

УДК 519.688

## **Применение генетического программирования**

### **для оптимизации маршрутов обхода геометрических объектов**

Пушкарева Галина Витальевна, кандидат технических наук, доцент  
Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики  
(г. Новосибирск)

*Рассматривается реализация автоматизированного проектирования маршрутов обхода геометрических объектов посредством технологий искусственного интеллекта. Задача связана с реализацией сложного и трудоемкого процесса генерации управляющих программ для станков ЧПУ термической резки металла. Данная работа направлена на исследование и развитие бионических принципов, моделей и методов, гибридных генетических алгоритмов. Основное отличие предлагаемой методики от известных генетических алгоритмов заключается в использовании новой архитектуры генетического поиска, модифицированных генетических операторов и способов кодировки хромосом. Представлены математическая модель задачи маршрутизации для обхода геометрических объектов с внутренними контурами и гибридный генетический алгоритм для осуществления поиска эффективной траектории посредством объединения методологии генетического программирования с традиционными вычислительно-поисковыми процедурами.*

**Ключевые слова:** *искусственный интеллект, генетическое программирование, проектирование маршрутов, интеллектуализация в САПР, бионические принципы.*

## **Application of genetic programming**

### **for the optimization of the round routes of geometrical objects**

Galina V. Pushkaryova, Candidate of Sciences in Technology, Docent  
Siberian State University of Telecommunications and Informatics (Novosibirsk)

*We consider the implementation of automated design of routes for traversing geometric objects using artificial intelligence technologies. The task is related to the*

*implementation of a complex and time-consuming process of generating control programs for CNC machines for thermal metal cutting. This work is aimed at the research and development of bionic principles, models and methods, and hybrid genetic algorithms. The main difference between the proposed method and the known genetic algorithms is the use of a new genetic search architecture, modified genetic operators, and chromosome encoding methods. A mathematical model of the routing problem for traversing geometric objects with internal contours and a hybrid genetic algorithm for searching for an effective trajectory by combining the methodology of genetic programming with traditional computational search procedures are presented.*

**Keywords:** *artificial intelligence, genetic programming, route design, intellectualization in CAD, bionic principles.*

## **Введение**

Содержательная сторона рассматриваемой задачи связана с реализацией сложного и трудоемкого процесса генерации управляющих программ для станков ЧПУ термической резки металла.

Траектория движения режущего инструмента состоит из следующих элементов: 1) внешних контуров вырезаемых деталей, 2) внутренних контуров, 3) траекторий, связывающих смежные контуры (вырезаемые с одной врезки), 4) траекторий переходов инструмента в выключенном состоянии от одной точки врезки к другой.

При резке тонколистового металла маршруты типа 3, как правило, отсутствуют, поскольку каждая деталь вырезается в этом случае с отдельной врезки. Для толстолиствого проката затраты на сквозную пробивку металла оказываются столь значительны, что экономически целесообразным становится обработка деталей без выключения режущего инструмента.

Таким образом, задача состоит в минимизации траекторий активного и холостого хода, числа врезок и оптимизации переходов от одной врезки к другой. Исходными данными для задачи построения рационального маршрута являются

ся технологические карты раскроя. Конфигурацию плана раскроя образуют внутренние и внешние контуры вырезаемых деталей. Особенность и сложность задачи заключается в том, что она имеет дискретно-непрерывную структуру. При решении данной задачи возникает ряд различных технологических ограничений, связанных со спецификой исполнительного инструмента.

Для таких трудных с вычислительной точки зрения проблем, один из подходов состоит в том, чтобы ослабить требование глобальной оптимальности результата, заменив исчерпывающий поиск приближенным, что приводит к более эффективным алгоритмам. При этом в большинстве случаев ожидается более чем умеренный проигрыш в качестве полученного результата. При решении поставленной задачи в основном применяются эвристические методы и комбинированные алгоритмы, так как для её решения на количестве деталей из реальных практических задач не существует точных методов, дающих результат за приемлемое время.

Для нахождения приближённого решения задачи в работе было решено использовать гибридный генетический алгоритм, обладающий устойчивостью к попаданию в точки локальных экстремумов и способностью постоянно увеличивать качество популяции от поколения к поколению. Способ решения рассматриваемой задачи основан на интеграции технологий искусственного интеллекта, математического программирования и вычислительно-поисковых процедур.

Реализация гибридного генетического алгоритма представляет собой приложение системы AutoCAD.

### **Постановка задачи оптимизации траектории движения исполнительного инструмента**

Решаемая задача заключается в автоматизации проектирования оптимальных траекторий замкнутых маршрутов в двумерной области, заданной технологической картой раскроя. Конфигурацию плана раскроя образуют внутренние и внешние контуры вырезаемых деталей, представленные полилиниями на

чертеже. Траектория проектируемого маршрута должна проходить через каждую полилинию ровно один раз, начинаясь и заканчиваясь в начале координатной системы. Оптимальный маршрут должен иметь минимальную длину среди множества возможных маршрутов. Траектория оптимального маршрута составляет результат проектирования — оптимальное проектное решение. Особенности и сложность задачи заключается в том, что задача имеет дискретно-непрерывную структуру.

Имеется множество деталей, состоящих из внутренних и внешних контуров. Каждый контур имеет начальную точку вырезки  $(x_i, y_i)$ , принадлежащую  $i$ -му контуру ( $i=1, 2, \dots, n$ ). Обозначим расстояние между начальными точками вырезки  $i$ -го и  $j$ -го контуров через  $L_{ij}$  ( $i, j=0, 1, \dots, n$ ). Причём, равенство нулю индекса  $i$  (или  $j$ ) означает соответствие началу координатной системы, т. е. точке  $(0, 0)$ . Необходимо найти кратчайший маршрут  $k^*$  из множества  $K$  допустимых маршрутов  $k=(i_1, i_2, \dots, i_n)$ , где  $(i_1, i_2, \dots, i_n)$  — произвольная перестановка чисел  $1, 2, \dots, n$ . Задача принимает вид

$$F(k^*) = \min \left( L_{0i_1}(x_{i_1}, y_{i_1}) + \sum_{j=1}^{n-1} L_{i_j i_{j+1}}(x_{i_j}, y_{i_j}, x_{i_{j+1}}, y_{i_{j+1}}) + L_{i_n 0}(x_{i_n}, y_{i_n}) \right).$$

Контурные вырезаемых деталей — это геометрические объекты, являющиеся совокупностями отрезков прямых и дуг окружностей. В системе AutoCAD данные геометрические объекты представляются полилиниями. В частном случае контурные вырезаемых деталей могут быть представлены окружностями.

Для определённой технологической карты раскроя контурные вырезаемых деталей можно описать аналитически в виде совокупности параметрических уравнений. Координаты вершин и кривизна участков полилиний, координаты центров и радиусы окружностей содержатся в подписках с соответствующими кодами в графической базе данных чертежа [1].

При формировании порядка обработки контуров деталей важным является то, что внешний контур детали обрабатывается только после того, как обработаны все ее внутренние контуры.

Для реализации этого ограничения формируется матрица структуры технологической карты раскроя  $V_{n \times n} = (v_{ij})_{n \times n}$ , где  $n$  — количество контуров деталей ( $i, j = 0, 1, 2, \dots, n-1$ ). Элемент матрицы  $v_{ij} = 1$ , если  $i$ -ый контур принадлежит внутренней области  $j$ -го контура, иначе  $v_{ij} = 0$ . Любое решение данной задачи должно соответствовать сформированной матрице  $V_{n \times n}$ , то есть в случае  $v_{ij} = 1$  необходимо, чтобы  $i$ -ый контур вырезался ранее  $j$ -го контура.

### **Метод решения задачи маршрутизации**

Для приближенного поиска оптимальной топологии обхода плана раскроя могут быть применены различные эвристические методы поиска решения. Наилучшее приближение для конкретных исходных данных (конкретной карты раскроя) может быть найдено путем последовательного применения различных эвристических методов, используя для сравнительной оценки качества приближения длину полученного маршрута. Наиболее популярны три следующих эвристических алгоритма решения сформулированной задачи [2]: 1) метод ближайшего соседа (Nearest Neighbor); 2) метод включения ближайшего города (Nearest Town); 3) метод самого дешевого включения (Most Cheap Inclusion).

Эвристические методы перечислены в порядке улучшения верхней оценки качества приближенного решения и, соответственно, увеличения вычислительной трудоемкости. Алгоритмы этой группы в метрическом пространстве имеют относительную погрешность 2 и время работы  $O(n^2)$ , где  $n$  — число пунктов обхода плана [3].

Однако методы 1 и 3 мало эффективны для сложных карт раскроя, а метод 2 не учитывает дискретно-непрерывную структуру задачи.

При применении известных методов комбинаторной оптимизации необходимо учитывать дискретно-непрерывную структуру рассматриваемой задачи, что приводит к построению комбинированных алгоритмов. Для нахождения приближенного решения задачи в работе было решено использовать гибридный генетический алгоритм. Использование данного метода обусловлено хорошими результатами, полученными зарубежными учеными при решении раз-

личных задач из области САПР [4], и простотой идеи метода, позволяющей сосредоточиться на его эффективной реализации.

Генетические алгоритмы, являясь одной из парадигм эволюционных вычислений, представляют собой алгоритмы поиска, построенные на принципах, сходных с принципами естественного отбора и генетики [5,6]. Они объединяют в себе принцип выживания наиболее перспективных особей-решений и обмен информацией, в котором присутствует элемент случайности, и который моделирует природные процессы наследования и мутации.

### **Общая схема гибридного генетического алгоритма**

В гибридном генетическом алгоритме начальная популяция формируется случайным образом. Для увеличения скорости сходимости генетического алгоритма в неё включается хромосома, описывающая путь по "жадному" алгоритму. Для хромосомы вычисляется целевая функция  $F(k)$ , называемая эволюционной, где  $k$  - маршрут, описываемый хромосомой. В данном случае целевая функция представляет собой длину траектории движения режущего инструмента. Каждый ген в хромосоме состоит из порядкового номера вырезаемого контура и координат начала вырезки этого контура. Любое решение, закодированное в хромосоме, должно удовлетворять матрице структуры технологической карты раскроя  $V_{n \times n} = (v_{ij})_{n \times n}$ , где  $n$  — количество контуров деталей ( $i, j = 0, 1, 2, \dots, n-1$ ). Поэтому все вновь созданные хромосомы проверяются на допустимость применения в качестве решения.

В рассматриваемом генетическом алгоритме реализована стратегия элитизма, при которой несколько лучших индивидуумов переходят в следующее поколение без изменений. Количество элитных индивидуумов  $KI$  определяется по формуле:

$$KI = (1 - SO) * RP,$$

где  $SO$  — степень обновления популяции,  $RP$  — размер популяции.

После формирования начальной популяции, осуществляется процесс синтеза новых решений (поколений) задачи посредством кроссовера и мутации.

Исходными данными для него являются хромосомы текущей популяции. Исследуемая в некоторый момент времени популяция называется текущей. В начале работы алгоритма текущая популяция совпадает с начальной.

Данный генетический алгоритм можно назвать гибридным, так как в нём реализовано целенаправленное изменение хромосом с целью улучшения значений целевой функции  $F(k)$ . Для этого предлагается ликвидировать имеющиеся пересечения в маршрутах, используя оператор инверсии, а также применить к каждой хромосоме операцию разнообразия. Операция разнообразия вносит некоторые изменения в отдельную хромосому, не меняя порядка вырезаемых контуров. Эти изменения относятся к координатам начальных точек вырезки контуров деталей.

После скрещивания и мутации размер популяции увеличивается. Однако для последующих преобразований необходимо сократить число хромосом текущей популяции. Такая процедура носит название селекции. В текущей популяции, состоящей из родителей и потомков, производится отбор лучших решений, т.е. хромосом с наилучшим значением *fitness*-функции (целевой функции). Эта функция показывает, насколько исследуемая хромосома близка к оптимальному решению.

Для текущей популяции повторяются все описанные процедуры. Процесс продолжается до тех пор, пока не будет обработано заданное число поколений. При этом каждая последующая популяция должна быть лучше, чем предыдущая. Решению задачи соответствует хромосома с наилучшим значением *fitness*-функции.

Количество поколений, которое требуется для нахождения кратчайшего маршрута, зависит также от начальной генетической информации в первом поколении. Поэтому оно меняется от попытки к попытке. Для получения наилучшего результата работы генетического алгоритма рекомендуется сделать несколько попыток (3-5).

На основе тестовых данных в ходе экспериментальных исследований выбираются параметры гибридного генетического алгоритма согласно таблице 1.

Таблица 1. Параметры гибридного генетического алгоритма

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение	Рекомендуемое значение
1	Размер популяции	<i>RP</i>	20-100
2	Число генераций	<i>TG</i>	20-100
3	Вероятность скрещивания	<i>PS</i>	0.7-0.9
4	Вероятность мутации	<i>PM</i>	0.05-0.10
5	Степень обновления популяции	<i>SO</i>	0.95-1.00
6	Количество попыток	<i>KP</i>	3-5

Общую схему реализованного генетического алгоритма можно представить следующим образом [7]:

Шаг 1. Построение матрицы вложенности контуров.

Шаг 2. Применение "жадного" алгоритма для построения маршрута.

Шаг 3. Ввод параметров расчёта.

Шаг 4. Порядковый номер попытки  $i=1$  ( $i=1,2,\dots,KP$ ).

Шаг 5. Формирование начальной популяции  $i$ -ой попытки.

Шаг 6. Целенаправленное изменение хромосом начальной популяции.

Шаг 7. Порядковый номер генерации  $i$ -ой попытки  $j=1$  ( $j=1,2,\dots,TG$ ).

Шаг 8. Выделение элиты и формирование текущей  $j$ -ой популяции.

Шаг 9. Скрещивание хромосом в  $j$ -ой популяции.

Шаг 10. Мутация хромосом в  $j$ -ой популяции.

Шаг 11. Целенаправленное изменение новых хромосом.

Шаг 12. Добавление новых хромосом к  $j$ -ой популяции.

Шаг 13. Добавление элиты к  $j$ -ой популяции.

Шаг 14. Селекция в  $j$ -ой популяции.

Шаг 15. Переход к следующей популяции:  $j=j+1$ .



Шаг 16. Если  $j \leq TG$ , то переход к шагу 8, иначе определение наилучшего маршрута  $i$ -ой попытки.

Шаг 17. Переход к следующей попытке:  $i=i+1$ .

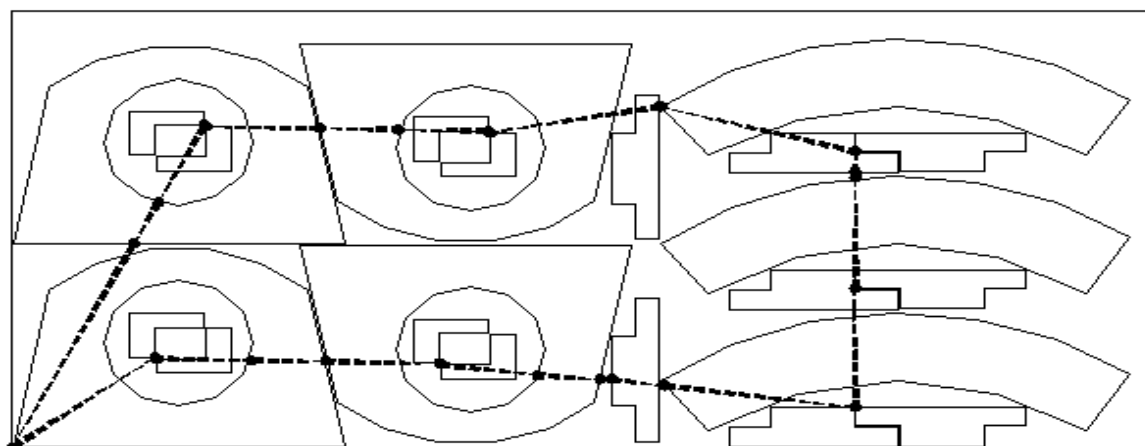
Шаг 18. Если  $i \leq KP$ , то переход к шагу 5, иначе определение наилучшего маршрута за время работы алгоритма.

Шаг 19. Вывод результирующего маршрута.

Для минимизации количества врезок приоритетным является выбор начальной точки вырезки контура, совпадающей с начальными точками вырезки смежных контуров.

### **Реализация гибридного генетического алгоритма**

Конкретная реализация работы программного комплекса, являющегося приложением системы AutoCAD, для фрагмента технологической карты раскроя представлена на рисунке 1.



**Рис.1. Маршрут движения исполнительного инструмента**

Как показано на этом рисунке, траектория движения исполнительного инструмента начинается и заканчивается в начале координатной системы, имеет направленный характер и начальные точки вырезки для каждого контура деталей. В результате работы программы формируется файл отчёта с координатами начальных точек вырезки контуров.

В ходе экспериментов выявлено, что предложенный гибридный генетический алгоритм по длине пути даёт результаты в среднем на 20% лучше классического генетического алгоритма (с аналогичными параметрами и без гибриди-

зации), на 30% лучше алгоритма «ближайшего соседа», на 10% лучше алгоритма «самого дешёвого включения».

### **Заключение**

Полученные результаты проведённого исследования позволяют предложить эффективный алгоритм, основанный на бионических принципах, для решения широкого класса задач дискретно-непрерывной структуры. Применение разработанного комплекса для станков тепловой резки металла с ЧПУ позволяет повысить коэффициент использования металла в среднем на 5-10%, снизить энергетические затраты на резку металла, увеличить ресурс использования режущего инструмента, сократить в несколько раз сроки проектирования, повысить качество проектных решений.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Полецук Н.Н.* VisualLISP и секреты адаптации AutoCAD. - СПб.: БХВ-Петербург, 2001. – 576 с.

2. *Сухарев А.Г., Тимохов А.В., Федоров В.В.* Курс методов оптимизации. - М.: Наука, 1986. – 328 с.

3. *Костюк Ю.Л., Жихарев С.А.* Эффективный алгоритм приближённого решения метрической задачи коммивояжера // Дискретный анализ и исследование операций. – Январь-июнь 2000. Серия 2. Том 7, №1. – С.65-74.

4. *Feo N.F. and Bard J.F.* The Cutting Path and Tool Selection Problem in Computer-Aided Process Planning // Journal of Manufacturing Systems.- 1989.- 8:17-26.

5. *Растрюгин Л.А.* Адаптация сложных систем. Методы и приложения. – Рига: Зинатне, 1981. – 394 с.

6. *Корнеев В.В., Гареев А.Ф., Васютин С.В., Райх В.В.* Базы данных. Интеллектуальная обработка информации. – М.: Нолидж, 2000. – 352 с.

7. *Пушкарева Г.В.* Практическое применение генетического программирования для построения эффективных траекторий // Научный вестник НГТУ. –

2005. №3(21). - С.67-80.