

УДК 519:681.5

Н. И. ЮСУПОВА, Г. Р. ШАХМАМЕТОВА А. Р. КАМИЛЬЯНОВ

ПОИСК ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ МНОГОЗВЕННОГО МАНИПУЛЯТОРА В СЛОЖНОМ ТРЕХМЕРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Рассматриваются вопросы применения генетического подхода для поиска траекторий многозвенных манипуляторов в сложном трехмерном рабочем пространстве и разработки моделирующего комплекса для анализа эффективности работы генетического подхода. *Многозвенный манипулятор; генетический алгоритм; трехмерное пространство*

Многозвенные манипуляторы используются для повышения эффективности работы в пространстве с множеством препятствий или в сильно ограниченном рабочем пространстве типа тоннеля, так как позволяют получать различные конфигурации робота без смещения конца исполнительного механизма от цели. Такие манипуляторы могут применяться в медицине (хирургические операции с минимальным повреждением кожных покровов, зондирование и т. д.), космической промышленности (монтаж/демонтаж сложных деталей, съемка параметров и т. д.), различных производственных системах. Кроме того, эти устройства незаменимы при выполнении работ в космосе, под водой, в радиоактивных средах.

Классические методы поиска траекторий многозвенных манипуляторов (метод псевдоинверсии [7], метод обратных преобразований [8], метод потенциального поля [9]) разработаны достаточно хорошо, но эти алгоритмы неприемлемы для манипуляторов с большим количеством звеньев и поиска траекторий в сложном рабочем пространстве с множеством препятствий, так как требуют большого объема вычислений и не всегда гарантируют точное решение.

Использование интеллектуальных методов позволяет эффективно осуществлять поиск траекторий многозвенного манипулятора в сложном рабочем пространстве. В [6] рассмотрен эвристический метод, который позволяет находить траектории без априорной информации о рабочем пространстве. В [3, 5] рассмотрены методы поиска на основе генетического подхода и генетического подхода в

комбинации с экспертной системой для многозвенного манипулятора в двухмерном рабочем пространстве.

В данной статье рассматривается подход к поиску траектории движения многозвенного манипулятора на основе генетического подхода в трехмерном рабочем пространстве.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Многозвенный манипулятор состоит из некоторого конечного количества подвижных частей (звеньев). Каждое звено манипулятора может поворачиваться на некоторый фиксированный телесный угол относительно предыдущего звена. Начальное звено манипулятора исходит из определенной точки пространства (база манипулятора). Необходимо найти любую траекторию, по которой манипулятор будет двигаться к цели. Траектория однозначно описывается набором точек в пространстве. Эти точки будем называть узловыми точками траектории. Траектория не должна пересекать препятствия, расположенные в рабочем пространстве.

Требуется разработать алгоритм для поиска траектории движения.

Заданы: координаты основания (x_1, y_1, z_1) , координаты цели (x_q, y_q, z_q) , W — максимальное количество звеньев, α_{\max} — максимальный угол поворота.

Зададим целевую функцию $G = f(Z)$, где $Z = \{(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), \dots, (x_k, y_k, z_k)\}$ — множество узловых точек траектории, причем Z однозначно определяет траекторию T манипулятора.

Необходимо найти Z такое, что $G(Z) > 0$ при ограничениях, задаваемых системой уравнений

$$L(Z) = 1, \quad K(Z) = 1, \quad D(Z) = 1.$$

При этом функции $L(Z)$, $K(Z)$, $D(Z)$ определены как

$$L(Z) = \begin{cases} 1, & \text{если траектория } T \\ & \text{удовлетворяет критерию } R1; \\ 0, & \text{в противоположном случае,} \end{cases}$$

где критерий $R1$ определен как пригодность траектории с точки зрения пересечения участков траектории друг с другом и с препятствиями, определенными в рабочем пространстве. Критерий задается системой линейных уравнений и неравенств. При этом для траектории из r участков и пространства из m необходимо решить $\sum_{j=1}^{r-1} (r-j) + r \times m$ систем уравнений и неравенств.

$$K(Z) = \begin{cases} 1, & \text{если траектория } T \\ & \text{удовлетворяет критерию } R2; \\ 0, & \text{в противоположном случае,} \end{cases}$$

где критерий $R2$ определен как пригодность траектории с точки зрения кинематики манипулятора:

1) для $n = s/l$, где s — длина траектории, l — длина звена, выполняется неравенство $0 < n \leq W$, где W — максимальное число звеньев манипулятора, n — целое число;

2) $n_i = s_i/l$, где s_i — длина i -го участка траектории, l — длина звена выполняется условие n_i — целое число, $i = 1, \dots, n-1$.

3) $-\alpha_{\max} \leq \alpha_i \leq \alpha_{\max}$, где α_i — угол поворота $i+1$ -го участка траектории относительно i -го, $i = 1, \dots, n-1$; α_{\max} — максимальное значение угла поворота.

$$D(Z) = \begin{cases} 1, & \text{если траектория } T \\ & \text{удовлетворяет критерию } R3; \\ 0, & \text{в противоположном случае,} \end{cases}$$

где $R3$ — критерий точности достижения цели: $d \leq h$, где d — расстояние от последней точки траектории до цели; h — заданная точность.

2. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МЕТОДА РЕШЕНИЯ

Рассмотрим проблему построения траектории многозвенного манипулятора из исходной точки к цели в трехмерном рабочем пространстве с препятствиями различной конфигурации. Классические методы поиска траекторий манипуляторов (метод виртуальных пружин, метод псевдоинверсии, метод «Морай» и т. д.) разработаны достаточно хорошо, но эти алгоритмы неприемлемы для манипуляторов с большим количеством звеньев и поиска траекторий в сложном рабочем пространстве с множеством препятствий, так как требуют большого объема вычислений и не всегда гарантируют точное решение [1–3].

Использование интеллектуальных методов позволяет эффективно осуществлять поиск траекторий многозвенного манипулятора в сложном рабочем пространстве [4]. В [5] рассмотрен эвристический метод, который позволяет находить траектории без априорной информации о рабочем пространстве. В [4] рассмотрены методы поиска на основе генетического подхода и генетического подхода в комбинации с экспертной системой для многозвенного манипулятора в двухмерном рабочем пространстве.

В терминах генетического подхода задачу можно сформулировать следующим образом — необходимо найти траекторию, которая будет удовлетворять следующим критериям пригодности:

- по достижению цели;
- по достаточности длины манипулятора;
- по достаточности звеньев манипулятора;
- по допустимости углов поворота;
- по пересечению с препятствиями.

Траектория должна быть найдена за определенное, конечное число шагов.

В качестве основного параметра выступает фиксированное количество звеньев манипулятора, которые необходимо расположить в рабочем пространстве так, чтобы начальное звено исходило из определенной точки пространства («базы»), а конечное звено достигало искомой цели.

3. ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА

При разработке метода поиска траекторий на основе генетического подхода предлагаются следующие терминологические интерпретации.

Гены — узловые точки траектории в трехмерном пространстве.

Индивидуумы — траектории движения многозвенного манипулятора, описываемые как наборы узловых точек трехмерного пространства.

Популяция — набор траекторий.

Начальная популяция генерируется с помощью датчика псевдослучайных чисел построением траекторий, непересекающихся с препятствиями. Для выбора родительской пары используется элитный отбор, заключающийся в том, что берется K особей, у которых значение оценочного критерия (функция пригодности) наилучшее и среди них составляются всевозможные пары (рис. 1).

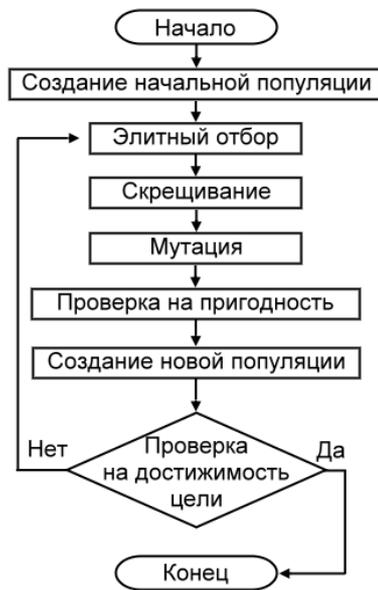


Рис. 1. Схема работы алгоритма

Скрещивание элитных особей заключается в обмене участками траекторий. Часть траектории наследуется от первого родителя, а звенья в оставшейся части траектории поворачиваются в пространстве на те же углы и вокруг тех же осей, что и у второго родителя. Участок траектории для обмена выбирается случайным образом. Скрещивание каждой пары происходит до тех пор, пока не найдется подходящий участок обмена, либо не закончит работу специальный счетчик.

Новые траектории с вероятностью, определенной пользователем, подвергаются мутации, которая применяется для предотвращения вырождения популяции траекторий. Вероятность мутации, как правило, предполагают достаточно низкой. Мутация для траектории заключается в том, что в определенном узле последующее звено поворачивается на некоторый телесный угол и происходит параллельный перенос последующих участков траектории.

Новая траектория будет добавлена в популяцию, если она будет признана лучше, чем самая худшая траектория в популяции.

Итерации генетического алгоритма повторяются до тех пор, пока не будет найдена траектория, удовлетворяющая поставленным условиям, или не истечет заданное пользователем число итераций.

4. ОСОБЕННОСТИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для проверки работоспособности разработанного алгоритма создадим моделирующий комплекс. Необходимо автоматизировать следующие функции, связанные с поиском траектории многозвенного манипулятора:

- моделирование рабочего пространства;
- моделирование параметров манипулятора;
- моделирование процесса поиска траекторий с учетом заданных параметров манипулятора и рабочего пространства;

Рабочее пространство — это базовая система отсчета, к которой привязаны манипулятор, препятствия и другие объекты. Для математического описания рабочего пространства используется стандартная дискретная трехмерная декартова система координат. Координаты всех объектов определяются набором (X, Y, Z) относительно базовой системы отсчета. Препятствия моделируются с помощью произвольных многогранников общего вида. Они однозначно описываются путем последовательного задания координат узловых точек. Все координаты задаются в пределах рабочего пространства. Координаты препятствий сохраняются в отдельном файле.

Моделирование манипулятора — это создание объекта со свойствами, повторяющими реальный манипулятор. Пусть манипулятор состоит из звеньев, которые могут поворачиваться относительно друг друга в пространстве на телесный угол, задаваемый пользователем. Основание манипулятора будем считать фиксированным в некоторой точке пространства. Звено манипулятора аппроксимируем параллелепипедом. Будем считать, что манипулятор достиг цели, если координаты его последнего звена совпадают с координатами цели. В качестве исходных данных для моделирования многозвенного манипулятора использовались следующие параметры: количество звеньев, длина звена, максимальный угол поворота (все задаются пользователем).



Рис. 2. Схема работы моделирующего комплекса

Моделирование процесса поиска траекторий состоит в построении траектории от базы манипулятора до цели с учетом параметров манипулятора и рабочего пространства.

Для проверки работоспособности и оценки эффективности разработанного алгоритма проведем серию экспериментов. В ходе экспериментов будем варьировать величину угла между звеньями, количество звеньев, а также производить замеры достижимости цели и среднего времени ее поиска.

Схема работы моделирующего комплекса приведена на рис. 2. Моделирующий комплекс начинает работу с моделирования рабочего пространства, параметров манипулятора и параметров генетического алгоритма. По окончании этапа моделирования моделирующий комплекс переходит на этап поиска траекторий движения многозвенового манипулятора, после чего осуществляется обработка

полученных данных и их представление в графической форме.

4. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Программное обеспечение моделирующего стенда реализовано для IBM PC с процессором не ниже Pentium 266, ОЗУ 32 Мб.

Тестирование программного комплекса показало высокий процент достижимости целей многозвеновым манипулятором при различных конфигурациях рабочего пространства. Алгоритм позволяет эффективно осуществлять поиск траектории движения многозвенового манипулятора в пространстве с множеством препятствий, когда стоит задача достижения целевой точки.

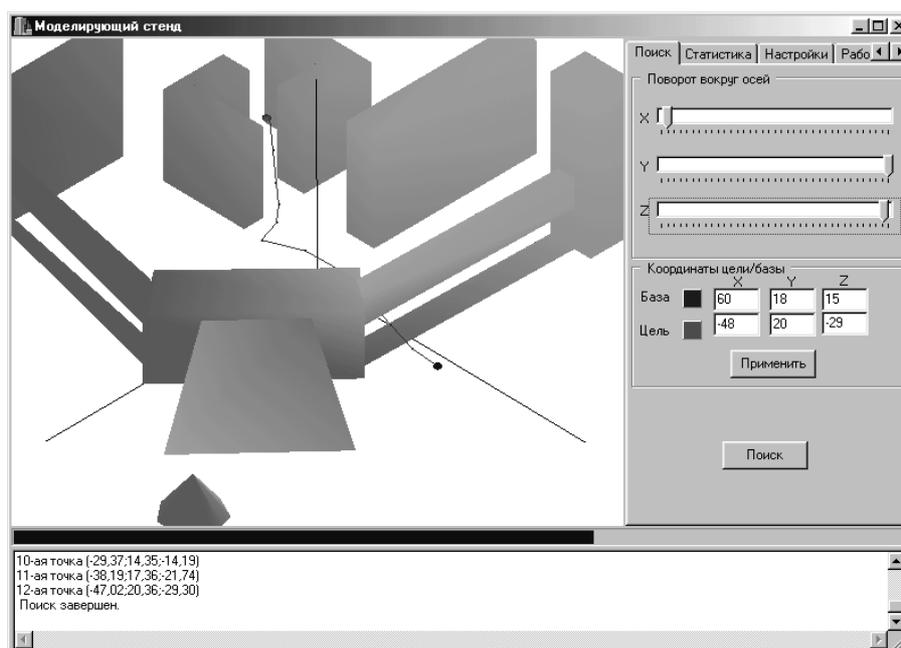


Рис. 3. Графический интерфейс

На рис. 3 приведен пример графического интерфейса, показывающий трехмерное рабочее пространство, в котором заданы препятствия (множество многогранников), база манипулятора (нижняя точка), конечная цель (верхняя точка) и найденная траектория движения 12-звенного манипулятора от базы манипулятора до цели (ломанная между точками). Внизу окна отображены координаты узловых точек траектории. Справа находится панель представляющая собой сгруппированные на страницы элементы управления.

Можно отметить, что возможен визуальный поворот изображения вокруг осей для более наглядного отображения найденных траекторий.

Эффективность разработанного алгоритма проверена серией экспериментов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан алгоритм поиска траекторий многозвенных манипуляторов на основе генетического подхода. Предложенный алгоритм не зависит от числа звеньев, которое может быть легко увеличено, и может использоваться для работы манипулятора с большим числом звеньев в сложном трехмерном рабочем пространстве.

Моделирующий комплекс предоставляет интерактивные возможности для проведения экспериментов с генетическим алгоритмом в области поиска траекторий многозвенных манипуляторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **McLean, A.** Path planning and collision avoidance for redundant manipulators in 3D / A. McLean, S. Cameron // Intelligent Autonomous Systems. Karlsruhe, Germany : IOS Press, 1995. P. 381–388.
2. **Lin, C.** A constrained optimization approach for path planning of redundant robot manipulators / C. Lin, C. Chen // Proc. of JSME Int. Conf. Tokyo, Japan : IOS Press, 1998. P. 430–442.
3. **Юсупова, Н. И.** Избыточные манипуляторы. Управление. Планирование траекторий : препринт монографии / Н. И. Юсупова, Л. Е. Гончар, У. М. Рембольд Уфа : Принт, 1998. 48 с.
4. **Yussupova, N. I.** Intelligent path planning for redundant manipulator in manufacturing / N. I. Yussupova, L. E. Gonchar, G. R. Shakhmametova // Life Cycle Approaches to Production Systems: Management, Control and Supervision : preprints of Advanced Summer Institute. Bordeaux, France, 2000. P. 4–5.
5. **Yussupova, N. I.** Multi-links manipulators for manufacturing / N. I. Yussupova, L. E. Gonchar, G. R. Shakhmametova [et al.] // Life Cycle Approaches to Production Systems: Management, Control and Supervision : Advanced Summer Institute – 99. Leuven, Belgium, 1999. P. 81–86.
6. **Yussupova, N. I.** Multi-links manipulators for manufacturing / N. I. Yussupova, L. E. Gonchar, G. R. Shakhmametova, D. V. Nikiforov // Life Cycle Approaches to Production Systems: Management, Control and Supervision : Advanced Summer Institute – 99. Leuven, Belgium, 1999. P. 81–86.
7. **Cheung, E.** Motion planning for a whole-sensitive robot arm manipulator / E. Cheung, V. Lumelsky // Proc. of the IEEE. 1990. Vol. 1. P. 344–349.
8. **Ishikaaw, H.** Development of Moray arm : thesis / H. Ishikaaw, Dept. Of Systems Engineering. Ibaraki University, 1997. P. 75–76.
9. **Bernard, F.** A local based approach for path planning of manipulators with a high number of degrees of freedom / Faverjon Bernard, Pierre Tournassound // Int. Conf. Robotics & Automation. Raleigh, 1987. P. 1152–1159.

ОБ АВТОРАХ



Юсупова Нафиса Исламовна, проф., зав. кафедрой выч. математики и кибернетики, декан ФИРТ УГАТУ. Дипл. радиофизик (Воронежск. гос. ун-т, 1975). Д-р техн. наук в обл. упр-я техн. системами (УГАТУ, 1998). Иссл. в обл. ситуационного управления, информатики.



Шахмаметова Гузель Радиковна, доц. той же каф. Дипл. инж. по информ. системам (УАИ, 1987). Канд. техн. наук (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. интел. управления многозвенными манипуляторами, систем искус. интеллекта.



Камильянов Артур Рамилович, аспирант той же каф. Дипл. инженер по спец. «Программное обеспечение ВТ и АС» (УГАТУ, 2004). Исслед. в обл. интеллектуальных методов.