

РАЗВОЈ И ПРИМЕНА ЕКСПЛОРАТИВНИХ АЛАТА У ОБЛАСТИ АРХИТЕКТОНСКЕ ГЕОМЕТРИЈЕ: L-СИСТЕМИ

Љиљана Петрушевски*, Мирјана Деветаковић, Бојан Митровић, Милана Дабић

Универзитет у Београду, Архитектонски факултет, Београд

рад примљен: фебруар 2009., рад прихваћен: април 2010.

Development and Application of Explorative Tools in the Field of Architectural Geometry: L-Systems

Апстракт

Концепт L-система настао је као основа за аксиоматски засновану теорију биолошког развоја. Своје прве непосредне примене L-системи налазе у оквиру компјутерске графике за генерисање фрактала и у оквиру визуелних реалних модела биолошких структура и симулације њиховог развоја. У оквиру генеричке архитектуре, применом L-система, механизми процеса раста у природи користе се као генератори архитектонске геометрије. После математичких и логичких објашњења генеричког концепта L-система, у раду је размотрен генерички потенцијал, што заједно представља основу за развој експлоративних алата у области архитектонске геометрије засноване на концепту L-система.

У оквиру шире истраживачке активности под називом „Генеричка истраживања“ развијени су оригинални софтверски параметарски експлоративни алати који омогућавају генерисање комплексне архитектонске геометрије засноване на концепту L-система. Варијација параметарских вредности омогућава истраживање просторних форми које настају на основу овог генеричког концепта.

У раду су приказане могућности развијених експлоративних алата, њихове специфичности и узајамне разлике, и дат је осврт на резултате њихове примене.

Кључне речи: *архитектонска геометрија, L-системи, генерички концепти, математика, логика, архитектура, CAAD*

Abstract: The concept of L-Systems was created as base for axiomatic theory of biologic growth. L-systems are applied in computer graphics for fractal generation, as well as in models of biological structures and simulations of their growth. Within generic architecture, by applying L-systems, the natural growth mechanisms are used as generators of architectural geometry.

After mathematical and logical explanations of the chosen generic concept of L-systems, this study examines its generic potential, which is the base for development of specific explorative tools in the field of architectural geometry.

Within a wider research activity titled "Generic Explorations", the original software parametric tools have been developed, allowing generation of a complex architectural geometry based on the concept of L-systems. Variation of parametric values facilitates creation and further exploration of generated spatial forms. The paper presents possibilities of developed explorative tools, their particularities, as well as an overview of their initial application results.

Key words: *architectural geometry, L-systems, generic concepts, mathematics, logic, architecture, CAAD*

Увод

Последњих деценија се некако истовремено јављају нови приступи математици, нови приступи науци уопште и нови приступи архитектури. Различите области утичу једна на другу и свака од њих поспешује развој осталих. У тим релацијама настају генерички механизми који утичу на редефинисање архитектонске форме (Коларевић, 2003). У генеричком приступу архитектури не креће се од основа, пресека и изгледа (уз класичну примену нацртне геометрије), већ од неког генеричког концепта (математичког, биолошког, закона физике и сл.) који одређеном логиком даје сложену форму комплексне архитектонске геометрије (Pottmann et al. 2007).

Комплексност геометрије искључује њено моделовање корак по корак у оквиру CAD програма и јавља се потреба за програмирањем као

начином реализације алгоритама у оквиру CAD-а (Терзидис 2006). Активност у оквиру „Генеричких истраживања“ (Generic Explorations, 2008) резултирала је развојем оригиналних програмерских (софтверских) параметарских експлоративних алата који омогућавају генерисање комплексне архитектонске геометрије применом различитих генеричких концепата. Варијација параметарских вредности кључна је за истраживање форми које настају на основу одређеног генеричког концепта. У суштини и сам генерички концепт може се сматрати експлоративним алатом у процесу истраживања архитектонске геометрије. Различити генерички концепти (за исте улазне параметре) дају различите архитектонске форме.

Математички, генерички концепти представљају итеративне функционалне системе. Просторна форма се развија кроз итерације (следећа на основу претходне) користећи при томе геометријске трансформације или неко правило чија се примена понавља у свакој од итерација. Применом геометријских трансформација се, на пример, развијају фрактали (Богданов, Манић, Петрић, 2007), применом једноставних правила којим се дефинишу стања околних елемената настају целуларни аутомати (Wolfram 2002; Петрушевски, Деветаковић, Митровић, 2009). Овај рад се односи на L-системе који се формално генеришу помоћу правила, а у суштини, та правила се у позадини реализују помоћу геометријских трансформација.



Сл. 1.
Просторни L-систем
(студентски рад, Весна
Ивановић, Генеричка
истраживања 01)
Fig. 1.
Spatial L-systems
(student work, Vesna
Ivanovic, Generic Explorations 01)

L-СИСТЕМИ КАО ГЕНЕРИЧКИ КОНЦЕПТ

L-системи су математички формализми настали као основа за аксиоматски засновану теорију биолошког развоја (Lindenmayer, 1968). Своју непосредну примену L-системи налазе у оквиру компјутерске графике за генерисање фрактала и у оквиру визуелних реалних модела биолошких структура и симулације њиховог развоја (Smith, 1984; Prusinkiewicz, Hanan, 1989; Prusinkiewicz, Lindenmayer, 1990; Prusinkiewicz, Hammel, 1995). Становишта о генерисању архитектонске и урбанистичке структуре по узору на биолошке, доводе до примене L-система и у архитектури. Механизми процеса раста у природи користе се као генератори архитектонске геометрије (Hansmeurer, 2007).

Основна идеја математичког формализма L-система садржана је у методи паралелне супституције. L-систем, познат и као параметарски L-систем, је уређена тројка

$L = (A, s, P)$ где је

A - алфабет (азбука) који представља скуп симбола, слова те азбуке

s - аксиом или иницијатор који представља стринг (низ) симбола (слова) дате азбуке који дефинишу иницијално (почетно) стање система

P - скуп продукционих правила p која дефинишу начин на који се симболи претходног стринга замењују неким новим стрингом, итеративно, полазећи од иницијатора.

Алфабет A се састоји од варијабли и константи система. У свакој од итерација, свака од варијабли се замењује стрингом дефинисаним продукционим правилима, а константе система се не мењају. Сама варијабла је претходник, а стринг којим се замењује је њен следбеник. Заједно, представљају продукционо правило.

У оквиру једне итерације правила се примењују истовремено. Врши се паралелна супституција свих варијабли у оквиру текућег стринга новим одговарајућим стринговима, заснована на правилима.

Уколико правила зависе само од симбола на који се примењују, L-системи су независни од контекста. У супротном, када правила зависе од симбола на који се примењују и од симбола у његовом суседству, у оквиру стринга коме припада, L-системи су зависни од контекста, односно контекстуално зависни.

Уколико су константе система детерминистички одређене, L-системи су детерминистички. У супротном, када су константе стохастичке величине, L-системи су стохастички.

Независни од контекста, детерминистички L-системи познати су као једноставни (или DOL) L-системи.

За генерисање 2D-слике или 3D-објекта помоћу L-система неопходна је геометријска интерпретација азбуке. Та геометријска интерпретација представља основ за превођење стринга у инструкције за цртање.

Уобичајен једноставан алфабет са геометријском интерпретацијом у равни је

$A = \{F, f, +, -, [,]\}$ при чему је:

F - померање један корак унапред уз исцртавање линије,

f - померање један корак унапред без исцртавања линије,

$+$ - ротација у смеру супротном кретању казаљки на сату за дати угао односно скретање лево за дати угао,

$-$ - ротација у смеру кретања казаљке на сату за дати угао односно скретање десно за дати угао,

$[$ - меморисање тренутне позиције и правца – (Save),

$]$ - читавање меморисане позиције и правца – (Restore).

Ротације + и - обезбеђују промену правца исцртавања линија. Меморисање ([]) и читавање (]) омогућавају повратак на одређену позицију и правац.

Правила, иницијално стање (аксиом) и угао ротације представљају параметре система. Променом само једног од параметара настаје нови L-систем.

Добар почетни пример за разумевање L-система представља фрактална Кохова крива. Правило

$$p: F \rightarrow F + F - - F + F$$

са аксиомом $s: F$ и углом ротације од 60° генерише, кроз итерације, развојни низ L-система (Кохове криве), апстрактно као низ стрингова (Сл. 2) и визуелно, геометријски, као низ линијских цртежа који се састоје од идентичних линија, у различитим положајима, одређеним параметрима система (Сл. 3).

У оквиру исте азбуке правило

$$p_1: F \rightarrow F [- F] F [+ F] [F]$$

са почетним аксиомом $s: F$ (линија)

и углом ротације од 30° генерише једноставни 2D приказ дрвета (Сл. 4).

За крај последње исцртане линије везан је локални 2D Оху координатни систем. Сама линија припада x -оси и њен крај је у том моменту у координатном почетку. Наредне инструкције за промену правца (+ и -) у равни представљају ротацију око координатног почетка, а у простору ротацију око z -осе. За промену правца у простору неопходне су још инструкције које се односе на ротације око преосталих x -осе и y -осе при чему оне у реалности у простору добијају следеће значење:

+ - скрени лево

- - скрени десно

^ - дигни се горе

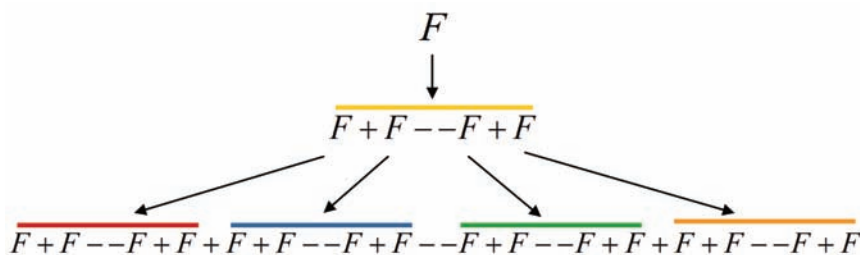
_ - спусти се доле

/ - нагни се десно

\ - нагни се лево

Скретање лево и десно представљају ротације око z -осе за одређени дати угао, дизање горе и доле представљају ротације око x -осе, а нагињање лево и десно ротације око y -осе.

Симболи F и f представљају варијабле, а симболи +, -, ^, _, /, \, [, ,] су константе 3D L-система. Задавањем варијабле и константи, задата је азбука L-система.

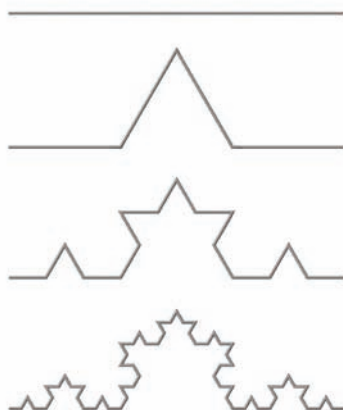


Сл. 2.

Развој Кохове криве приказан помоћу стрингова и прве две итерације

Fig. 2.

The first and the second iteration of the development of Koch curve shown by strings

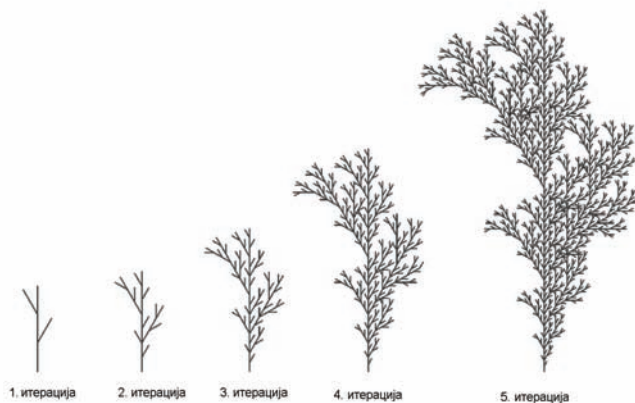


Сл. 3.

Развој Кохове криве – иницијално стање и прве три итерације

Fig. 3.

The development of Koch curve – initial state and first three iterations



Сл. 4.

Дрво генерисано као L-систем

Fig. 4.

Tree generated as L-system

Правила, иницијално стање (аксиом) и углови ротације око координатних оса, као и у случају 2D L-система, представљају параметре који га одређују. Прецизније, правила и иницијално стање у потпуности одређују апстрактни L-систем, као стринг а параметарске вредности углова ротације додатно производе варијације геометријског приказа истог L-система, што значајно доприноси примени у различитим областима. Правило

$$p_2 : F \rightarrow F[-F]F[+F][F]$$

са иницијалним стањем $s : F$

за различите углове ротације око координатних оса, од 90° (Сл. 5, лево) и 15° (Сл. 5, десно) даје визуелно потпуно различите геометријске структуре, засноване на истим правилима развоја, односно засноване на истим механизмима раста.

Сложеније геометријске структуре дају сложенији L-системи који настају проширивањем азбуке новим варијаблама, које омогућавају сложена продукциона правила.

Драгон крива у равни (Сл. 6) се исцртава користећи L-систем у коме су

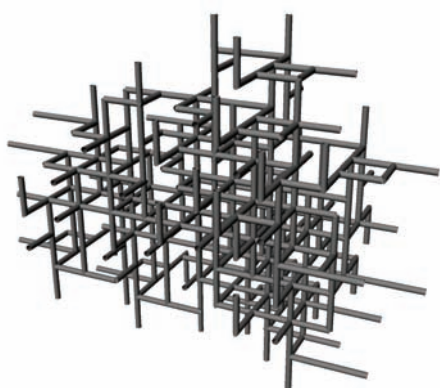
варијабле: X, Y

константе: $F, +, -$

аксиом: FX

правила: $X \rightarrow X + YF, Y \rightarrow FX - Y$

угао ротације: 90° .



УГАО 90°



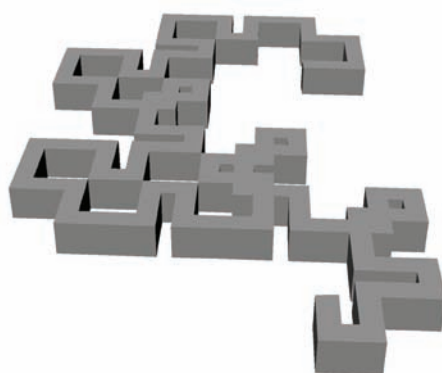
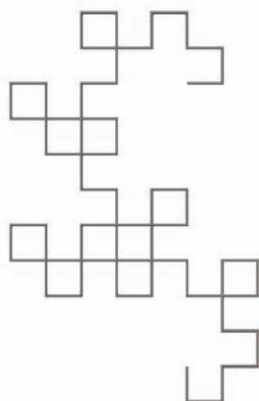
УГАО 15°

Сл. 5

Геометријске структуре генерисане правилом $p_2 : F \rightarrow F[-F]F[+F][F]$ са иницијалним стањем $s : F$

Fig. 5

Geometric structures generated by the rule $p_2 : F \rightarrow F[-F]F[+F][F]$ with initial state $s : F$



Сл. 6.

Драгон крива

Fig. 6.

Dragon curve

ГЕНЕРИЧКИ ПОТЕНЦИЈАЛ

За појам L-система везан је појам линије у равни или простору. Геометријски 2D L-систем представља полилинију или скуп полилинија у равни, 3D L-систем скуп полилинија у простору. Свака од тих полилинија представља изломљену криву линију састављену од основних линија F које се надовезују једна на другу. Уколико уместо те основне линије у

алгоритам уведемо кубичну форму, већ у случају 2D L-система, добија се просторни квалитет и производи просторна форма генерисана тим L-системом (Сл. 7). У оквиру 3D L-система, могућа је модификација пропорција кубичне форме.

Коначни резултат, комплексна геометрија генерисана L-системом значајно зависи од форме полазног геометријског објекта и од односа димензија тог објекта и дужине саме линије. У екстремном случају када је објекат велики у односу на дужину линије, долази до узајамних пресецања појединачних објеката и генерисана просторна форма не представља прост скуп појединачних објеката, већ комплексну геометријску форму која носи нови квалитет и нове карактеристике у односу на полазни објекат. Други екстремни случај, када је објекат мали у односу на дужину линије, може да буде интересантан у архитектонској геометрији само у случају 2D L-система и тада добијена форма представља скуп појединачних објеката чији је положај у простору одређен прихваћеним правилима L-система.

ЕКСПЛОРАТИВНИ АЛАТИ

За примену L-система у процесу генерисања комплексне геометријске (архитектонске) форме развијено је више експлоративних алата:

- **Basic 3D L-Systems**¹, Rhino Script
- **3D L-Systems Distribution**², Rhino Script
- **3D L-Systems**, Grasshopper - generative modeling for Rhino³
- **L-Systems, Fun3D**⁴, софтвер
- **3D L-systems applet**⁵

Basic 3D L-Systems, 3D L-Systems Distribution и 3D L-Systems, Grasshopper су намењени моделовању у оквиру CAD софтвера Rhinoceros. Прва два су написана као Rhino Script, а трећи као Grasshopper дефиниција.

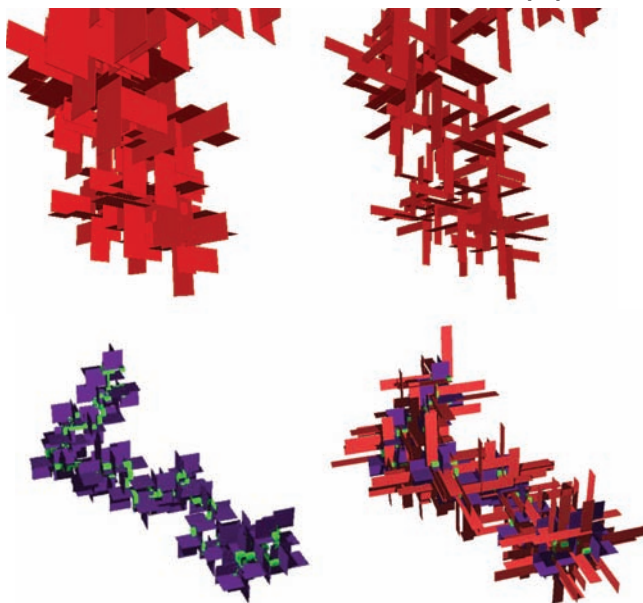
Rhino script је Visual Basic Script (VB script) који се ослања на Rhinoceros и служи за његову надоградњу без компликованог програмирања.

Grasshopper је визуелни програмски језик који у великој мери омогућава извршење алгоритама без употребе синтаксе програмирања. Допушта и програмирање у VB.net-у, делова алгорита за чије извршење не нуди визуелне команде. Његов развој иде у смеру све већег броја визуелних команди и све мање потребе за програмирањем. Неоптерећен синтаксом, веома је погодан за широки круг корисника.

Fun3D је написан у програмском језику Visual Basic, Visual Studio 2005, коришћењем Direct3D технологије за 3D графику и неких библиотека у C# и C++. У целини се односи на генеричке концепте и садржи, као своје модуле, итеративне функционалне системе, афине трансформације, целуларне аутомате, површи и криве у простору (експлицитне, имплицитне и параметарски задате) и као посебан модул 3D L-системе. 2D Export (JPG, PNG) обезбеђује слику као приказ резултата истраживања просторне форме, 3D Export (JavaView - jvx) обезбеђује даља истраживања у оквирима доступних JavaView апликација и посебно значајан DXF 3D Export обезбеђује коришћење добијених резултата и даљу обраду у оквиру CAD програма.

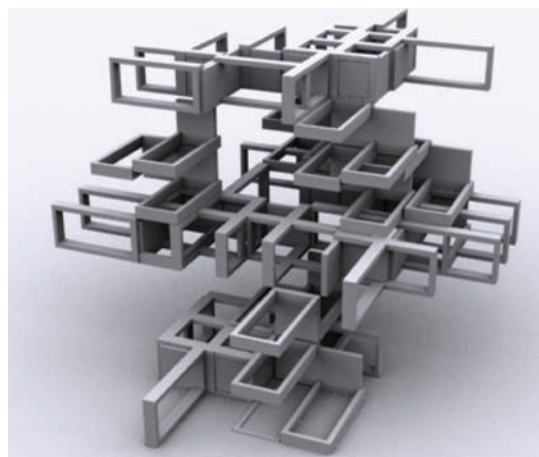
Сл. 7.
Варијације истог L-система са модификованим пропорцијама полазне кубичне форме

Fig. 7.
Variations of one L-system with modification of basic cubic form proportion



Сл. 8.
Комбинације више L-система, добијених на основу истог правила

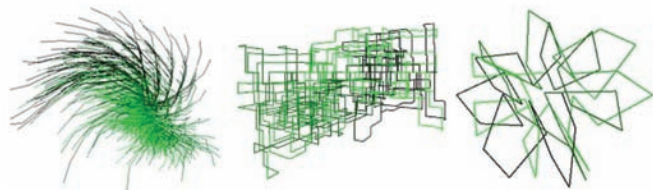
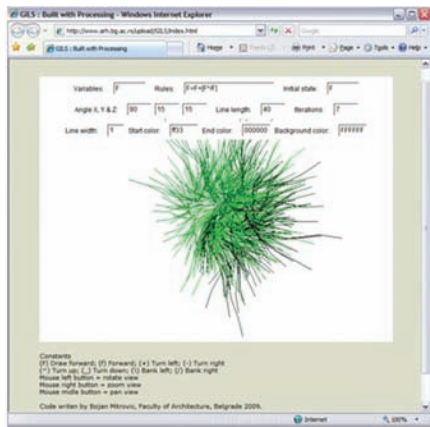
Fig. 8.
Combinations of several L-systems generated by the same rule



Сл. 9.
Испитивање генеричког потенцијала L-система (студентски рад, Ненад Зорић, Генеричка истраживања 02)

Fig. 9.
Study of the generic potential of an L-system (student work, Nenad Zoric, Generic Explorations 02)

- 1 <http://sites.google.com/site/softwarerevolution/Home/rhino-scripts>
- 2 <http://sites.google.com/site/softwarerevolution/Home/rhino-scripts>
- 3 <http://www.grasshopper3d.com/profiles/blogs/3d-lsystems>
- 4 <http://sites.google.com/site/softwarerevolution/Home/fun3d>
- 5 <http://genericexplorations.blogspot.com/2009/11/3d-l-system-applet.html>

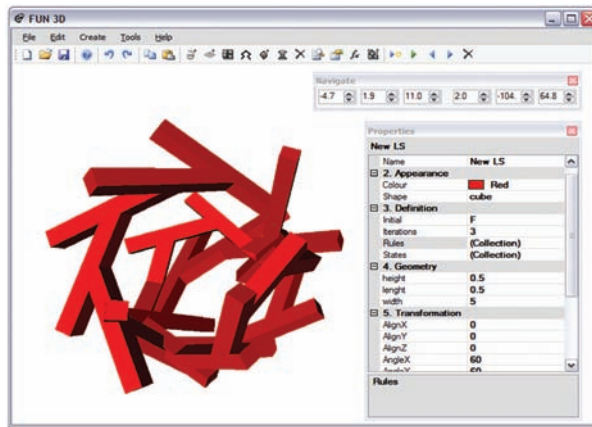


3D L-systems applet (Сл. 10) је написан у специфичном „open source“ програмском језику Processing, намењеном програмирању интерактивних слика и анимација. Преваходна улога овог аплета је учење, дизајнирање и истраживање просторне форме генерисане концептом L-система.

Grasshopper дефиниције 3D L-Systems користе основни алфавет описан у теоријском делу. Основни елемент у процесу генерисања је линија, а параметри који утичу на коначни облик полилиније у простору су варијабле, правила, иницијално стање (start), угао ротације, дужина линије и број итерација. Променом сваког од параметара мења се коначни облик и величина полилиније.

Alphabet	
' (F) Draw forward; (f) Forward; (+) Turn left; (-) Turn right	
' (^) Turn up; (v) Turn down; (\) Bank left; (/) Bank right	
variables = "F"	' Set of variables delimited with comma (,)
rules = "F=F+F-[F+^F-F]-F+F"	' Set of rules delimited with comma (,)
start = "F"	' Initial string
angle = 90	' Angle in degrees
distance = 0.5	' Line Length
n = 3	

Сл. 11.
Алфавет (Basic 3D L-systems)
Fig. 11.
Alphabet (Basic 3D L-systems)



Сл. 10.
3D L-systems Applet
(Processing)
Fig. 10.
3D L-systems Applet
(Processing)

Сл. 12.
Fun 3D, модул за генерисање L-система
Fig. 12.
Fun 3D, module for L-system generation

Basic 3D L-Systems и основна варијанта **L-Systems Distribution** има исти алфавет (Сл. 11), али за основни елемент, уместо линије, узима произвољну задату геометрију, један или више објеката. На тај начин, и тај основни елемент постаје улазни параметар који линијску форму трансформише у просторну и значајно утиче на њу.

У оквиру напредне варијанте **Grasshopper дефиниције 3D L-Systems** и апликација **3D L-systems applet** и **Fun3D** алфавет се проширује већим бројем варијабли, чиме се постиже генерисање сложенијих L-система са већим бројем продукционих правила.

3D L-systems applet и **Fun3D** омогућавају различите углове ротација око координатних оса што даље повећава број улазних параметара и производи нове варијације форме. Неки од описаних експлоративних алата садрже у овину алфавета опцију скалирања што омогућава генерисање фракталних објеката помоћу L-система.

ПРИМЕНА ЕКСПЛОРАТИВНИХ АЛАТА

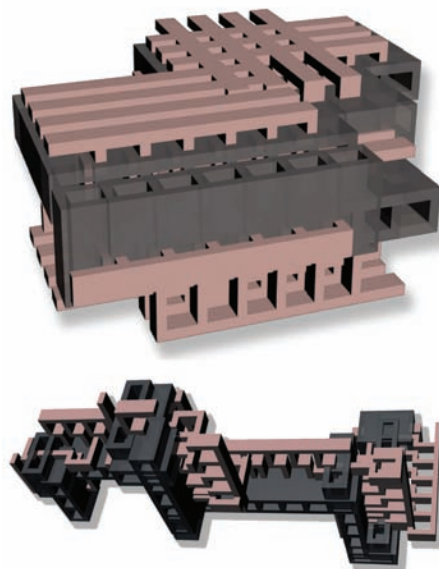
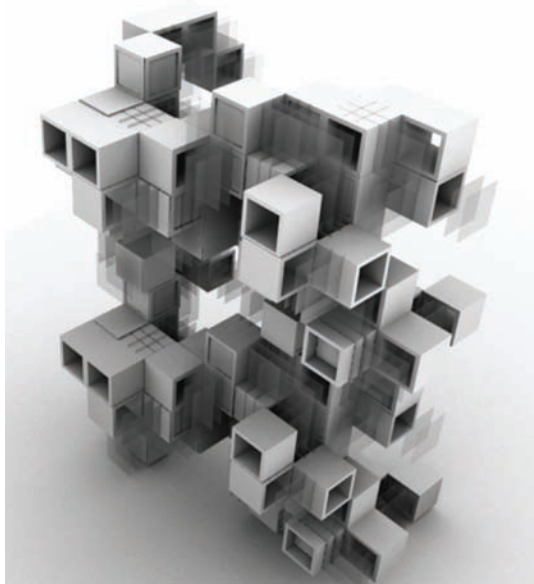
Подстакнути охрабрујућим резултатима у експлоративном приступу 2D L-системима у раду са студентима прве године основних студија на Архитектонском факултету у Београду⁶, где су коришћени експлоративни алати⁷ развијени у другим институцијама, започета је активност на проналажењу адекватних алата за 3D L-системе. Како расположива решења нису била у потпуности адекватна, развијени су сопствени алати, приказани у претходном одељку.

6 Ови резултати огледају се у значајном проценту (преко 80%) веома успешних, оригиналних визуелних интерпретација 2D L-система које су студенти добили једноставном променом продукционих правила.
7 Fractal Explorer (<http://www.eclectasy.com/Fractal-Explorer/>), доступно јануар 2010.)



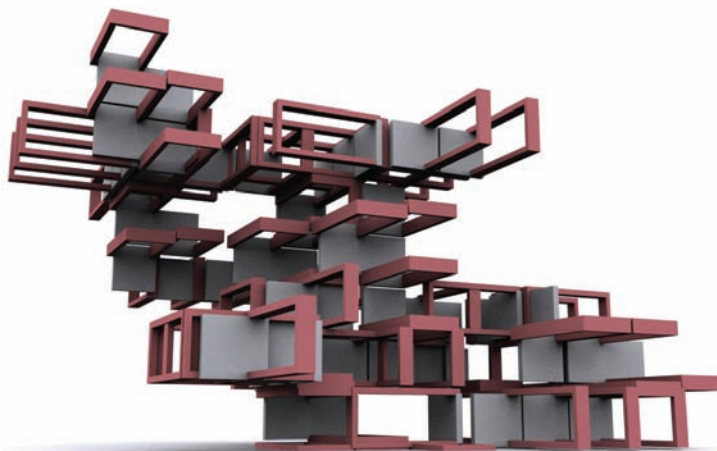
Сл. 13.
Пример студентског рада (Јелена Огњановић, Генеричка истраживања 02)
Fig. 13.
An example of student work (Jelena Ognjanovic, Generic Explorations 02)

Сл. 14.
L-систем целуларних карактеристика (студентски рад, Станислава Предојевић, Генеричка истраживања 02)
Fig. 14.
L-system with cellular characteristic (student work, Stanislava Predojevic, Generic Explorations 02)



Сл. 15.
Композиција L-система (студентски рад, Јулија Јанковић, Генеричка истраживања 01)
Fig. 15.
L-systems composition (student work, Julija Jankovic, Generic Explorations 01)

Сл. 16.
Комбинација L-система са различитим полазним геометријским објектима (студентски рад, Ненад Зорић, Генеричка истраживања 02)
Fig. 16.
L-systems combination with various basic geometric objects (student work, Nenad Zoric, Generic Explorations 02)



Након иницијалног тестирања и кориговања перформанси сваког од описаних алата, започета је њихова експериментална примена у оквиру наставе на серији изборних предмета под називом „Генеричка истраживања“.⁸ Архитектонска интерпретација добијених резултата рађена је према методологији и у фазама приказаним у претходним радовима (Петрушевски, Деветаковић, Митровић, 2009.). Примена L-система у креирању просторне композиције дала је, у готово свим случајевима, објекте снажне архитектонике. Сви резултати могу се систематизовати у две основне групе:

- Композиције настале на основу једног L-система (Сл. 13, Сл. 14).
- Композиције настале комбиновањем више L-система (Сл. 15, Сл. 16)

Међу резултујућим просторним композицијама посебно се издвајају оне, код којих је иницијални геометријски елемент облика рама (Сл. 15, Сл. 16) или је прошупљен на други начин (Сл. 14), чијом мултипликацијом се наглашава тектоника објекта и иницира његова димензија, а тиме и наговештава спектар могућих архитектонских интерпретација.

ЗАКЉУЧАК

Савремени математички и логички концепти представљају својевстан изазов на свим пољима дизајна. L-системи су свакако један од оваквих концепата, теоријски потпуно дефинисани, али недовољно испитани на пољу примене. Њихов генерички потенцијал предмет је истраживања у многим областима.

Приказани експлоративни алати настали су на основу изражене потребе за применом у настави архитектонске геометрије, као и услед недостатка одговарајућих алата на глобалном тржишту софтвера отвореног кода (open source). Резултати до којих се дошло у експерименталној примени оваквих алата, потврдили су значајан генерички потенцијал посматраног концепта, на пољу генерисања просторне форме. У великом проценту добијених резултата, ради се о просторним композицијама карактеристичне и недвосмислене архитектонике, што указује да би понуђени алати могли ефикасно да послуже као особена технолошка подршка у архитектонском пројектовању.

РЕФЕРЕНЦЕ:

- Bogdanov, A., Manić, B., Petrić, J. (2007): *An approach to study of methods for urban analysis and urban fabric renewal in observation of a city as a multiple fractal structure. Arhitektura i urbanizam* **20-21**, 51-60., 2007
- Kolarevic, B. (ed.): *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*, Span Press, Taylor & Francis, USA, 2003
- Lindenmayer A. (1968): *Mathematical models for cellular interaction in development I. Filaments with one-sided inputs, Journal of Theoretical Biology* **18**, 280-289
- Petruševski, Lj., Devetaković, M., Mitrović, B. (2009a): *Self-Replicating Systems in Spatial Form Generation - the Concept of Cellular Automata, Spatium journal* **19**, 8-14; Available at: <http://elearning.amres.ac.rs/journals/index.php/spatium/article/view/7/6>. Date accessed: 02 Feb. 2010.
- Petruševski, Lj., Devetaković, M., Mitrović, B. (2009a): *Arhitektonske interpretacije prostorne forme bazirane na celularnim automatima, Arhitektura i urbanizam* **26**, 45-55., IAUS, Beograd 2009., <http://scindeks-clanci.nb.rs/data/pdf/0354-6055/2009/0354-60550926045P.pdf>, (dostupno januar 2010.)
- Pottmann, H.; Asperl, A.; Hofer, M., Kilian, A. (2007): *Architectural Geometry*, Bentley Institute Press
- Prusinkiewicz, P., Hanan, J. (1989): *Lindenmayer systems, fractals, and plants. Lecture Notes in Biomathematics* Springer-Verlag: Berlin
- Prusinkiewicz, P., Lindenmayer, A. (1990): *The Algorithmic Beauty of Plants*, Springer-Verlag: New York (доступна у јануару 2010. <http://algorithmicbotany.org/papers/#abop>)
- Prusinkiewicz, P., Hammel, M. (1995): *Visual Models of Morphogenesis: A Guided Tour*, Department of Computer Science, University of Calgary
- Smith AR (1984): *Plants, fractals and formal languages. Computer Graphics* **18**: July 1-10
- Terzidis, K. (2006): *Algorithmic Architecture*, Architectural Press
- Wolfram S. (2002): *A New Kind of Science*, Wolfram Media Press, Champaign;

Web извори:

- Hansmeyer, M.: **Lindenmayer Systems in Architecture**; 2007 <http://www.mh-portfolio.com/lsystems.html>
- Generic Explorations**, blog of the research activities, Blogspot, 2008; <http://genericexplorations.blogspot.com/>
- Mitrovic, B.: **Soft Revolution**, Google Sites, 2008; <http://sites.google.com/site/softwarevolution/Home>
- Dabic, M.: **3D L- systems Grasshopper definition**; Grasshopper Network; 2009 <http://www.grasshopper3d.com/profiles/blogs/3d-lsystems>