innych pojawiają się modele bardziej złożone, a co za tym idzie – znacznie bardziej pracochłonne. Z tego względu często są one powielane, w wyniku czego ostateczny efekt, charakteryzujący się niespotykaną w naturze, mechaniczną powtarzalnością form, nie jest zadowalający.

Należy podkreślić, że nie zawsze osiągnięcie pełnego realizmu drzew czy krzewów jest celowe. Graficzna prezentacja tego typu elementów może służyć różnym celom, jak na przykład:

- wizualizacja wiedzy, ukierunkowana na porównania, zestawienia, czy zarządzanie, w której wykorzystana może być symboliczna reprezentacja roślin;

- wizualizacja idei projektowej, gdzie wystarczające będą „ideogramy” roślin pozwalające zrozumieć koncepcję;
- renderingi i wizualizacje dla klientów, lub decydentów.

Jedynie w ostatnim przypadku istotne okazuje się wierne oddanie wrażenia wizualnego, jakie ma wywoływać projekt. Jak wspomniano powyżej, modelowanie określonych okazów roślin jest bardzo złożone, a trudności z nim związane wynikają przede wszystkim z ich skomplikowanej geometrii (co implikuje duże zapotrzebowanie na moc obliczeniową komputera), znacznej liczby elementów składowych (gałęzi i liści), a przede wszystkim z niepowtarzalności pojedynczych okazów przy zachowaniu ogólnych cech danego gatunku.

Systemy Lindenmayera (L-systemy)

W 1968 roku węgierski biolog, Aristid Lindenmayer opracował metody generowania struktur, które w późniejszych latach zostały od jego nazwiska nazwane L-systemami (lub systemami Lindenmayera) (Lindenmayer 1978: 37-81). Te zestawy reguł produkcji grafiki formalnej, zapewniają stosunkowo dobre rezultaty w przypadku modelowania roślin. „Produkcję” można rozumieć jako zasadę przekształcenia. Będziemy mieć zatem do czynienia z graficznymi symbolami oraz metodami ich transformacji, które w kolejnych iteracyjnych powtórzeniach będą pozwalać na tworzenie nowych form. Ogólnie L-systemy można podzielić na deterministyczne (DOL), gdzie dla danego elementu istnieje tylko jedna reguła produkcji oraz stochastyczne, w których istnieje kilka reguł produkcji, a każda z nich ma określone prawdopodobieństwo zastosowania (Lindenmayer i Jürgensen 1992: 3-24).

Poniżej przedstawiono najprostszy przykład L-systemu bezkontekstowego deterministycznego:

- Alfabet: A
- Symbol startowy: A
- Produkcja: $A \rightarrow AA$

Produkcja polega w tym przypadku na powieleniu symbolu. W tak określonej gramatyce otrzymamy następujące efekty:

- Pierwsza iteracja: A
- Druga: AA
- Trzecia: AA AA
- Czwarta: AA AA AA AA (Lindenmayer i Jürgensen 1992: 3-24).

W grafice komputerowej zaimplementowano te reguły określając je mianem „grafiki żółwia”. Można wyobrazić sobie, że to zwierzę będzie obracać się i poruszać zgodnie z regułami zdefiniowanymi przez twórcę systemu, a przy każdym kroku będzie pozostawiać ślad w postaci linii.

Stan żółwia opisany jest parametrami: (x, y, z, α) , gdzie (x, y, z) oznaczają współrzędne w przestrzeni, czyli położenie żółwia, a α to kierunek, który jest uznawany jako przód. Trzeba także ustawić następujące parametry:

- d – długość linii rysowanej w pojedynczym kroku,
- δ – kąt, o jaki żółw obraca się podczas obrotów.

Algorytm zawiera instrukcje dla ruchów, z których najprostsze to:

- F – przesunąć się do przodu, rysując linię,
- f – przesunąć się do przodu, bez rysowania linii,
- + – skrócić w lewo o kąt α ,

- - skręć w prawo o kąt α
- [] – utwórz rozgałęzienie (Gajek, 2010: 69-75).

Przykładowy efekt, jaki można uzyskać z użyciem L-systemu przedstawiono poniżej (ryc. 1). Jest to struktura, przy realizacji której wykorzystano darmowy program udostępniony w celach edukacyjnych przez Edmunda Weitzę (Weitz 2016).



X -> F(-(X)+X) F(+FX)-X
 F -> FF
 Axiom: X
 Angle: 30
 StartAngle: 90

Ryc. 1. Instrukcja dla L-systemu oraz efekt otrzymany po 7 kolejnych iteracjach (oprac. A. Ozimek)

Analizując instrukcję można zauważyć, że rysunek rozpoczyna się od linii narysowanej pod kątem 90^0 , a w kolejnych krokach generowane są linie rozgałęziające się pod kątem 30^0 względem poprzedniego segmentu. Po 7 iteracjach, czyli powtórzeniach całej procedury, powstaje obraz przypominający roślinę.

Modelowanie drzew za pomocą L-systemów

Pomysł tworzenia takich dwuwymiarowych struktur został rozwinięty i na jego bazie stworzono modele trójwymiarowe. Warto w tym miejscu wspomnieć przełomowe dzieło, autorstwa Aristida Lindenmayera oraz polskiego informatyka, Przemysława Prusinkiewicza zatytułowane *The Algorithmic Beauty of Plants* (Prusinkiewicz i Lindenmayer 1990). Książka opublikowana 36 lat temu zaskoczyła czytelników przykładami realistycznie (zwłaszcza jak na owe czasy) wyglądających roślin. Nie trudno sobie wyobrazić, że proste matematyczne instrukcje nie mogły sprostać tak skomplikowanemu zadaniu. Aby przełamać tę geometryczną „sztywność” wprowadzono parametr losowości kątów, pod jakimi rozgałęziały się struktury i długości poszczególnych fragmentów konarów, gałęzi i pędów. Zastosowano zatem modele deterministyczno-stochastyczne. Zmienna liczba losowa umożliwiła generowanie unikatowych okazów danego gatunku, które jednak spełniają ogólne zasady budowy całej struktury. Można na przykład określić, że dany gatunek ma konary wznoszące się ku górze, a zarazem każdy z nich będzie uniesiony pod nieco innym kątem. Aby stworzyć model, który będzie przypominał lipę lub brzozę trzeba więc uprzednio przestudiować i zrozumieć budowę takiego drzewa, poczynając od kształtu pnia, poprzez formy konarów, gałęzi i pędów, a na ustawieniu i kształcie

liści skończywszy, czyli strukturę jego części nadziemnej (Fabijanowska, 2014: 11). Ryc. 2 ilustruje wpływ zmiany liczby losowej *seed* na wygenerowany model. Warto zauważyć, że wszystkie okazy mają podobną strukturę: rozgałęziają się nisko nad ziemią, gałęzie są raczej proste, lekko łukowato wygięte, a pędy – wzniesione (Seneta i Dolatowski 2000: 487).



Ryc. 2 Bez czarny (*Sambucus nigra*) – wpływ zmiany losowej na geometrię modelu (oprac. A. Ozimek)

L-system w środowisku programu Blender

Obecnie idea L-systemów została zaimplementowana w różnych programach graficznych, z których wybrano i porównano dwa, które diametralnie różnią się podejściem do modelowania i sposobem interakcji z użytkownikiem. Jeden z nich to dodatek do darmowego programu Blender, który stanowi środowisko wykorzystywane przy tworzeniu grafiki trójwymiarowej, wizualizacji, animacji, a nawet gier komputerowych. Ze względu na niezbyt intuicyjny interfejs, nie cieszy się on jednak wielką popularnością wśród projektantów.

Dodatek *Sapling* (w tłumaczeniu „sadzionka”) nie wymaga dodatkowej instalacji, a jedynie uruchomienia w ustawieniach Blendera. Generowanie rośliny polega na wpisywaniu parametrów liczbowych w kolejnych formularzach. Można wybrać prototyp rośliny spośród czterech wzorców, opisanych jako: *black tupelo* (*Nyssa sylvatica* – błotnia leśna), *black oak* (*Quercus kelloggii* – czarny dąb kalifornijski), *quaking aspen* (*Populus tremuloides* – topola osikowa), *willow* (*Salix x sepulcralis* – wierzba płacząca). Choć trzy pierwsze gatunki nie występują w Europie, a ich pochodzenie jest typowo północnoamerykańskie, jednak możliwość modyfikacji szkieletu rośliny pozwala na tworzenie drzew, które mogą zostać wykorzystane w symulacjach elementów polskiego, rodzimego krajobrazu.

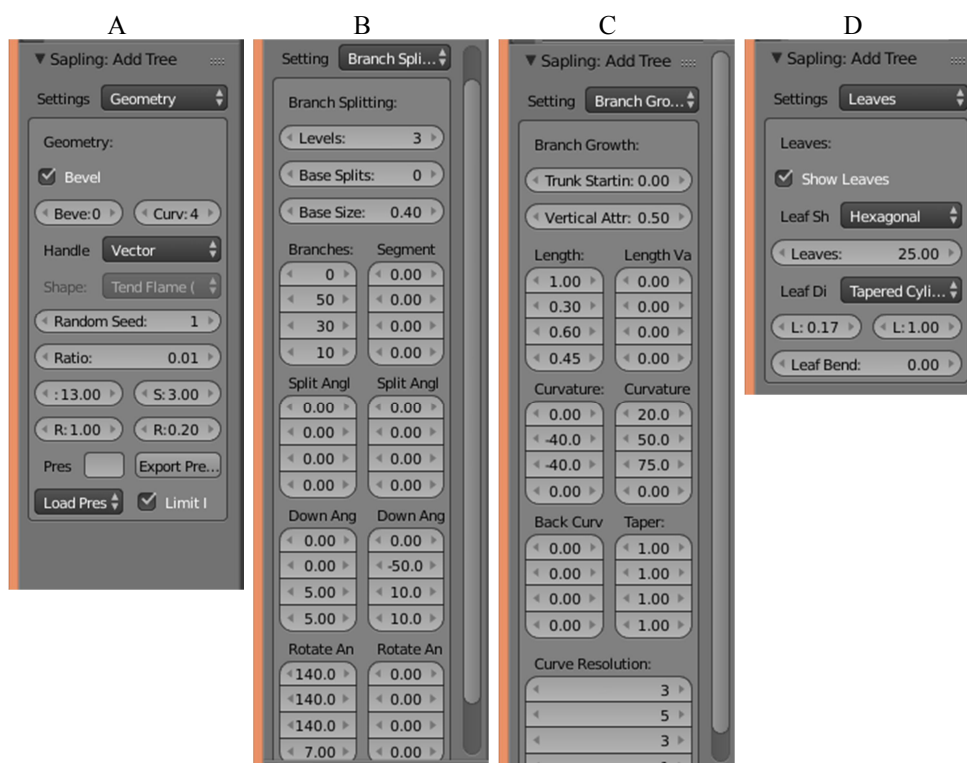
Proces tworzenia modelu drzewa podzielono na etapy, które w interfejsie użytkownika rozróżniono za pomocą kolejnych okien dodatku *Sapling*. Model jest generowany na podstawie parametrów, które użytkownik wpisuje w kolejnych formularzach (ryc. 3).

Pierwszym krokiem jest ustalenie ogólnej geometrii rośliny (ryc. 3A). Tu można dobrać jego wysokość oraz ogólny pokrój, ustalić stopień wyokrąglenia pnia i gałęzi, czy grubość pnia. Mamy też po raz pierwszy do czynienia z parametrami loso-

wości: liczbą losową *seed*, która pozwoli na zmianę kątów i długości poszczególnych części składowych drzewa (aby poszczególne okazy różniły się między sobą) oraz wariancją – statystyczną miarą rozrzutu danych (Sobczyk 1997: 45-49). Jeżeli wariancja będzie zbyt duża, to każda zmiana parametru *seed* spowoduje, że wygenerowany model będzie znacząco różnił się od innych. Jeżeli zatem naszym zamiarem jest ustalenie reguł geometrycznych, jakimi rządzi się wybrany gatunek, wariancja powinna być niewielka.

W kolejnym oknie określa się rozgałęzienia (ryc. 3B). Tu należy ustalić liczbę poziomów elementów (np. trzy poziomy odpowiadają: konarom, gałęziom i pędem) oraz proporcje pnia i korony. Dla każdego poziomu definiuje się po pierwsze liczbę powstających na nim elementów, ale też liczbę segmentów, z których każdy element ma się składać oraz kąty, pod jakimi z większych elementów wyrastają mniejsze. W tym ostatnim przypadku możliwe jest też dodanie pewnego stopnia swobody – zależnej od wielkości wariancji.

Okno przedstawione na ryc. 3C pozwala na sterowanie „wzrostem” gałęzi. Tu też ustawienia będą dotyczyć poszczególnych poziomów. Wybrane wartości będą wpływać na długości segmentów i ich ewentualną krzywiznę. Dzięki tym parametrom program zapewnia możliwość tworzenia gałęzi prostych oraz krętych, wijących się. Także i w tym przypadku można wprowadzić losowość w określonym zakresie.



Ryc. 3. Okna dodatku *Sapling*: A) ogólna geometria drzewa, B) rozgałęzienia, C) wzrost gałęzi, D) liście (oprac. A. Ozimek)

Ostatnie z okien odpowiada za liście (ryc. 3D). Są one modelowane schematycznie za pomocą płaskich prostokątów (o dowolnych proporcjach) lub regularnych sze-

ściokątów (które mogą zostać wydłużone wzdłuż osi symetrii). Liście mogą podlegać skalowaniu (w wyniku czego otrzymujemy większe lub mniejsze obiekty), ale też zginaniu. Twórca modelu ma możliwość wyboru liczby liści na każdej gałęzi oraz określenia sposobu rozmieszczenia (dystrybucji) liści w obrębie korony drzewa.

Ze względu na znaczną liczbę liści na każdym zdrowym drzewie (szczególnie na okazie dojrzałym), zwykle modelowane są duże powierzchnie, a następnie na każdą z nich nakłada się kilka, a nawet kilkanaście liści. Taki zabieg pozwala uzyskać model o mniejszej złożoności geometrycznej. Program oferuje też możliwość formowania oraz animacji rośliny.

Na kolejnej ilustracji przedstawiono zestawienie modelu czarnego bzu, który może przybierać postać krzewu lub niskiego drzewa (Seneta i Dolatowski 2000: 487), z fotografią tej rośliny (odpowiednio ryc. 4A i 4B). Można zauważyć, że model wykazuje podobieństwo do rzeczywistego wzorca w zakresie ogólnej struktury, natomiast w drobnych detalach występują liczne niedokładności. Wszystkie obłe części drzewa są modelowane za pomocą graniastosłupów. Ponadto brak poszerzeń u nasady konarów i gałęzi. „Mapowanie” dużej liczby liści, czyli odpowiednie ułożenie na nich materiału (fotografii) w taki sposób, by wydawały się wyrastać z pędów, byłoby zadaniem niezwykle żmudnym, gdyż trzeba by było przesunąć każdy z obrazów. Dlatego niektóre z liści nie stykają się ze strukturą drzewa. Bardziej złożone struktury drzew lub zbyt duża liczba liści, uniemożliwiają eksport struktury drzewa do pliku. Wygenerowany model może być zapisany w kilku różnych, niestety starszych, formatach graficznych, w związku z tym zachodzi konieczność importu do aktualnych wersji popularnych programów.



Ryc. 4A) Model bzu czarnego w stanie ulistnionym oraz 4B) Fotografia przedstawiająca rzeczywisty okaz rośliny (oprac. A. Ozimek)

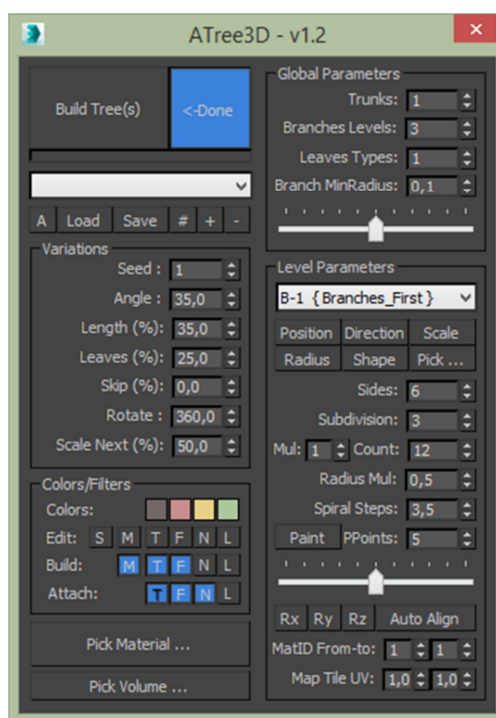
Jako kolejny gatunek wymodelowano robinie akacjową (*Robinia pseudoacacia*). Tu także pierwszy etap musiał polegać na przestudiowaniu i zrozumieniu kon-

strukcji drzewa. Cechy charakterystyczne robinii to stosunkowo nisko rozgałęziony pień oraz nieregularna, luźna korona (ryc. 5) (Seneta i Dolatowski 2000: 317).



Ryc. 5. Robinia akacja – model stworzony w programie Blender: A) Drzewo w stanie bezlistnym, B) Drzewo w stanie ulistnionym, C) Fotografia okazu robinii (oprac. A. Ozimek)

Aplikacja w środowisku programu 3DS Max



Ryc. 6. Interfejs aplikacji *ATree3D* (oprac. A. Ozimek)

W bardzo popularnym środowisku graficznym 3DS Max (które może być nieodpłatnie wykorzystywane w celach dydaktycznych i edukacyjnych) można w prosty sposób tworzyć rośliny, bazujące na L-systemach. Niestety, ze względu na to, że program został wykonany przez programistów amerykańskich, gotowe wzorce, z których można korzystać, raczej nie odpowiadają roślinom, charakterystycznym dla naszego rodzimego krajobrazu.

Darmowy dodatek *ATree3D*, wyprodukowany przez firmę Aviz Studio i służący do modelowania drzew, został wyposażony w interfejs o zupełnie innej „filozofii” niż *Sapling*. Jest to „wtyczka” (plug-in), którą należy doinstalować, gdyż nie stanowi integralnej części wspomnianego środowiska (ryc. 6).

Domyślny schemat drzewa jest nieco naiwny, jednak można dowolnie go modyfikować. Tu także występuje podział na poszczególne części struk-

tury drzewa: pień, konary, gałęzie, pędy, liście. Każdy ze wspomnianych elementów jest oddzielnie opracowywany, ale praca nad nimi ma charakter interaktywny. Użytkownik został wyposażony w narzędzia pozwalające na podgląd wykonywanych operacji i uzyskiwanych efektów. Możemy zatem kontrolować (a nawet rysować z użyciem myszki komputerowej) kształty pnia, konarów, gałęzi i pędów. Mamy od dyspozycji graficzną pomoc, która pozwala ustawiać kierunki elementów struktury drzewa i ich położenie oraz skalę. Program umożliwia dowolne poszerzanie poszczególnych części składowych elementów drzewa, dzięki czemu można uformować odpowiedni kształt korony. Liście mają klasyczną owalną, lekko wygiętą formę, nie podlegającą modyfikacji. Niestety program jest niestabilny i próby tworzenia bardziej złożonych modeli o wielu pniach, jak na przykład krzewy, powodują błędy w interpretacji kodu, w wyniku czego program przestaje działać. Problemy pojawiają się przy większej liczbie liści, w którym to przypadku nawet najprostsze operacje graficzne zajmują bardzo dużo czasu. Modele, które natywnie są zapisywane w formacie .max (nowy standard dla programu 3DS Max), można eksportować do wszystkich popularnych środowisk graficznych.

Na ryc. 7 przedstawiono próbę stworzenia modelu robinii akacjowej w omawianym programie. Porównując pliki zawierające modele wykonane w programach Blender (z dodatkiem *Sapling*) i 3DS Max (z wtyczką *ATree3D*) można zauważyć, że pierwsze z nich mają znacznie mniejszą objętość. Jest to zrozumiałe, gdyż wszystkie części rośliny, które są zbliżone kształtem do walca lub stożka (pień, konary, gałęzie) są znacznie mniej wyokrąglone, a liście mają kształt płaski i uproszczony geometrycznie. Dzięki temu ich powierzchnie są mniej złożone, a do zbudowania ich potrzeba mniej danych.



Ryc. 7. Robinia akacjowa – model stworzony w aplikacji *ATree3D*: A) drzewo w stanie bezlistnym, B) drzewo w stanie ulistnionym (oprac. A. Ozimek)

Podsumowanie

Przedstawione algorytmy modelowania drzew z jednej strony wykorzystują z góry określone, deterministyczne parametry i gramatyki, czyli metody ich zestawiania, a z drugiej – zakładają określony stopień swobody, losowości tych parametrów. Dzięki temu może być uwzględniony jeden z warunków, który powinny spełniać modele drzew, to znaczy występująca w przyrodzie niepowtarzalność okazów należących do określonego gatunku, gdyż na wzrost poszczególnych roślin może mieć wpływ szereg lokalnych czynników genetycznych lub środowiskowych. W przypadku L-systemów za tę różnorodność odpowiada liczba losowa. Analizując zagadnienie należy stwierdzić, że używając ich można generować kolejne okazy roślin za pomocą jednego „kliknięcia” (zmiany parametru *seed*). Trzeba jednak pamiętać, że operacje losowe są nieodwracalne, zatem po zakończeniu tworzenia modelu nie można go już modyfikować. W tabeli zamieszczonej poniżej podjęto próbę zestawienia charakterystycznych cech opisanych narzędzi do generowania modeli drzew.

Tab. 1. Porównanie cyfrowych narzędzi do tworzenia modeli drzew na bazie L-systemów (oprac. A. Ozimek)

<i>Sapling</i>	<i>ATree3D</i>
Program darmowy (<i>open source</i>)	Program darmowy, działający w środowisku bezpłatnym dla celów niekomercyjnych
Interfejs z formularzami o niezbyt intuicyjnych parametrach	Interfejs interaktywny z podglądem efektu modyfikacji
Wybór i modyfikacja 1 z 4 prototypów roślin	Modyfikacja 1 schematu wyjściowego
Wybór ogólnego pokroju korony drzewa	Możliwość uzyskania dowolnego pokroju korony drzewa poprzez zmianę średnicy poszczególnych części korony
Dowolne miejsce rozgałęzienia pnia, liczba pni (kłód)	Jeden pień główny z możliwością dosyć pracochłonnego dodawania rozgałęzień (jako osobnych pni)
Ustawianie kątów, długości i kształtów gałęzi jako parametrów liczbowych	Interaktywne ustawianie kątów, długości i kształtów gałęzi za pomocą myszki komputerowej. Możliwość odręcznego rysowania kształtu pnia, konarów i gałęzi oraz zmiany średnic ich poszczególnych fragmentów.
Prostokątny lub sześciokątny kształt liścia z możliwością deformacji	Jeden kształt liścia (owalny, wygięty)
Eksport do starszych wersji programów	Możliwość zapisu w programie 3DS Max oraz eksportu do innych programów
Trudności z eksportem bardziej złożonych modeli	Problemy ze stabilnością programu i interpretacją jego kodu w przypadku bardziej złożonych modeli
Małe pliki – o wielkości kilkuset kilobajtów do 2 megabajtów	Pliki o wielkości kilku, a nawet kilkunastu megabajtów

Podsumowując, programy wykorzystujące L-systemy mogą stanowić efektywne narzędzie w zakresie modelowania i wizualizacji drzew, jednak narzędzia obecnie dostępne nie są jeszcze doskonałe. Architekci krajobrazu mogą je wykorzystywać jedynie w przypadku, gdy dysponują zarówno wiedzą informatyczną (szczególnie w przypadku dodatku *Sapling*), jak i dendrologiczną. Niestety niekomercyjne pro-

gramy nie zostały do tej pory wyposażone w odpowiednie biblioteki roślin występujących na terenie Polski, a nawet Europy.

Bibliografia:

- Bogdanowski, J., Luczyńska-Bruzda, M., Novák, Z. (1973). *Architektura krajobrazu*. Warszawa: PWN.
- Fabijanowska K. (2014). *Elementy naturalne środowiska. Tablice – drzewa, krzewy*, Kraków: Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej.
- Gąjek, S. (2010). *Modelowanie roślin przy użyciu języków formalnych*, Rocznik Kognitywistyczny, 2010/IV, Kraków: Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego. s. 69-75.
- Lindenmayer, A. (1978). *Algorithms for plants morphogenesis*, In: R. Sattler. *Theoretical plant morphology*. The Hague: Leiden University Press, pp. 37-81.
- Lindenmayer, A., Jürgensen H. (1992). *Grammars of development: discrete-state models for growth, differentiation and gene expression in modular organisms* In: G. Rozenberg, A. Salomaa. *Lindenmayer Systems: Impacts on Theoretical Computer Science, Computer Graphics, and Developmental Biology*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. pp. 3-24.
- Ozimek, P., Böhm, A., Ozimek, A. i Wańkiewicz W. (2013). *Planowanie przestrzeni o wysokich walorach krajobrazowych przy użyciu cyfrowych analiz terenu wraz z oceną ekonomiczną*. Kraków: Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej. s. 66-78.
- Prusinkiewicz P., Lindenmayer A. (1990). *The Algorithmic Beauty of plants*. New York: Springer-Verlag.
- Ruffle, S. (1985). *Architectural design exposed: from computer-aided-drawing to computer-aided-design*. „Environments and Planning B: Planning and Design”. 1986 March 7, pp. 385-389.
- Seneta W., Dolatowski J. (2000). *Dendrologia*. Wyd. 3. Warszawa: PWN.
- Sipes, J. (2014). *Integrating BIM Technology into Landscape Architecture*, 2nd edition. Washington: ASLA.
- *Słownik języka polskiego PWN*. (2016). [online]. Dostępny: <http://sjp.pwn.pl/szukaj/model.html> [dostęp: 8.06.2016]
- Sobczyk M. (1997). *Statystyka*. Wyd. 2. Warszawa: PWN.
- Weitz, E. (2016). *Lindenmayer systems* [online]. Dostępny: <http://www.weitz.de/lindenmayer/> [dostęp: 8.06.2016].