

Лекция 1. Введение

Исследования в области *искусственных биологических систем* (англ. artificial life) связаны с построением, анализом и применением методов и моделей, инспирированных разнообразными природными, прежде всего, биологическими, системами. Эта тематика, включающая в себя, например, клеточные автоматы, искусственные нейронные сети, генетические алгоритмы, роевой интеллект, тесно переплетается с так называемой теорией *естественных вычислительных моделей* (англ. natural computing) — относительно новым разделом науки, образовавшимся на стыке математики, информатики и естественных наук.

Несмотря на биологическое «происхождение» большинства таких моделей, они находят широчайшее применение практически во всех областях, связанных с компьютерной обработкой данных: при моделировании в физике, химии, биологии, экономике и т. п.; в интеллектуальном анализе данных (англ. data mining); при распознавании образов; для управления различными сложными системами и т. д.

История искусственных биологических систем началась практически одновременно с появлением первых электронных компьютеров. Одной из первых таких моделей стали клеточные автоматы, придуманные Джоном фон Нейманом и Станиславом Уламом в 1940-х годах с целью моделирования процессов самовоспроизведения в живой природе. В середине 1950-х годов появляются модели искусственных нейронных сетей — перцептронов, разработанные Фрэнком Розенблаттом. Карл Петри в 1964 году в своей диссертации вводит понятие сетей Петри, одним из предназначений которых было моделирование химических процессов. В конце 1960-х Аристид Линдемайер в рамках своих исследований по математическому моделированию процессов роста и формообразования растений строит формальную модель L-систем. В 1970-х годах в работах Джона Холланда и его учеников формируется понятие генетических алгоритмов, являющихся в настоящее время одним из наиболее мощных методов решения сложных оптимизационных задач.

С 1990-х годов в данной области происходит мощный всплеск исследований, посвященных, прежде всего, разработке новых методов, и основанных на моделировании тех или иных биологических систем, предназначенных для решения сложных (многомерных, многокритериальных, дискретных) задач оптимизации. Создаются муравьиные алгоритмы (Марк Дориго, 1991 год), выполняются первые опыты в области ДНК-вычислений (Леонард Адлеман, 1994 год), разрабатываются метод роя частиц (Кеннеди и Эберхарт, 1995 год), метод метода бактериального поиска (Кевин Пассино, 2002 год), алгоритм пчелиного поиска (Дук Фам, 2006). Появляются и новые мето-

ды моделирования: искусственные иммунные системы, мембранные системы, программируемая материя и т. д. Такой всплеск был обусловлен, во многом, успехами в биологических исследованиях. Еще одной причиной появления большого количества новых методов и моделей явилась необходимость в решении все более сложных и более масштабных задач, прежде всего, оптимизации, к которым оказались практически неприменимы существующие на то время классические алгоритмы и методы.

Особенностью тематики искусственных биологических систем является то, что проведение исследований в этой области практически невозможно без использования компьютерной техники — основным методом исследований здесь является *вычислительный эксперимент*. Это связано, во многом, с дискретным характером используемых моделей и методов, что существенно затрудняет (или даже делает невозможным) какое-либо их аналитическое исследование. Поэтому, с учетом широчайшего применения таких методов, оказывается весьма актуальной задача построения их эффективных компьютерных и программных реализаций.

Общей чертой практически всех моделей в рассматриваемой области является то, что любая из них представляет собой систему взаимодействующих простых объектов. В клеточных автоматах такими объектами являются клетки, в нейронных сетях — нейроны, в генетических алгоритмах — хромосомы и т. д. Эти объекты функционируют (развиваются, эволюционируют) параллельно друг с другом. Это значит, что любая искусственная биологическая модель обладает *внутренним параллелизмом* высокой степени, причем этот параллелизм является *масштабируемым* — увеличение размера системы в некоторое количество раз приводит к соответственному увеличению степени ее параллелизма. Из вышеперечисленных фактов (широкое применение моделей рассматриваемого типа, необходимость в их эффективной компьютерной реализации, встроенный масштабируемый параллелизм) с очевидностью следует, что все такие модели являются весьма перспективными с точки зрения их реализации на современных массивно-параллельных вычислительных системах.

Вопросы, связанные с параллельной реализацией искусственных биологических моделей, помимо их практической важности, имеют и существенное методологическое и образовательное значение. Это связано с тем, что такие модели устроены, как правило, просто и поэтому достаточно легко могут быть реализованы на обычных последовательных компьютерах. В силу того, что различные модели отличаются друг от друга прежде всего способами взаимодействия (очень разнообразными) входящих в них объектов, проблема эффективной параллельной реализации фактически сводится к задаче оптимального *отображения* структуры коммуникации внутри модели на систему коммуникации параллельной вычислительной системы. Все это позволяет рассматривать данные модели в качестве весьма удобного средства для обучения технологиям параллельного программирования на всех типах современных параллельных вычислительных систем (с общей памятью, многопроцессорных кластеров, GPU).

Еще один немаловажный аспект, связанный с изучением естественных вычислительных моделей, заключается в том, что для большинства из них доказана алгоритмическая универсальность, что позволяет рассматривать такие модели в качестве теоретических моделей параллельных вычислений. С одной стороны это способствует более глубокому пониманию параллель-

ных вычислительных процессов, с другой, в будущем может привести к созданию новых вычислительных технологий, как это, например, происходит в настоящее время с ДНК-вычислениями.

Настоящее пособие является фактически введением в теорию построения и применения искусственных биологических систем, в котором рассматривается большая часть существующих в данной теории моделей и методов, как классических (клеточные автоматы, нейронные сети), так и современных (роевой интеллект, ДНК вычисления). Для большинства моделей анализируются вопросы их эффективной параллельной реализации. Также рассматриваются вопросы алгоритмической универсальности ряда моделей. Изложение сопровождается иллюстрациями, предметным указателем и библиографией, включающей в себя наиболее значимые публикации по рассматриваемой тематике.

Литература

- [1] S. Achasova, O. Bandman, V. Markova, et al., *Parallel Substitution Algorithm. Theory and Application.*, Singapore: World Scientific, 1994.
- [2] L. M. Adleman, *Molecular Computation Of Solutions To Combinatorial Problems*, Science, 266, 11, pp. 1021–1024, 1994.
- [3] E. Alba, B. Dorronsoro, *Cellular Genetic Algorithms*, Springer, 2008.
- [4] D. Boneh, C. Dunworth, R. J. Lipton, J. Sgall, *On the Computational Power of DNA*, DAMATH: Discrete Applied Mathematics and Combinatorial Operations Research and Computer Science, 71, 1996.
- [5] C. Detrain, J. L. Deneubourg, *Self-Organized Structures in a Super-organism: Do Ants Behave Like Molecules?*, Physics of Life Reviews 3, no. 3, pp. 162-187, 2006.
- [6] M. Dorigo, M. Birattari, T. Stutzle, *Ant Colony Optimization*, Technical Report No. TR/IRIDIA/2006-023, September 2006.
- [7] S. Goss, S. Aron, J.-L. Deneubourg, J. M. Pasteels, *Self-organized shortcuts in the Argentine ant*, Naturwissenschaften, vol. 76, pp. 579–581, 1989.
- [8] J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1975.
- [9] J. Kennedy, R. C. Eberhart, *Particle swarm optimization*, Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, Piscataway, NJ, pp. 1942–1948, 1995.
- [10] K. M. Passino, *Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control*, IEEE Control Systems Magazine, 22, pp. 52–67, 2002.
- [11] Gh. Paun, *Computing with Membranes*, Journal of Computer and System Sciences, 61, 1 (2000), 108-143.
- [12] Gh. Paun, *P Systems with Active Membranes: Attacking NP Complete Problems*, CDMTCS Research Report Series, CDMTCS-102, May 1999.
- [13] D. T. Pham, A. Ghanbarzadeh, E. Koc, S. Otri, S. Rahim, M. Zaidi, *The Bees Algorithm – A Novel Tool for Complex Optimisation Problems*, Proceedings of IPROMS 2006 Conference, pp. 454–461, 2006.
- [14] P. Prusinkiewicz, A. Lindenmayer, *The Algorithmic Beauty of Plants*, Springer-Verlag, 1996 (<http://algorithmicbotany.org/papers/abop>)

- [15] C. W. Reynolds, *Flocks, herds and schools: a distributed behavioral model*, Computer Graphics, 21, 4, pp. 25-34.
- [16] G. Rozenberg, A. Salomaa, *The Mathematical Theory of L Systems*, Academic Press, 1980
- [17] T. Stutzle, H. Hoos, *MAX-MIN Ant System*, Future Generation Computer Systems, vol. 16, no. 8, pp. 889-914, 2000.
- [18] *The Oxford handbook of membrane computing*, edited by G. Paun, G. Rozenberg and A. Salomaa, Oxford University Press, 2010.
- [19] T. Weise, *Global Optimization Algorithms – Theory and Application*, <http://www.it-weise.de/>.
- [20] D. Whitley, *A Genetic Algorithm Tutorial*, Statistics and Computing (4): 65-85, 1994.
- [21] S. Wolfram, *A New Kind of Science*, Wolfram Media, 2002.
- [22] Hsu-Chun Yen, *Introduction to Petri Net Theory*, Recent Advances in Formal Languages and Applications, 2006, pp. 343-373.
- [23] М. Гарднер, *Крестики-нолики*, М.: Мир, 1988
- [24] В. Котов, *Сети Петри*, М.: Наука, 1984.
- [25] А. А. Марков, Н. М. Нагорный, *Теория алгоритмов*, М.: Наука, 1984.
- [26] М. Минский, С. Пейперт, *Перцептроны*, М.: Мир, 1971.
- [27] Дж. фон Нейман, *Теория самовоспроизводящихся автоматов*, М.: Мир, 1971
- [28] Г. Паун, Г. Розенберг, А. Саломая, *ДНК-компьютер. Новая парадигма вычислений*, М.: Мир, 2003.
- [29] Дж. Питерсон, *Теория сетей Петри и моделирование систем*, М.: Мир, 1984.
- [30] Ф. Розенблатт, *Принципы нейродинамики: Перцептроны и теория механизмов мозга*, М.: Мир, 1965.
- [31] Т. Тоффоли, Н. Марголус, *Машины клеточных автоматов*, М.: Мир, 1991
- [32] Ф. Уоссермен, *Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика*, М.: Мир, 1992.
- [33] С. Хайкин, *Нейронные сети. Полный курс*, М.: «Вильямс», 2006.