STUDIA INFORMATICA 2002
Volume 23 Number 4 (51)

Krzysztof DOBOSZ, Maciej LUBIŃSKI
Politechnika Śląska, Instytut Informatyki

GRAMATYKA SŁOWA GENETYCZNEGO SYSTEMU EWOLUCYJNEGO[1]

Streszczenie. W publikacji omówiono rozwiązanie problemu liniowego zapisu słowa genetycznego będącego algorytmem rozwoju systemu ewolucyjnego. Wprowadzono formalną gramatykę zapisu słowa genetycznego, a następnie rozbudowano ją, umożliwiając tworzenie algorytmów rozwoju zawierających dowolne pętle sprzężenia zwrotnego oraz skoki.

GRAMMAR OF THE EVOLUTIVE SYSTEM'S GENETIC WORD

Summary. In the paper a solution of the problem of finding a linear form genetic word, which is an algorithm of the evolution system's development is discussed. A formal grammar of genetic word's notation has been introduced, and then enlarged. It gives possibilities for creating developmental algorithms that contain any feedbacks and jumps.

1. Wstęp

Najpopularniejszym modelem systemów ewolucyjnych jest model L-systemu zaproponowany przez Lindenmayera [1]. L-systemy są koncepcyjnie bardzo zbliżone do gramatyk formalnych opracowanych przez Chomskiego [2]. W obu przypadkach następuje kolejne przepisywanie ciągu symboli zgodnie zasadami wyspecyfikowanymi na liście produkcji. Jednakże w odróżnieniu od gramatyk Chomskiego w L-systemach każdy kolejny krok

[1] Artykuł jest wynikiem badań realizowanych w ramach badań statutowych o symbolu BK-280/RAu2/2002, realizowanych w Instytucie Informatyki Politechniki Śląskiej i finansowanych przez KBN.

wykonywany jest równolegle dla każdego symbolu znajdującego się w łańcuchu, przy czym nie ma rozróżnienia pomiędzy symbolami terminalnymi i nieterminalnymi. Istnieje kilka odmian tego modelu [3,4,5,6,7,8]. Są one w literaturze często spotykane i mają już rozbudowane i dobrze opisane reguły gramatyczne, co znalazło potwierdzenie w wielu implementacjach [9,10,11,12].

Model systemów ewolucyjnych opisanych słowem generującym GW (*ang. Generating Word*) został wprowadzony przez Węgrzyna, Gille'a i Vidala [13,14]. Bazuje on na prostym modelu wywodzącym się z teorii L-systemów. Wprowadza pojęcie słowa generującego (w późniejszych publikacjach: słowa genetycznego) zbudowanego z sześciu podstawowych operacji, obrazujących sześć podstawowych operacji występujących na liście produkcji systemu ewolucyjnego. Pozwala to na zamodelowanie wielu procesów charakterystycznych dla organizmów biologicznych. Implementacje tego modelu są bardzo nieliczne [15]. Do tej pory autorzy nie napotkali formalnego zapisu reguł gramatycznych rządzących liniowym zapisem słowa genetycznego, postanowili więc sami te reguły w niniejszym artykule sprecyzować.

2. Systemy ewolucyjne opisane słowem genetycznym

2.1. Wprowadzenie

System ewolucyjny to uporządkowany zbiór elementów różnych typów oznaczonych symbolami a_1, a_2, ..., a_i, ... a_n, z którymi to typami powiązane są operacje oznaczone odpowiednio: A_1, A_2, ..., A_i, ... A_n, a zwane dalej operacjami elementarnymi. Zakładamy, że operacje te są wykonywane sekwencyjnie i synchronicznie, w tych samych momentach czasu dla wszystkich elementów zbioru.

Ciąg symboli operacji elementarnych A_1, A_2, ..., A_i, ... A_n określających transformacje, którym podlegają elementy typów a_1, a_2, ..., a_i, ... a_n, nazywamy **słowem genetycznym MG** danego systemu rozwijającego się (ewolucyjnego). MG = A_1, A_2, ..., A_i, ... A_n.

Zbiór *n* typów elementów oznaczamy przez: Z = { a_1, a_2, ..., a_i, ... a_n }. Zatem system ewolucyjny SE jest zdefiniowany przez jego słowo genetyczne MG rozpięte nad zbiorem Z wszystkich typów elementów występujących w rozpatrywanym systemie oraz przez warunek początkowy, za który będziemy przyjmowali zawsze a_1, co zapisujemy:

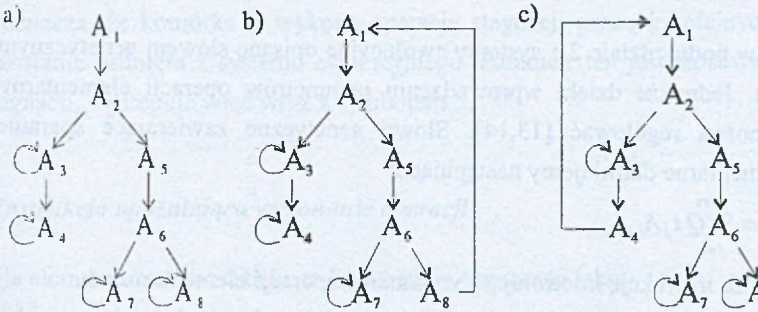
$$SE = \frac{MG}{Z} = \frac{A_1, A_2, \ldots\ldots, A_i, \ldots\ldots A_n}{a_1, a_2, \ldots\ldots, a_i, \ldots\ldots a_n}.$$

O operacjach A_i zakładamy, że przekształcają elementy zbioru Z w elementy również należące do zbioru Z, jeżeli więc $A_i \in MG$ i $a_i \in Z$, to $A_i(a_i) \in Z$. Operacje te ogólnie można podzielić na trzy klasy:

- operacje transformacji, gdzie $A_i(a_i) = a_j$;
- operacje stagnacji, gdzie $A_i(a_i) = a_i$;
- operacje podziału, gdzie $A_i(a_i) = a_j a_k$, co oznacza, że elementy a_j i a_k znajdują się obok siebie wzdłuż tego samego kierunku rozwoju oraz $j \leq n$ i $k \leq n$ (gdzie n jest liczbą typów komórek należących do zbioru Z) lub gdzie $A_i(a_i) = a_j(a_k)$, co oznacza, że element a_k znajduje się na innym w stosunku do dominującego kierunku rozwoju. **Słowem genetycznym o strukturze liniowej** nazwiemy takie słowo, dla którego zachodzi:

$$j > i,\ k \geq i,\ j \neq k. \tag{1}$$

Warunki te prowadzą do realizacji operacji poczynając od pierwszego elementu występującego w zbiorze Z i pierwszej operacji występującej w słowie MG. Następnie słowo MG czytane jest wzdłuż jednej ze ścieżek prowadzących od korzenia struktury drzewiastej do jednego z jej liści. Jeśli w przypadku pewnej wartości i warunek (1) nie jest spełniony, to mamy do czynienia **ze słowem genetycznym o strukturze kołowej** z pętlą globalną bądź lokalną.



Rys. 1. Struktura słowa genetycznego: a) liniowego, b) kołowego z pętlą globalną, c) kołowego z pętlą lokalną

Fig. 1. Genetic word's structure: a) linear, b) circular with global feedback, c) circular with local feedback

Słowo genetyczne z pętlą globalną charakteryzuje się w zapisie liniowym symbolami klamer obejmującymi wszystkie operacje słowa genetycznego. Przez pętle lokalną rozumiane są wszystkie inne pętle. Zapis liniowy dla słów genetycznych z rys.1 jest następujący:

$MG_1 = A_1A_2A_3A_4A_5A_6A_7A_8$

$MG_2 = [A_1A_2A_3A_4A_5A_6A_7A_8]$

$MG_3 = [A_1A_2A_3A_4]A_5A_6A_7A_8$

W dotychczasowych badaniach [13,14] brano pod uwagę systemy ewolucyjne o dwóch stopniach swobody, co oznacza, że struktura systemu zajmuje przestrzeń o maksymalnie dwu wymiarach. Zakłada się również, że omawiane systemy ewolucyjne posiadają synchroniczny tryb rozwoju, co oznacza, że wszystkie operacje na danym etapie rozwoju wykonują się jednocześnie w tym samym, dyskretnym momencie czasu. W systemach takich zbiór operacji jest ograniczony do sześciu zdefiniowanych następująco:

- Transformacja $T(a_i) = a_j$
- Bifurkacja $B(a_i) = a_j a_k$
- Bifurkacja ze zmianą kierunku $C(a_i) = a_j(a_k)$
- Generacja liniowa $L(a_i) = a_j a_i$
- Generacja ze zmianą kierunku $R(a_i) = a_j(a_i)$
- Stagnacja $S(a_i) = a_i$

Nawiasy półokrągłe występujące w wynikach dwóch z powyższych operacji oznaczają, iż komórka nimi objęta zostaje wygenerowana w innym kierunku rozwoju niż bieżący. Wybór rodzaju „innego" kierunku w naszych rozważaniach nie jest istotny i został pominięty.

2.2. Sparametryzowane operacje elementarne słów genetycznych

Opisane w podrozdziale 2.1 systemy ewolucyjne opisane słowem genetycznym rosną bez ograniczenia. Jednakże dzięki wprowadzeniu parametrów operacji elementarnych rozwój ilościowy można regulować [13,14]. Słowo genetyczne zawierające sparametryzowane operacje elementarne definiujemy następująco:

$$MG = \underset{i=1}{\overset{i=m}{SEQ}} I_i A_i \,,$$

gdzie I_i oznacza instrukcję kontrolującą wykonanie operacji elementarnej A_i.

Instrukcja I_i może uzależniać wykonanie operacji A_i od wartości parametru związanego z komórką a_i, jakim jest np. jej wiek, bądź od czynników zewnętrznych. Rozpatrzmy trzy instrukcje kontrolujące związane z wiekiem komórki. Zostaną one kolejno scharakteryzowane.

2.2.1. Instrukcja ograniczająca liczbę wykonań operacji

Operacja elementarna wraz z tą instrukcją będzie oznaczana jako:

$$kA_i \,,$$

gdzie k oznacza całkowitą liczbę wykonań operacji A_i.

Instrukcja ta powiązana może być wyłącznie z operacją generacji, która ma wówczas następujące działanie:

$$kA_i(a_i) = \begin{cases} a_j a_i & gdy\ n_{a_i} \le k \\ a_j & gdy\ n_{a_i} = k+1 \end{cases}.$$

Zapis ten oznacza, że komórka a_i wykona generację komórki a_j k-razy (n_{ai} oznacza czas życia komórki a_i), a następnie sama transformuje do typu j. Parametr ten jest stosowany do opisu operacji generacji, występuje więc wraz z symbolami: L i R.

2.2.2. Instrukcja ograniczająca czas przebywania komórki w zbiorze systemu ewolucyjnego

Operacja elementarna wraz z tą instrukcją będzie oznaczana jako:

$(k)A_i$,

gdzie k oznacza całkowitą liczbę etapów przebywania komórki a_i w strukturze systemu ewolucyjnego.

Instrukcja ta powiązana może być wyłącznie z operacją stagnacji, która ma wówczas następujące działanie:

$$(k)A_i(a_i) = \begin{cases} a_i & gdy\ n_{a_i} \le k \\ - & gdy\ n_{a_i} = k+1 \end{cases}.$$

Zapis ten oznacza, że komórka a_i wykona operację stagnacji przez k kolejnych etapów, a następnie zostanie usunięta z systemu ewolucyjnego. Parametr ten jest stosowany do opisu operacji stagnacji, występuje więc wraz z symbolem S.

2.2.3. Instrukcja opóźniająca wykonanie operacji

Operacja elementarna wraz z tą instrukcją będzie oznaczana jako:

$(Dk)A_i$,

gdzie k oznacza opóźnienie wykonania operacji A_i o k etapów.

Instrukcja ta powiązana może być wyłącznie z operacją transformacji, która ma wówczas następujące działanie:

$$(Dk)A_i(a_i) = \begin{cases} a_i & gdy\ n_{a_i} \le k \\ a_j & gdy\ n_{a_i} = k+1 \end{cases}.$$

Zapis ten oznacza, że komórka a_i opóźni wykonanie transformacji o k etapów, wykonując w tym czasie operację stagnacji. Parametr ten jest stosowany do opisu operacji transformacji, występuje więc wraz z symbolem T.

2.3. Słowa genetyczne bez sprzężeń zwrotnych

W fazie projektowania systemu ewolucyjnego użytkownik może podać słowo genetyczne w postaci łańcucha symboli reprezentujących operacje elementarne. Liniowy zapis słowa genetycznego jest najczęściej rezultatem działania algorytmu przeszukiwania w głąb drzewiastej struktury słowa genetycznego.

```
String zapisLiniowy( Tree node )
{
  if( node <> null )
     return ( node->operacja + zapisLiniowy( node->lewy )
                 + zapisLiniowy( node->prawy ) );
  else
     return "";
}
```

Należy więc sprawdzić, czy łańcuch znakowy podany przez projektanta jest poprawnym zapisem struktury drzewiastej. Opiszemy więc słowo genetyczne zgodnie z formalizmem Chomskiego [2]. Celem jest zatem skonstruowanie bezkontekstowej gramatyki opisujących konstrukcję słów genetycznych systemu ewolucyjnego.

Najpierw jednak wymieńmy najważniejsze cechy operacji elementarnych:

- wynikiem operacji bifurkacji są dwie nowe komórki, a więc w liniowym zapisie słowa genetycznego muszą po tej operacji występować co najmniej dwie operacje elementarne,
- wynikiem operacji generacji i transformacji jest jedna nowa komórka, a więc w liniowym zapisie słowa genetycznego musi po tej operacji występować co najmniej jedna operacja elementarna,
- w wyniku działania operacji stagnacji nie powstają żadne nowe komórki, tak więc symbol tej operacji oznacza liść struktury drzewiastej słowa genetycznego.

Gramatykę Chomskiego określa związek 4 elementów.

$G = \langle V, \Sigma, P, \sigma \rangle$,

gdzie: V – alfabet,

Σ – alfabet terminalny,

P – lista produkcji,

σ – głowa (aksjomat) języka.

Sprecyzujmy je na podstawie znajomości cech operacji elementarnych wchodzących w skład definicji słowa genetycznego:

```
V = { <gałąź>, <operacja_gałęzi>, <operacja_rozgałęzienia>,
      <operacja_zakończenia_gałęzi>, <bifurkacja>, <generacja>,
      <transformacja>, <stagnacja>, L, R, B, C, T, S },
```

```
σ = <gałąź>,
Σ = { L, R, B, C, T, S },
P:
<gałąź>    ::= <operacja_gałęzi> <gałąź>
             | <operacja_rozgałęzienia> <gałąź> <gałąź>
             | <operacja_zakończenia_gałęzi>
<operacja_gałęzi> ::= <generacja>
                    | <transformacja>
<operacja_rozgałęzienia>      ::= <bifurkacja>
<operacja_zakończenia_gałęzi>  ::= <stagnacja>
<bifurkacja>        ::= B | C
<generacja>         ::= L | R
<transformacja>     ::= T
<stagnacja>         ::= S
```

Przykłady słów genetycznych zbudowanych zgodnie z podaną gramatyką:

- LS,
- LCSS,
- LCBLSSLTS.

Aby uwzględnić parametry operacji elementarnych, należy zmodyfikować trzy ostatnie produkcje:

```
<generacja>         ::= L | k L | R | k R
<transformacja>     ::= T | ( D k )
<stagnacja>         ::= S | ( k ) S
```

i zwiększyć zbiór alfabetu oraz symboli terminalnych o dodatkowe symbole:

```
V = { <gałąź>, <operacja_gałęzi>, <operacja_rozgałęzienia>,
      <operacja_zakończenia_gałęzi>, <bifurkacja>, <generacja>,
      <transformacja>, <stagnacja>, L, R, B, C, T, S, (, ), k },
Σ = { L, R, B, C, T, S, (, ), k },
```

gdzie k reprezentuje liczbę całkowitą.

Przykłady słów genetycznych zawierających sparametryzowane operacje elementarne:

- 4LS,
- 3LCS(3)S,
- LCB44LSSL(D5)T(3)S

2.4. Słowa genetyczne ze sprzężeniami zwrotnymi

Tak jak pokazano na rys. 1.b) i 1.c), słowo genetyczne może posiadać pętlę sprzężenia zwrotnego. Pętla taka oznaczana jest symbolami '[' (początek pętli) i ']' (koniec pętli). Należy je więc wprowadzić do alfabetu znaków terminalnych V i uwzględnić w regułach gramatycznych umieszczonych na liście produkcji P.

```
V = { <gałąź>, <operacja_gałęzi>, <operacja_rozgałęzienia>,
      <operacja_zakończenia_gałęzi>, <bifurkacja>, <generacja>,
      <transformacja>, <stagnacja>, L, R, B, C, T, S, D, (, ), k,
      [, ] },
σ = <gałąź>,
Σ = { L, R, B, C, T, S, D, (, ), k, [, ] },
P:
<gałąź>   ::= <operacja_gałęzi> <gałąź>
            | <operacja_rozgałęzienia> <gałąź> <gałąź>
            | <operacja_zakończenia_gałęzi>
            | [ <gałąź>
<operacja_gałęzi>          ::= <generacja>
                             | <transformacja>
<operacja_rozgałęzienia>     ::= <bifurkacja>
<operacja_zakończenia_gałęzi>  ::= <stagnacja>
                                 | ]
<bifurkacja>       ::= B | C
<generacja>        ::= L | k L | R | k R
<transformacja>    ::= T | ( D k )
<stagnacja>        ::= S | ( k ) S
```

Powyższa gramatyka opisuje sytuacje, w których mogą wystąpić symbole terminalne '[' oraz ']'. Mianowicie, symbol początku pętli '[' powinien znaleźć się przed niepustą gałęzią słowa genetycznego. Natomiast okoliczności, w których może wystąpić symbol końca pętli ']', są takie same jak dla symbolu stagnacji.

Analiza słowa genetycznego według przedstawionej tu gramatyki nie przyniesie informacji, w jaki sposób są stworzone pary: symbol początku pętli i odpowiadający mu symbol końca pętli. Niejednoznaczność ta, zauważona przez autorów, jest bezpośrednim następstwem przyjętej notacji słowa genetycznego. Wadą powyższej gramatyki jest to, że nie opisuje ona pewnej ważnej właściwości słowa genetycznego. Tą właściwością jest równa liczba początków i końców pętli w słowie genetycznym. Otwarte pozostaje pytanie, czy możliwe jest uwzględnienie powyższego przy zastosowaniu gramatyki bezkontekstowej?

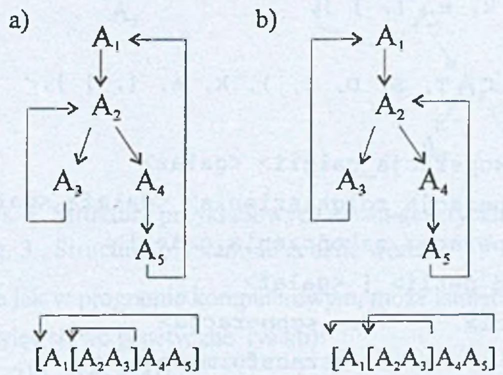
W przypadku przedstawionej gramatyki zasadę równej liczby początków i końców pętli należy traktować jako wymóg semantyczny nałożony na tę gramatykę.

Przykłady słów genetycznych zbudowanych zgodnie z gramatyką umożliwiającą tworzenie sprzężeń zwrotnych:

- [4L],
- [LC](3)S,
- (5D)T[[LCB]S]

2.5. Słowa genetyczne z instrukcją skoku

Podczas analizy różnych słów genetycznych zauważono pojawianie się niejednoznaczności w ich zapisach liniowych. Niejednoznaczności te wynikają z istnienia w słowach genetycznych pętli sprzężeń zwrotnych.



Rys. 2. Struktury przykładowych słów genetycznych
Fig. 2. Structures of sample genetic words

Na rysunku 2 pokazano struktury dwóch różnych słów genetycznych o identycznym zapisie liniowym: MG = $[A_1[A_2A_3]A_4]$. Można więc powiedzieć, że ten zapis liniowy jest niejednoznaczny. Wynika to z faktu, iż nie wiadomo, które z symboli '[' i ']' tworzą ze sobą parę, a więc opisują pętlę sprzężenia zwrotnego. Taka sytuacja ma miejsce w każdym słowie genetycznym, posiadającym więcej niż jedną pętlę sprzężenia zwrotnego. Oczywiście, można by założyć, że pętle sprzężenia w zapisie liniowym nie mogą się przecinać, ale wtedy ograniczylibyśmy swobodę tworzenia połączeń pomiędzy operacjami elementarnymi i pewna klasa słów genetycznych (w tym słowo z rys.2b), byłaby niemożliwa do uzyskania.

Aby usunąć omawianą niejednoznaczność, należy wprowadzić identyfikatory symboli sprzężeń zwrotnych do składni liniowego zapisu słowa genetycznego. Załóżmy, że identyfikator sprzężenia zwrotnego jest liczbą unikalną *e* w zbiorze oznaczeń sprzężeń zwrotnych danego słowa genetycznego i umieszczany jest przed symbolem sprzężenia.

Mamy więc oznaczenia:

e[- początek pętli sprzężenia zwrotnego,

e] - koniec pętli sprzężenia zwrotnego.

Zmodyfikujmy gramatykę słowa genetycznego tak, aby uwzględniała identyfikatory sprzężeń zwrotnych.

```
V = { <gałąź>, <operacja_gałęzi>, <operacja_rozgałęzienia>,
      <operacja_zakończenia_gałęzi>, <bifurkacja>, <generacja>,
      <transformacja>, <stagnacja>, <id_petli>, L, R, B, C, T, S,
      D, (, ), k, e, [, ] },
σ = <gałąź>,
Σ = { L, R, B, C, T, S, D, (, ), k, e, [, ] },
P:
<gałąź>    ::= <operacja_gałęzi> <gałąź>
             | <operacja_rozgałęzienia> <gałąź> <gałąź>
             | <operacja_zakończenia_gałęzi>
             | <id_petli> [ <gałąź>
<operacja_gałęzi>        ::= <generacja>
                           | <transformacja>
<operacja_rozgałęzienia>     ::= <bifurkacja>
<operacja_zakończenia_gałęzi>  ::= <stagnacja>
                               | <id_petli> ]
<id_petli>          ::= e
<bifurkacja>        ::= B | C
<generacja>         ::= L | k L | R | k R
<transformacja>     ::= T | ( D k )
<stagnacja>         ::= S | ( k ) S
```

Zauważmy, że zgodnie z obecnymi zasadami gramatycznymi para symboli *e*[i *e*] niekoniecznie oznacza pętlę sprzężenia zwrotnego. Symbol *e*[może bowiem stać bardziej na prawo w liniowym zapisie słowa genetycznego niż symbol *e*]. Nie mamy wtedy do czynienia z powrotem do już wykonanych operacji elementarnych, lecz ze skokiem w przód w programie rozwoju systemu ewolucyjnego. Omawiane oznaczenia możemy więc nazwać inaczej:

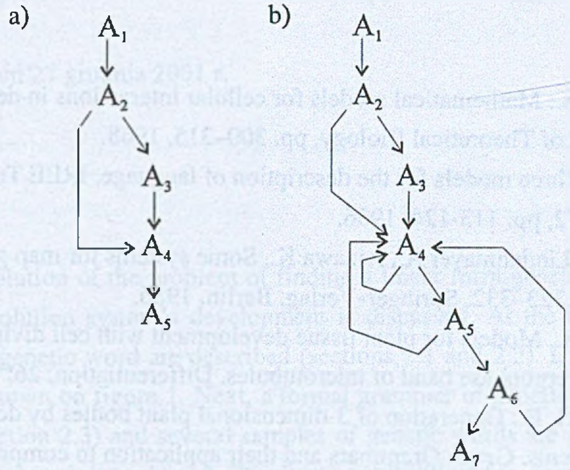
e[- etykieta,

e] - polecenie skoku.

Możliwe jest więc utworzenie słowa genetycznego postaci:

$A_1A_2$1]$A_3$1[A_4A_5,

któremu odpowiada struktura płaska, jak na rys. 3.a).



Rys. 3. Struktury przykładowych słowa genetycznego
Fig. 3. Structure of example genetic words

Co więcej, podobnie jak w programie komputerowym, może istnieć wiele poleceń skoku do tej samej etykiety. Tak więc słowo genetyczne rys3.b):

$A_1A_2$1]$A_3$1[2[3[4[$A_4$2]$A_5$3]$A_6A_7$4],

można by zapisać również jako:

$A_1A_2$1]$A_3$1[$A_4$1]$A_5$1]$A_6A_7$1],

chociaż podana w tym podrozdziale gramatyka nie obejmuje tego typu odwołań, ponieważ nie dopuszcza wystąpienia polecenia skoku *e*] w innym miejscu niż koniec gałęzi, a co za tym idzie, nie dopuszcza również wystąpienia skoku przed symbolem związanej z nim etykiety *e*[.

3. Uwagi końcowe

W niniejszym opracowaniu sformalizowano zasady gramatyczne służące do budowy słowa genetycznego, będącego opisem rozwoju systemu ewolucyjnego. Rozszerzono dotychczasowe zasady o możliwość stosowania etykiet i instrukcji skoku w miejsce symboli początku i końca pętli. Dzięki temu unikamy jakichkolwiek niejednoznaczności w liniowym zapisie słowa genetycznego.

W wersji zaimplementowanej przedstawione w niniejszym artykule zasady gramatyczne zostały wzbogacone o generowanie odpowiednich komunikatów o błędach w przypadku podania wyrażeń niepoprawnych.

LITERATURA

1. Lindenmayer A.: Mathematical models for cellular interactions in development, parts i and ii. Journal of Theoretical Biology, pp. 300–315, 1968.
2. Chomsky N.. Three models for the description of language. IREE Trans. Inform. Theory, vol. IT2, pp. 113-124, 1956.
3. Nakamura A., Lindenmayer A., Aizawa K.. Some systems for map generation. The Book of L, pp. 323–332. Springer-Verlag, Berlin, 1986.
4. Lindenmayer A.. Models for plant tissue development with cell division orientation regulated by preprophase band of microtubules. Differentiation, 26: 1-10, 1984.
5. Luck J., Luck H. B.: Generation of 3-dimensional plant bodies by double wall map and stereomap systems. Graph Grammars and their application to computer science; First International Workshop, pp. 219–231, Berlin, 1983.
6. De Boer M. J. M., Fracchia F. D., Prusinkiewicz P.: A model for cellular development in morphogenic fields. Lindenmayer Systems, pp. 351–370. Springer-Verlag, Berlin, 1992.
7. Ochoa G.: On Genetic Algorithms and Lindenmayer Systems. Parallel Problem Solving From Nature (PPSN V), pp. 335-344, Springer, Berlin. LNCS 1998.
8. Lindenmayer A., Rozenberg G.:. Parallel generation of maps: Developmental systems for cell layers. Graph Grammars and their application to computer science; First International Workshop, pp. 301–316, Berlin, 1979. Springer-Verlag.
9. Federl P., Prusinkiewicz P.: Virtual Laboratory: an Interactive Software Environment for Computer Graphics. Computer Graphics International '99.
10. Horling B: A Lindenmayer-Systems Implementation. Rozprawa doktorska. Witryna WWW: http://shakti.trincoll.edu/~bhorling/lsystems/
11. Lapre L.J.: Lparser. Witryna WWW: http://www.xs4all.nl/~ljlapre/lparser.htm
12. Cooper P.: L-system. Witryna internetowa. http://www.cpsc.ucalgary.ca/Redirect/bmv/java/LSystems/LSys.html
13. Węgrzyn S., Gille J.-C., Vidal P.: Developmental Systems. Springer-Verlag 1990.

14. Węgrzyn S., Gille J.-C., Vidal P.: Genetyka Procesów Rozwoju. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej nr19, Gliwice 1992.
15. Szmal P., Francik J., Nowak M.. Systemy wizualizacji algorytmów wspomagające badania naukowe. III Krajowa Konferencja: Komputery w badaniach naukowych KOWBAN, Polanica Zdrój 1996, ss. 317-322.

Recenzent: Dr hab. inż. Mieczysław Kłopotek

Wpłynęło do Redakcji 27 grudnia 2001 r.

Abstract

In the paper a solution of the problem of finding a linear form genetic word, which is an algorithm of the evolution system's development is discussed. At the beginning, evolutive systems defined by genetic word are described (sections 2.1 and 2.2). Different structures of genetic words are shown on figure 1. Next, a formal grammar of genetic word's notation has been introduced (section 2.3) and several samples of genetic words are given. Then (section 2.4) the formal grammar is enlarged. It gives possibilities for creating developmental algorithms that contain any feedbacks. After the discussion, some examples of genetic words with loops are given. Analyse of different cases of genetic words brought results, which described not identical in meaning linear note of some words. On the figure 2 (section 2.5) that not synonymous note is presented. This problem is solved by introduction names of loop symbols for differentiation of feedbacks. Since that moment, loop symbols are called as "jumps" and "labels". In the next part of this chapter, the figure 3 illustrates sample genetic words with several different loops. And at the end, chapter 3 contains conclusions.