

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА НАРУШЕНИЯ СИММЕТРИИ В АЛГОРИТМАХ ПОСТРОЕНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ КОНЕЧНЫХ АВТОМАТОВ¹

Д. С. Чивилихин

аспирант кафедры компьютерных технологий Университета ИТМО

E-mail: chivdan@rain.ifmo.ru

В. И. Ульяновцев

аспирант кафедры компьютерных технологий Университета ИТМО

E-mail: ulyantsev@rain.ifmo.ru

А. А. Шалыто

*д.т.н., профессор, заведующий кафедрой технологий программирования
Университета ИТМО*

E-mail: shalyto@mail.ifmo.ru

Аннотация. Предложен способ применения метода нарушения симметрии (symmetry breaking) в алгоритмах построения управляющих конечных автоматов. Проведенные эксперименты с генетическим и муравьиным алгоритмами построения автоматов показали, что предложенный подход позволяет существенно увеличить эффективность этих алгоритмов.

Введение

Построение управляющих конечных автоматов является одной из основных задач, возникающих при применении автоматного программирования [1]. Для построения автоматов часто применяются метаэвристические алгоритмы, осуществляющие направленный перебор решений. Качество каждого промежуточного решения оценивается с помощью так называемой функции приспособленности (ФП).

Существенной сложностью при применении метаэвристических алгоритмов к построению автоматов является то, что пространство поиска содержит большое число решений, идентичных с точностью до изоморфизма. Это означает, что для любого автомата с N_{states} состояниями существует $N_{\text{states}}!$ — 1 других автоматов, имеющих такую же структуру и отличающихся лишь нумерацией состояний. Проблема заключается в том, что хотя все эти автоматы будут иметь одинаковое значение ФП, алгоритму построения автоматов в процессе поиска в худшем случае придется вычислять это значение для каждого автомата в отдельности.

¹ Работа выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01) и при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-01-00551 а.

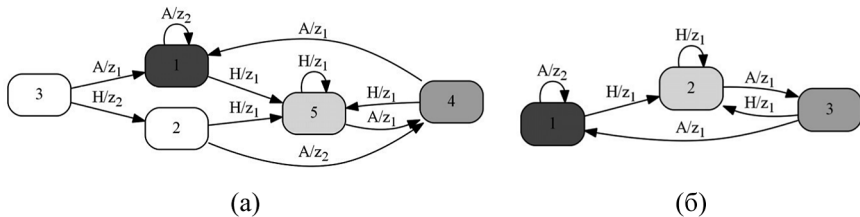


Рис. 1. Пример конечного автомата (а) и его BFS-представления (б), одинаковые состояния помечены одним цветом

Нарушение симметрии в конечных автоматах

Для решения указанной проблемы в данной работе предлагается применить метод нарушения симметрии и специальный кэш автоматов. Используемый метод нарушения симметрии похож на метод MTF (Move-To-Front), предложенный в работе [2]. Идея метода заключается в приведении нумерации состояний автоматов к некому единому виду. Для этого из начального состояния автомата запускается обход в ширину (BFS), при этом порядок обхода детей каждой вершины (состояния) определяется списком входных событий, отсортированным в лексикографическом порядке. Предлагаемое представление автомата, которое мы будем называть BFS-представлением, отличается от метода MTF тем, что недостижимые состояния и переходы в BFS-представлении отбрасываются, в то время как в методе MTF они помещаются в конец строки, кодирующей автомат. Пример конечного автомата и его BFS-представления приведен на Рис. 1. BFS-представление обладает существенным и полезным свойством: все изоморфные друг другу автоматы сводятся к одному автомату в BFS-представлении.

Способы применения BFS-представления в алгоритмах построения автоматов

Существует, по крайней мере, два способа применения BFS-представления автоматов для повышения производительности алгоритмов их построения. Рассмотрим в качестве примера генетический алгоритм. В первом способе все автоматы в популяции должны находиться в BFS-представлении. Потенциально такой подход уменьшает размер пространства поиска в $N_{\text{states}}!$ раз, однако предварительные эксперименты не выявили существенного улучшения производительности алгоритмов при его применении.

Вторым способом применения BFS-представления является введение специального множества автоматов, хранящихся в BFS-представлении. Мы будем называть это множество BFS-кэшем. BFS-кэш хранится в виде хэш-таблицы, в которой ключами являются автоматы в BFS-представлении, а значениями — значения ФП этих автоматов. Когда алгоритм построения

автоматов (например, генетический) получает новый автомат A , производя вычисление его BFS-представления A_{bfs} .

Далее проверяется наличие автомата A_{bfs} в BFS-кэше. Если такой автомат содержится в кэше, то значение ФП автомата A не вычисляется, а берется из кэша. В противном случае значение ФП вычисляется и добавляется в BFS-кэш вместе с автоматом A_{bfs} . Эксперименты показали, что «попадания» в кэш довольно локальны, поэтому его размер поддерживается равным 1000: при превышении данного значения более старые автоматы удаляются из кэша. Таким образом, мы почти никогда не будем дважды вычислять значение ФП изоморфных автоматов.

Эксперименты

В экспериментальном исследовании рассматривалась задача построения управляющих конечных автоматов по сценариям и темпоральным формулам на языке Linear Temporal Logic (LTL). Полное описание этой задачи можно найти в [3]. Было рассмотрено два алгоритма — генетический [3] и муравьиный [4]. Перед запуском экспериментов была проведена автоматическая настройка параметров этих алгоритмов с помощью пакета *irace* [5].

Рассматривались автоматы, содержащие от 4 до 10 состояний. Для каждого значения числа состояний было сгенерировано по 100 автоматов, по каждому из них был построен набор тестовых сценариев и набор LTL формул. В каждом случае генетическому и муравьиному алгоритму разрешалось произвести не более 100000 вычислений ФП. При этом каждый алгоритм запускался как с применением BFS-кэша, так и без него. Для сравнения эффективности алгоритмов использовалась доля успешных запусков, которая вычислялась для каждого значения числа состояний. Запуск считался успешным, если в его результате был построен автомат, удовлетворяющий всем сценариям работы и LTL формулам.

На Рис. 2, *а* приведены графики доли успешных запусков генетического алгоритма с BFS-кэшем и без него, соответствующие графики для муравьиного алгоритма приведены на Рис. 2, *б*. Из рисунков видно, что применение BFS-кэша позволяет увеличить производительность как генетического, так и муравьиного алгоритмов. В результате применения BFS-кэша доля успешных запусков генетического алгоритма увеличилась на 20–120%, а эффективность муравьиного алгоритма возросла на 5–240%.

Для проверки статистической значимости полученных результатов был применен тест Вилкоксона [6]. Для генетического алгоритма значения p -value лежат в интервале от 8.97×10^{-5} ($N_{\text{states}} = 9$) до 0.02 ($N_{\text{states}} = 4$). Значения p -value для муравьиного алгоритма меньше 0.05 для $N_{\text{states}} = 6, 8, 9, 10$, а для других значений числа состояний статистической значимости не наблюдается. Для случаев четырех и пяти состояний это неудивительно, ведь доля успешных запусков муравьиного алгоритма без кэша здесь близка к 100%.

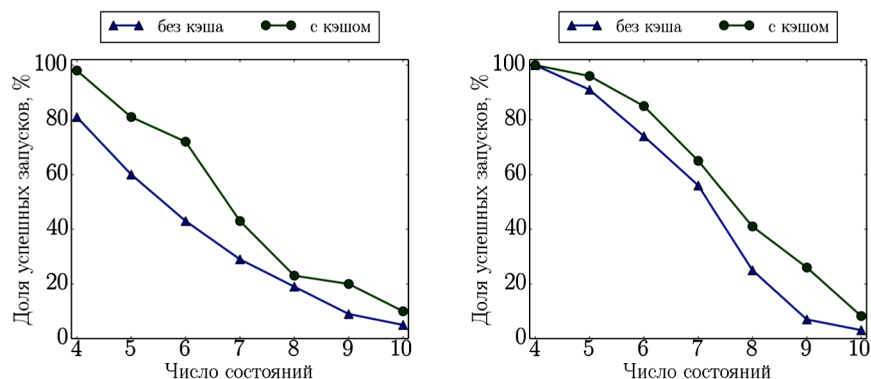


Рис. 2. Доля успешных запусков генетического (а) и муравьиного (б) алгоритмов с использованием BFS-кэша и без него

Закключение

В данной работе предложен способ применения метода нарушения симметрии в задачах построения управляющих конечных автоматов. Экспериментальное исследование показало, что предложенная эвристика существенно улучшает эффективность генетического и муравьиного алгоритмов построения управляющих конечных автоматов по сценариям работы и темпоральным формулам.

Л и т е р а т у р а

1. Поликарпова Н. И., Шалыто А. А. Автоматное программирование. 2011. СПб.: Питер. 176 с.
2. Chambers D. L. Handbook of Genetic Algorithms: Complex Coding Systems (Volume III). CRC, 1999.
3. Tsarev F., Egorov K. Finite state machine induction using genetic algorithm based on testing and model checking // In Proceedings of the 13th annual conference companion on Genetic and evolutionary computation (GECCO'11). New York, NY, USA: ACM, 2011, pp. 759–762.
4. Chivilikhin D., Ulyantsev V. MuACOsm: A new mutation-based ant colony optimization algorithm for learning finite-state machines // In Proceedings of the fifteenth annual conference on Genetic and evolutionary computation (GECCO'13). New York, NY, USA: ACM, 2013, pp. 511–518.
5. López-Ibáñez M., Dubois-Lacoste J., Stützle T., Birattari M. The irace package, iterated race for automatic algorithm configuration // IRIDIA, Université Libre de Bruxelles, Belgium, Tech. Rep. TR/IRIDIA/2011–004, 2011.
6. Wilcoxon F. Individual comparisons by ranking methods // Biometrics Bulletin, 1(6):80–83, 1945.