

УДК 58.087:004.94

ИЗУЧЕНИЕ РОСТА И РАЗВИТИЯ РАСТЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ФУНКЦИОНАЛЬНО СТРУКТУРНЫХ МОДЕЛЕЙ

Анатолий Иванович Бутенко

доктор сельскохозяйственных наук, профессор

but_tolik@mail.ru

Диана Юрьевна Стурова

студент

urasturov@.yandex.ru.

Мичуринский государственный аграрный университет

г. Мичуринск, Россия

Аннотация. Рассматриваются возможности программного продукта OpenAlea.lpy для моделирования растений с целью понимания сложных взаимодействий между архитектурой растений и процессами, управляющими ростом и развитием растений в нескольких пространственно-временных масштабах.

Ключевые слова: L-системы, функционально-структурная модель, L-Py.

Наука занимается изучением, пониманием и объяснением реальности. По сути, модели всегда играли центральную роль в структурировании научного мышления. В биологии понятие индивидов становится относительно ясным, когда относится к большинству животных, но подвергается сомнению при упоминании растений. Хотя растение и представляет единое целое, с точки зрения анализа его можно изучать как систему распределенного управления, состоящую из множества полуавтономных органов. Рассматривая орган растения как функциональную и структурную единицу растения, развитие и функционирование каждого органа можно изучать и моделировать несколько независимо друг от друга, в то время как для полного понимания развития всего растения и его основных функций требуется систематическая интеграция многочисленных подмоделей. Например, морфогенез и функции листьев, побегов, плодов и корней могут быть детально изучены и смоделированы совершенно независимо друг от друга, в то время как их полная функция может быть окончательно оцениваться в контексте системы всего растения.

Развитие, рост и физиологические процессы общих уровней организации сильно зависят от пространственно-временного контекста в отношении воздействия факторов окружающей среды, включая доступ к воде, питательным веществам и энергии источников и других биотических и абиотических воздействий.

Экофизиологические исследования показали, что морфогенез растений очень пластично реагирует на условия внешней среды, так что генетический «контроль» морфогенетических признаков, оказывается, работает на верхних уровнях регуляторной сети, в то время как окружающая среда влияет на локальные реакции. В какой-то мере эту пластичность можно объяснить предполагаемыми децентрализованными процессами саморегуляции. Однако гипотезы саморегулирования трудно проверить непосредственно *in vivo*, поскольку морфогенез является результатом интегрированной системной динамики, которая не может быть отключена, чтобы идентифицировать их

соответствующий первичный контроль[6].

Большинство моделей растений или сельскохозяйственных культур, разработанных ранее, были ограничены моделированием развития или функциями «средних» органов или растений без учета различий между особями и пространственного контекста каждого отдельного органа или растения, и поэтому не могли использоваться в широком диапазоне условий. Увеличение мощности компьютеров, достигнутое в последнее время, и недавние разработки в области компьютерной графики привели к понятию функционально-структурного моделирования растений (FSPM), которое является естественным результатом предыдущих усилий по моделированию. Цель этого подхода заключалась в том, чтобы понять сложные взаимодействия между архитектурой растений и физическими и биологическими процессами, которые управляют развитием растений в нескольких пространственных и временных масштабах[3].

Явный учет пространственного распределения органов растений имеет множество последствий: 1) FSPM обычно связаны с 3D-моделями растения, где архитектура растения представлена как совокупность взаимосвязанных растительных компонентов, которые распределены в трехмерном пространстве под землей и в наземном пространстве; 2) FSPM обычно имеют дело с пространственным распределением как экологических, так и биологических процессов; 3) FSPM обычно основаны на масштабировании, в основном от органа к растению, но и от ткани к органу или от растения к насаждению; и 4) справиться со сложностью системы из-за большого количества растительных компонентов, и иметь дело с потенциально большим количеством взаимодействующих процессов, FSPM должны разработать адекватные вычислительные методы.

Формализм L-систем стал основной парадигмой для построения FSPM. Эти системы названы в честь ботаника-теоретика, растениевода и физиолога Аристида Линденмайера, который впервые использовал их в статье [4] для моделирования развития простых многоклеточных организмов. В L-системе

организм представлен строкой символов (L-строкой) и набором правил, управляющих шаблонами, в которых каждый тип ячейки будет заменен строкой других ячеек. Сначала замена символов производится в начальной строке, называемой аксиомой, затем многократное применение таких правил замены к получаемым строкам приводит к сложной структуре, которую можно интерпретировать геометрически различными способами, создавать наглядные модели описываемых организмов.

За последнее время разработано несколько реализаций L-систем. Наиболее популярным является программное обеспечение L-Studio, разрабатываемое с конца 1980-х годов группой под руководством П. Прусинкевича[5]. Эта платформа работает в операционной системе Windows и предоставляет пользователям интегрированную среду и специальный язык под названием «`crfg`», предназначенный для моделирования развития растений. Позже этот язык был обновлен до L + C (на основе языка программирования C++). Это значительно расширило возможности выражения и открытость системы. Та же группа разработала другой пользовательский интерфейс, «VLab», для использования «`crfg`» и L + C в системах Linux.

В INRIA — национальном исследовательском институте во Франции, работающем в области компьютерных наук, теории управления и прикладной математики разработали платформу с открытым программным обеспечением OpenAlea для моделирования растений, основанную на сочетании двух семейств подходов (т. е. анализа архитектуры растения и визуального программирования). OpenAlea — это гибкая инфраструктура на основе компонентов, предназначенная для облегчения интеграции и взаимодействия разнородных моделей и структур данных из различных научных дисциплин. Архитектура OpenAlea состоит из: (a) системы на основе языка Python и набора инструментов для интеграции разнородных моделей, реализованных на разных языках и на разных платформах; (b) структуры компонентов, позволяющей осуществлять динамическое управление и компоновку модулей программного обеспечения; (c) приложение визуального программирования для

интерактивного создания сложных моделей и управления ими, а также для быстрого прототипирования; и (d) среду для совместной разработки и распространения программного обеспечения.

К сожалению многие интересные модули OpenAlea работают на Python2, который программно не совместим с современным Python3, поэтому их использовать без переделки невозможно. Можно использовать фреймверк L-Py (OpenAlea.lpy), использующий Python3.

Для интеграции L-систем в Python добавлены конструкции L-system, максимально приближенные к синтаксису cprfg и L + C для совместимости между L + C и L-Py. Однако некоторые конструкции наследуются конкретно от синтаксиса языка Python. По сравнению с L + C синтаксис L-Py упрощен за счет исключения объявления типа параметров и переменных. Простой пример кода L-Py приведен ниже (рис. 1).

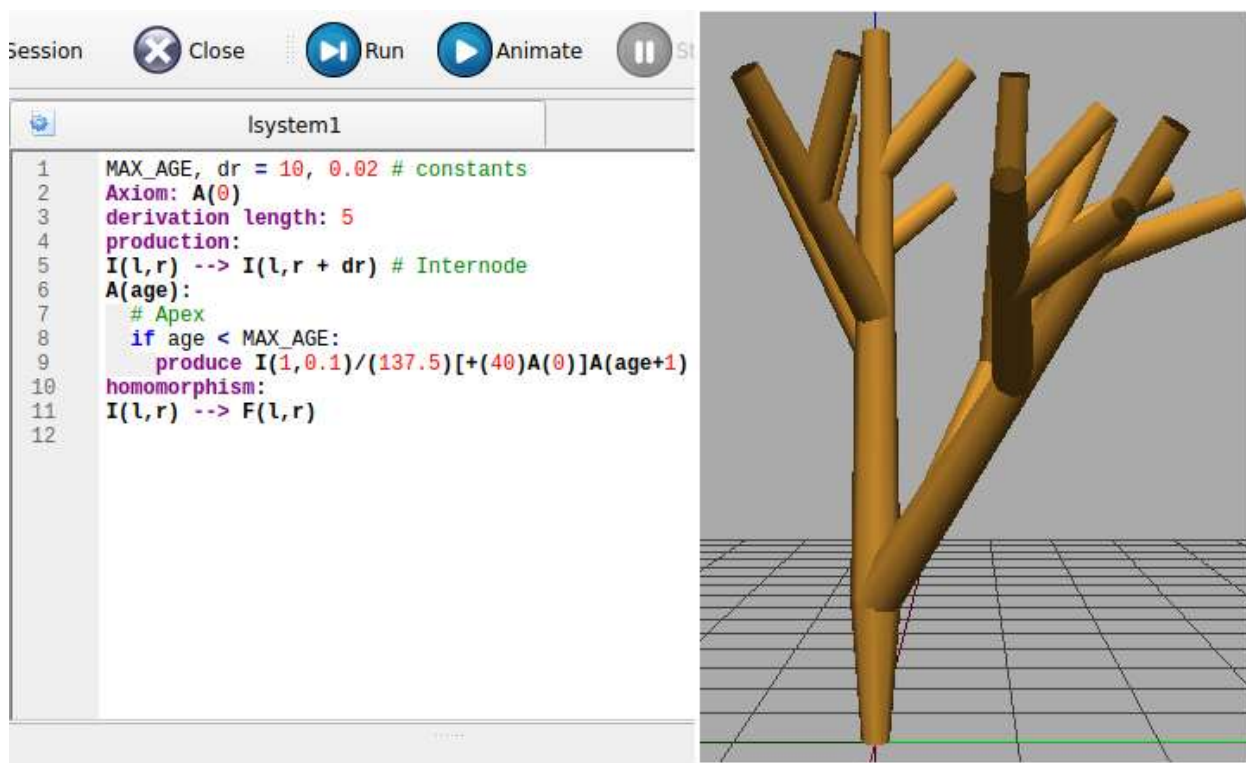


Рисунок 1 - L-система, записанная в коде L-Py в текстовом редакторе (слева) и полученная после 5 итераций 3D-модель в графическом обозревателе (справа)

После набора кода в текстовом редакторе и нажатия кнопки Run, если не было ошибок, откроется окно графического обозревателя с трехмерной моделью. Сцену можно поворачивать и рассматривать модель с любой точки.

Определенная строка модулей, называемая аксиомой, определяет начальное состояние моделирования. Эта строка объявляется с помощью ключевого слова *Axiom*. В примере аксиома представляет собой строку, состоящую из одного модуля *Apex(0)*, представляющую начальную структуру растения.

Ключевое слово *production* указывает начало объявлений правил. Как и в *crfg*, правила могут иметь синтаксис:

Predecessor \rightarrow *Successor*

или, в более общем смысле

LeftContext \langle *Predecessor* \rangle *RightContext* \rightarrow *Successor*

где *Predecessor* и *Successor*- строки модулей, а оба *LeftContext* и *RightContext*- необязательные строки модулей. Правила могут быть выражены с использованием двух соглашений. Простые правила могут быть написаны в компактном математическом стиле, подобном *crfg*, например, строка 5. Для более сложных правил спецификации преемников объявляются как в языке *L + C* с использованием оператора *produce* (вместо стрелки \rightarrow), встроенного в обычный код *Python*, например, строка 9. В этом случае предшественники отделяются от правой части правил двоеточием (строка 6) в соответствии с синтаксисом функций *Python*. Например, правило строк (6-9) заменяет каждую вершину параметром *age*, меньшего *MAX_AGE*(строка 8), *Internode* модулем, за которым следуют боковой *Арехи* основной *Арех*. В скобках указана латеральная вершина. Два геометрических символа, */* и *+*, позволяют указать филлотаксический и вставочный углы для интерпретации, соответственно. Таким образом, синтаксис *L-Py* в значительной степени совместим как с *crfg*, так и с *L + C* для облегчения переноса кода между этими языками.

Сохранить модель можно как скрипт с расширением *.lru* или как графический файл с расширениями *.geom*, *.bgeom*.

В конце 1990-х годов Годин и Каральо [2] предложили формальную модель, называемую многомасштабным древовидным графом (MTG), для

представления широкого спектра архитектур растения в различных масштабах описания гибким и унифицированным способом. С тех пор MTG широко используются для кодирования различных типов архитектуры растения в различных масштабах и для анализа полученных данных. Сегодня MTG в OpenAlea является центральной структурой данных, которую используют различные пакеты моделирования как стандартизированный способ представления растений.

Совместимость между L-Пу и MTGs открывает новые мощные возможности для управления моделированием растения. В работе[1] показывается, как можно использовать передовые инструменты анализа для параметризации L-системы, которая восстанавливает деревья из наблюдаемых данных. Оцифровка сложных древовидных архитектур чрезвычайно трудоемка, и только ручные методы, такие как магнитная 3D оцифровка, в настоящее время могут точно записывать как трехмерные пространственные координаты, так и топологическую структуру растения в виде однолетних побегов или единиц роста. Идея состоит в том, чтобы оцифровывать только основные ветви дерева, а затем на L-Пу генерировать ветки меньшего размера, которые часто повторяются. Из данных по полной оцифровке дерева ореха удалялись данные конечных ветвей и подбирались параметры вероятностной модели L-Пу так, чтобы полученная модель была близка к оцифрованному дереву. Такая задача была успешно решена.

ВЫВОДЫ

Увеличение мощности компьютеров, достигнутое в последнее время, и недавние разработки в области компьютерной графики привели к понятию функционально-структурного моделирования растений (FSPM). Назначение разработанного программного инструмента понять сложные взаимодействия между архитектурой растений и физическими и биологическими процессами, которые управляют развитием растений в нескольких пространственных и временных масштабах.

Список литературы:

1. Front. Plant Sci., 30 May 2012 Sec. Technical Advances in Plant Science
<https://doi.org/10.3389/fpls.2012.00076>
2. Godin C., Caraglio Y. A multiscale model of plant topological structures// J. Theor.Biol. 1998. v. 191, P.1–46.
3. Godin C, Sinoquet H. Functional–structural plant modelling// New Phytologist. 2005. v. 166. P.705–708.
4. Lindenmayer A.Mathematical Models for Cellular Interactions in Development// J. Theor. Biol. 1968. v 8.13. P. 300-315.
5. Prusinkiewicz, P., Lindenmayer, A. The Algorithmic Beauty of Plants. New York: Springer. 1990. 228 p.
6. Verdenal A, Combes D, Escobar-Gutiérrez A.J. A study of ryegrass architecture as a self-regulated system, using functional–structural plant modelling//Functional Plant Biology. 2008. v.35. P. 911–924.

UDC 58.087:004.94

STUDY OF PLANT GROWTH AND DEVELOPMENT USING FUNCTIONAL STRUCTURAL MODELS

Anatoly I. Butenko

Doctor S.-kh. Sciences, professor

but_tolik@mail.ru

Diana Yu. Sturova

student

urasturov@.yandex.ru.

Michurinsk State Agrarian University

Michurinsk, Russia

Annotation. The capabilities of the OpenAlea.lpy software product for plant modeling are considered in order to understand the complex interactions between plant architecture and the processes that control plant growth and development on several spatiotemporal scales.

Keywords: L-systems, functional-structural model, L-Py.

Статья поступила в редакцию 10.05.2023; одобрена после рецензирования 15.06.2022; принята к публикации 30.06.2023.

The article was submitted 10.05.2023; approved after reviewing 15.06.2022; accepted for publication 30.06.2023.