

Dawid Lubiszewski

L-SYSTEMY – PROSTY JĘZYK DLA ZŁOŻONYCH ZJAWISK

Historia L-systemów

Związki pomiędzy pięknem roślin a matematycznymi prawidłowościami fascynowały ludzkość od wieków¹. Jedną z tych właśnie osób, która połączyła piękno przyrody z matematycznym formalizmem, był węgierski biolog i botanik Aristid Lindenmayer (1925–1989). Poszukiwania uniwersalnych praw, którym podlega rozwój roślin, doprowadziły Lindenmayera do stworzenia w 1968 roku matematycznego formalizmu, za pomocą którego opisać można nie tylko wspomniany wzrost roślin, ale również tworzyć piękne fraktale. Ten formalny język nazywany jest na część swojego twórcy L-systemem (L od pierwszej litery nazwiska Lindenmayera), bądź systemem Lindenmayera. Występuje on również pod inną nazwą jako system równolegle przepisujący². Systemy Lindenmayera uznawane są za przykład dziedziny badań nazywanej sztucznym życiem i swoim działaniem przypominają automaty komórkowe³.

Budowa i zasada działania L-systemu

L-systemy wykorzystywane są do różnych celów, jednakże budowa każdego z nich jest taka sama. Na formalny zapis L-systemu składa się:

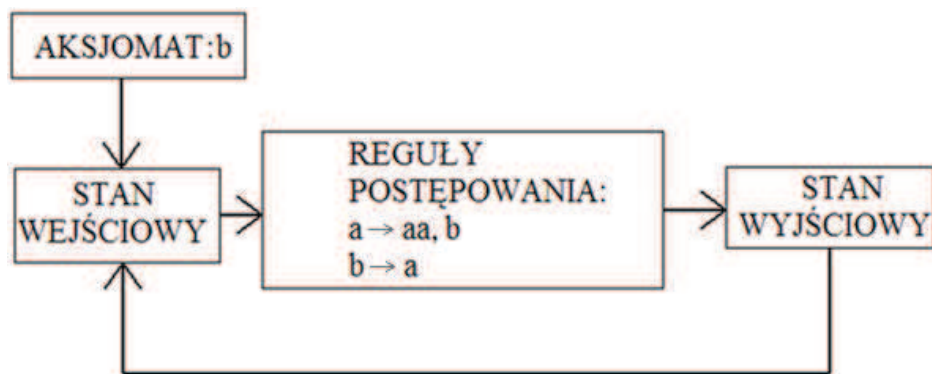
¹ P. Prusinkiewicz, A. Lindenmayer, *The Algorithmic Beauty of Plants*, Springer-Verlag, Nowy Jork 2004, s. 5.

² H. Peitgen, H. Jürgens, D. Saupe, *Granice chaosu. Fraktale. Część druga*, przeł. K. Pietruska-Paługa, K. Winkowska-Nowak, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1996, s. 21–22.

³ C. Macal, *Agent Based Modeling and Artificial Life*, [w:] *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, red. R. Meyers, Springer, Nowy Jork 2009, s. 119.

- a) *alfabet* – skończony zbiór symboli oznaczany literą V , który tworzą zazwyczaj pierwsze litery alfabetu (a, b, c , itd.), są to zmienne pojawiające się w L-systemie,
- b) *aksjomat* – nazywany też inicjatorem, oznaczany symbolem ω , który tworzyć mogą dowolne symbole ze zbioru V , definiuje on stan początkowy systemu,
- c) *procedura* – oznaczana przez literę P , opisuje sposób ewolucji układu, np. $P: a \rightarrow b$ oznacza, że w kolejnym cyklu zmienna a zostanie zastąpiona przez zmienną b , zmienna a jest więc poprzednikiem, a b następcą.

Mając na uwadze powyższe kwestie, formalny zapis L-systemu wygląda następująco: $G = (V, \omega, P)$. W przedstawionym opisie pojawił się zwrot „w kolejnym cyklu”, który nawiązuje do innej cechy wszystkich L-systemów, a mianowicie do bycia układem sprzężenia zwrotnego. Podobnie jak w innych układach sprzężenia zwrotnego mamy: cykl przygotowawczy (zerowy), kolejne cykle (iteracje), sygnały wejścia, sygnały wyjścia, procesor. Aby przeprowadzić symulację wzrostu roślin, należy wybrać zasady, czyli reguły postępowania. Aksjomat ω jest pierwszym sygnałem wejściowym, który jest przetwarzany przez procesor zgodnie z przyjętymi regułami. Stan wyjściowy staje się nowym stanem wejściowym, wobec którego ponownie stosuje się reguły postępowania. Po odpowiedniej ilości iteracji otrzymany wynik, jeśli nie jest już przedstawiony w postaci graficznej, należy poddać graficznej interpretacji. Na poniższym rysunku został objaśniony sposób działania L-systemu w oparciu o schemat działania sprzężenia zwrotnego (Rys. 1).



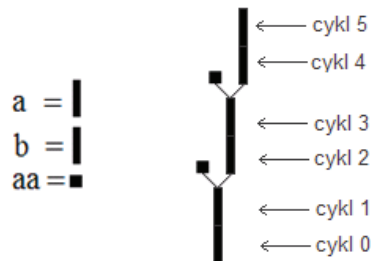
Rys. 1. Modelowanie wzrostu roślin w oparciu o sprzężenie zwrotne
Źródło: opracowanie własne

Aksjomat b jest stanem początkowym. Kolejny stan otrzymany zostaje poprzez zastosowanie odpowiednich reguł. Dla stanu wejściowego b otrzymany zostanie stan wyjściowy a , który stanie się nowym stanem wejściowym. Z niego natomiast otrzymany zostanie stan wyjściowy, składający się z dwóch elementów – aa i b . Ponieważ dla elementu aa nie ma żadnych reguł postępowania, to nowy stan wyjściowy powstanie z elementu b . Tym samym następuje powrót do początkowej sytuacji, która rozpoczęta została przez aksjomat b .

Interpretacje graficzne są niezależne od otrzymanego ciągu znaków. Jeżeli przeprowadzone zostanie pięć iteracji, opisanych według zasad przedstawionych na rysunku pierwszym, to wynikiem będzie następujący ciąg znaków (w nawiasach podano numer cyklu): (0) b , (1) a , (2) aa , b , (3) a , (4) aa , b , (5) a . Powstały ciąg symboli można interpretować graficznie w dowolny sposób i dostosowywać go do różnego rodzaju celów⁴. Jak pisze Peter Coveney i Roger Highfield:

„Piękno tej metody polega na tym, że reguły gramatyki [postępowania] nie określają ogólnego kształtu rośliny. Struktura po prostu wyłania się z obliczeń”⁵.

Jest to jedna z zalet stosowania L-systemów do modelowania procesów rozwoju. Rysunek 2 przedstawia wybraną interpretację graficzną dla otrzymanego wcześniej ciągu symboli.



Rys. 2. Graficzna transformacja otrzymanych wyników
Źródło: opracowanie własne

Formalny opis L-systemu wraz z ewolucją przedstawiono poniżej. Niech przykładem będzie ciąg Fibonacciego. W tym ciągu każda kolejna liczba jest sumą dwóch poprzednich. Ciągiem pierwszych siedmiu liczb będzie: 0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13. Natomiast za pomocą L-systemu ciąg ten prezentuje się następująco:

$$V = \{a, b\}$$

⁴ H. Peitgen, H. Jürgens, D. Saupe, dz. cyt., s. 30.

⁵ P. Coveney, R. Highfield, *Granice złożoności. Poszukiwania porządku w chaotycznym świecie*, przeł. P. Amsterdamski, Prószyński i S-ka, Warszawa 1997, s. 307.

$$\begin{aligned}\omega &= a \\ P_1 &= a \rightarrow b \\ P_2 &= b \rightarrow a, b.\end{aligned}$$

W systemie tym mamy dwie procedury: P_1 i P_2 . W wyniku zastosowania procedury pierwszej otrzymujemy jeden symbol wyjściowy z jednego wejściowego, zaś z procedury drugiej aż dwa symbole otrzymujemy na wyjściu. Zatem rozpoczynając od aksjomatu a , otrzymujemy następujący ciąg znaków (w nawiasach numer cyklu): brak (0), a (1), b (2), ab (3), bab (4) itd. Zliczając ilość symboli w otrzymanych sygnałach wyjściowych, otrzymamy liczby z ciągu Fibonacciego, co przedstawione zostało w tabeli 1.

Tabela 1. Porównanie ciągu symboli otrzymanego przez L-system z ciągiem Fibonacciego

Numer iteracji	Otrzymany ciąg symboli	Ilość symboli w ciągu	Ciąg Fibonacciego
0	<i>brak</i>	0	0
1	<i>a</i>	1	1
2	<i>b</i>	1	1
3	<i>ab</i>	2	2
4	<i>bab</i>	3	3
5	<i>babab</i>	5	5
6	<i>bababbab</i>	8	8
7	<i>abbabbababbab</i>	13	13

L-systemy zasłynęły jednak nie z odwzorowywania ciągu Fibbonaciego, a z możliwości graficznego opisu wzrostu roślin. Dysponując odpowiednim L-systemem, otrzymać można obrazy roślin, które będą wyglądały podobnie jak zdjęcia roślin rzeczywistych, i to do tego stopnia, że botanik będzie zdolny podać ich nazwę. Jak pisze Thiemo Krink: „Zadziwiające jest podobieństwo powstałych obrazów do rzeczywistych roślin, co więcej, L-systemy potrafią również naśladować procesy podobne do procesów wzrostu rzeczywistych roślin [...]”⁶.

Poniżej na rysunku trzecim przedstawiono wygenerowany za pomocą L-systemu krzew. Podobieństwo powstałego obrazu do tego, jaki spotkać moż-

⁶ T. Krink, *Complexity and the Computing Age: Can Computers Help Us to Understand Complex Phenomena in Nature?*, [w:] *The Significance of Complexity. Approaching a Complex World Thorough Science, Theology and the Humanities*, red. K. Niekerk, H. Buhl, Ashgate Publishing Limited, Aldershot 2004, s. 64 (tłumaczenie własne).

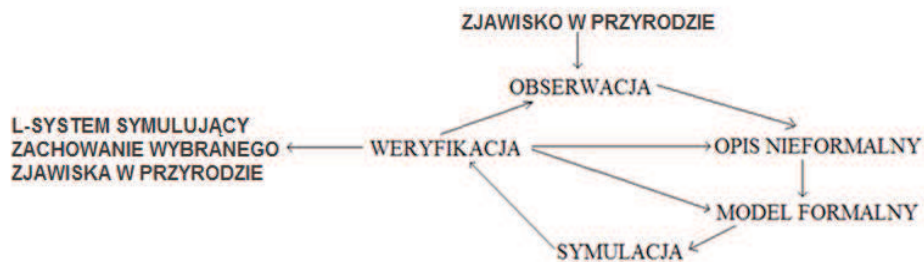
na w rzeczywistym świecie, prowadzi do kilku interesujących filozoficznie zagadnień. Zanim zostaną jednak one omówione przedstawiony zostanie proces tworzenia L-systemu.



Rys. 3. Krzew wygenerowany za pomocą L-systemu w programie ChaosPro 4.0

Metoda tworzenia L-systemu

Jedna z metod tworzenia L-systemu przypomina ogólną metodę tworzenia modeli komputerowych, symulujących rzeczywiste zjawiska. Metoda przedstawiona została poniżej w postaci graficznej (na rysunku 4) i składa się z następujących etapów:



Rys. 4. Schemat tworzenia L-systemów. Źródło: opracowanie własne

- 1) obserwacja wybranego obiektu w naturze,
- 2) ustalenie nieformalnych reguł rozwoju badanego obiektu,
- 3) stworzenie formalnego modelu, L-systemu, w oparciu o nieformalny opis,
- 4) przeprowadzenie symulacji powstałego L-systemu na komputerze,
- 5) interpretacja graficzna otrzymanych za pomocą symulacji wyników,

- 6) porównanie otrzymanego obrazu z obiektem występującym w naturze bądź z jego zachowaniem; jeżeli otrzymane wyniki różnią się od tych występujących w naturze, należy poprawić: opis nieformalny, opis formalny, bądź przeprowadzić na nowo obserwację obiektu w naturze⁷.

Prostota i złożoność

Za pomocą L-systemów odkryta została zdumiewająca własność pewnych zjawisk. Biochemiczne procesy, będące podstawą wzrostu roślin, są skomplikowane i złożone, jednakże efekt końcowy, czyli wzrost roślin, opisać można w bardzo prosty sposób. Ta nowa metoda opisu abstrahuje od złożonych procesów biologiczno-chemicznych zachodzących w roślinie, a mimo to pozwala odzwierciedlić zjawisko, które przez owe procesy jest zdeterminowane. Analizując zjawisko wzrostu roślin za pomocą L-systemów, przechodzimy więc na wyższy poziom opisu. Jak pisze Jack Cohen i Ian Stewart: „Reguły L-systemu wyrażają – w wyidealizowanej postaci – pewne głębokie matematyczne konsekwencje działania genetyki i chemii rośliny”⁸.

Dla filozofów przyrody jest to istotne odkrycie, gdyż pokazuje ono, iż opis pewnych zjawisk w przyrodzie, w możliwie najprostszym sposobie, adekwatnie przedstawiający interesujące nas zjawisko, może być uzyskany niezależnie od procesów, które rzeczywiście wpływają na powstanie owego zjawiska. Wniosek ten, wysunięty na szersze uniwersum zjawisk, może być jednak pesymistyczny. Jeśli bowiem przyjmujemy, że znajomość pewnych praw, które doskonale odzwierciedlają pewne zjawiska w przyrodzie, jest jedynie wyższym, czyli w pewien sposób abstrakcyjnym poziomem opisu, to dalecy będziemy od posiadania wiedzy, która rzeczywiście dotyczy mechanizmów leżących u podstaw badanych zjawisk. Ponadto uzyskanie prawdziwej wiedzy z tych abstrakcyjnych praw wydaje się być niemożliwe – przynajmniej z taką sytuacją mamy do czynienia w przypadku L-systemów.

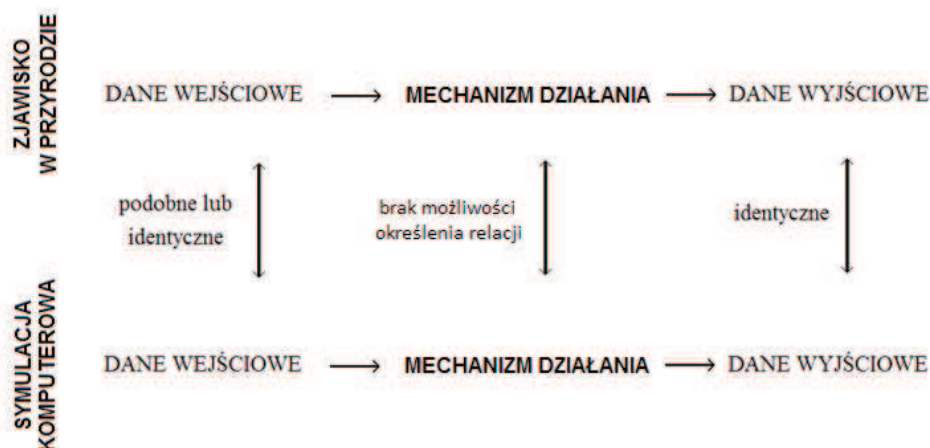
Zgodność modelu z rzeczywistością

Z powyższym zagadnieniem wiąże się kolejne, które znane jest już filozofom, a mianowicie problem zgodności zjawisk rzeczywistych z modelami komputerowymi je odzwierciedlającymi, który nawiązuje do zarzutów wysuwanych wobec klasycznej definicji prawdy. Na jakiej bowiem podstawie jesteśmy w stanie ocenić, nawiązując do definicji prawdy, że to, co przejawia się w naszych głowach, odpowiada temu, co ma miejsce w otaczającym nas świecie?

⁷ H. Peitgen, H. Jürgens, D. Saupe, dz. cyt., s. 30.

⁸ J. Cohen, I. Stewart, *Załamane chaosu. Odkrywanie prostoty w złożonym świecie*, przeł. M. Tempczyk, Prószyński i S-ka, Poznań 2005, s. 29.

Innymi słowy, jak badacz może sprawdzić, czy model, który zaprezentował, rzeczywiście odzwierciedla występujące w przyrodzie zjawiska? Wyprowadzone wnioski na temat natury pewnej klasy zjawisk, nawet z pomyślnie przeprowadzonych symulacji, czyli takich, które wydają się odzwierciedlać rzeczywiste procesy, mogą okazać się fałszywe. Jest to jedno z niebezpieczeństw, na jakie narażeni są badacze. Otrzymanie prawidłowych wyników, czyli takich jak w naturze, w oparciu o dane wejściowe (takie same bądź podobne do tych występujących w naturze), nie daje jeszcze gwarancji, że model ten prawidłowo opisuje działanie zjawiska zaobserwowanego w przyrodzie. Możliwa jest sytuacja, gdy identyczne rezultaty mogą zostać otrzymane dwoma różnymi sposobami. Na rysunku 5 przedstawiona została wątpliwość zgodności mechanizmu działania rzeczywistego zjawiska z modelem komputerowym ów mechanizm symulującym.



Rys. 5. Problem zgodności pomiędzy zjawiskiem rzeczywistym a symulacją komputerową je odtwarzającą. Źródło: opracowanie własne

Nawiązuje ona do jednego z argumentów wysuwanych przeciwko klasycznej teorii prawdy – problemu kryterium. W przypadku klasycznej teorii prawdy, która głosi, że prawdą jest zgodność myśli z rzeczywistością, wysunięto wątpliwość, która dotyczy kryterium oceny tego, czy owa zgodność rzeczywiście zachodzi. Ocena tego, czy pomiędzy myślą a rzeczywistością jest zgodność, możliwa jest z trzeciego, niezależnego punktu widzenia, który obie strony mógłby porównać. Podobnie sprawa ma się z modelami komputerowymi i rzeczywistymi zjawiskami. W jaki bowiem sposób możemy stwierdzić, że mechanizm leżący u podstaw symulacji komputerowej jest identyczny z tym, który le-

ży u podstaw rzeczywistych zjawisk, jeśli owego procesu nie znamy? Problem ten wydaje się być nierozwiązywalny, a jedynym, czasem zwodniczym kryterium, jest moc przewidywania zachowania wybranego zjawiska występującego w przyrodzie, w oparciu o przeprowadzoną komputerową symulację.

Zakończenie

W zaprezentowanej pracy opisane zostały dwa filozoficznie interesujące zagadnienia, czyli: relacja pomiędzy prostotą i złożonością oraz problem zgodności symulacji komputerowych ze zjawiskami rzeczywistymi. Przedstawiono je z perspektywy L-systemów, których historia, budowa i metoda działania również została opisana. Podsumowując, analiza pierwszego zagadnienia pokazała, że za pomocą prostego języka opisać można bardzo złożone zjawiska niezależnie od procesów leżących u ich podstaw. Jednakże sukcesy osiągnięte we współczesnej nauce, w głównej mierze za sprawą stosowania symulacji komputerowych, ożywiają wielowiekową dyskusję o toczoną wokół kryterium klasycznej definicji prawdy, a obecnie – dyskusję na temat kryterium oceny uchwycenia rzeczywistej natury zjawisk za pomocą komputera.

Dawid Lubiszewski

L-SYSTEMS – A SIMPLE LANGUAGE FOR COMPLEX PHENOMENA

Summary

In this paper, the history and the structure of L-systems are described together with their interesting properties. L-systems were introduced and developed in 1968 by the Hungarian theoretical biologist and botanist Aristid Lindenmayer and are used to model the processes of plant growth and other natural or abstract phenomena, like fractals. The discovery of L-systems has raised a lot of intriguing philosophical issues such as the relationship between simplicity and complexity, and the problem of compatibility of computer simulations and real phenomena. Both issues are discussed in the text.