

Планирование конфигурации робота-манипулятора типа «хобот»

03, март 2010

авторы: Волкоморов С. В., Карпенко А. П.

УДК 519.6

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Введение

В настоящее время в машиностроении актуальной является задача разработки технологических машин для выполнения механической обработки внутренних поверхностей полостей сложной формы, например, внутренних каналов охлаждаемых лопаток турбин для авиационной и космической техники. В технологии катастроф необходимы машины для организации доступа к внутренним объемам разрушенных зданий и сооружений. Аналогичные задачи возникают также при проведении ремонтных и восстановительных работ в трубопроводах, при проведении ряда хирургических операций и т.д. Обычно для решения перечисленных задач используются многозвенные рычажные манипуляторы либо гибкие манипуляторы.

Серьезным недостатком указанных манипуляторов является их недостаточная жесткость, усложняющая управление ими, затрудняющая использование высокоэнергетического обрабатывающего инструмента и достижение высокой точности обработки. В значительной мере преодолеть указанные недостатки могут манипуляторы типа "хобот", построенные на основе многосекционных механизмов с параллельной структурой [1].

Управление многосекционным роботом-манипулятором типа «хобот» является сложной задачей, в которой естественным образом выделяются стратегический, тактический и исполнительный уровни [2]. На стратегическом уровне выполняется планирование целевой конфигурации манипулятора, на тактическом уровне – синтез траектории перехода из текущего состояния манипулятора в целевое состояние, на исполнительном уровне – управление приводами секций манипулятора.

Задача планирования целевой конфигурации манипулятора представляет собой обратную позиционную задачу кинематики, которая в общем случае формулируется следующим образом: найти значения независимых параметров (обобщенных координат манипулятора), определяющих относительное положение секций манипулятора, которые обеспечивают заданное положение и ориентацию схвата манипулятора. В случае отсутствия препятствий, обратная позиционная задача ставится как задача поиска корней уравнения $\mathbf{S} = \mathbf{F}(\mathbf{q})$, где \mathbf{S} - вектор заданного положения схвата, \mathbf{q} - вектор обобщенных координат, \mathbf{F} - вектор-функция [3].

Даже при отсутствии препятствий общего метода аналитического решения обратной позиционной задачи не существует. Для решения задачи могут быть использованы различные численные методы решения систем нелинейных уравнений. Классическими методами этого класса являются итерационные методы первого порядка (метод секущих и метод Ньютона), а также итерационные методы высших порядков, например, метод Эйткена.

В работе используется метод, относящийся к другому известному классу методов решения систем нелинейных уравнений – классу методов, основанных на сведении задачи к задаче минимизации некоторой вспомогательной функции $\Phi(\mathbf{q})$. Эта функция может быть построена, например, в виде $\Phi(\mathbf{q}) = \sum (F_i(\mathbf{q}) - S_i)^2$, где F_i , S_i - компоненты соответствующих векторов; $i = 1, 2, \dots$. Рассматриваемая обратная позиционная задача в результате сводится к отысканию нулевых минимумов этой функции, т.е. к решению задачи глобальной условной оптимизации $\min \Phi(\mathbf{q}) = \Phi(\mathbf{q}^*) = 0$, $\mathbf{q} \in Q$. Здесь Q - множество допустимых значений вектора обобщенных координат. Важно, что методы решения задачи нелинейного программирования хорошо развиты и существует значительное количество эффективных алгоритмов решения этой задачи [4].

При решении задачи планирования целевой конфигурации манипуляционного робота часто требуется обеспечить не только совмещение схвата с целевой точкой, но и такое положение схвата относительно объекта-цели, которое обеспечивает надежность схвата. Кроме того, как правило, требуется найти конфигурацию, которая является в некотором смысле оптимальной, например, имеет минимальную суммарную кривизну. В общем случае, требуется обеспечить оптимальность целевой конфигурации по нескольким критериям оптимальности $\mathbf{J}_1(\mathbf{q})$, $\mathbf{J}_2(\mathbf{q})$, ...

Поэтому в работе задача планирования целевой конфигурации ставится как многокритериальная задача. Из широкого набора известных методов решения многокритериальных задач оптимизации в работе используется метод аддитивной свертки

частных критериев оптимальности, так что вместо задачи $\min \Phi(\mathbf{q})$, решается задача $\min (\Phi(\mathbf{q}) + \sum \lambda_i J_i(\mathbf{q}))$, $\mathbf{q} \in Q$; λ_i - весовые множители [5].

Отметим, что принципиальную возможность оптимизации целевой конфигурации манипулятора обеспечивает кинематическая избыточность многосекционного манипулятора, имеющего большое количество «лишних» степеней свободы. С математической точки зрения кинематическая избыточность манипулятора означает некорректность обратной позиционной задачи. Так что введение критериев оптимальности целевой конфигурации манипулятора можно интерпретировать, как способ регуляризации задачи [6].

Задача глобальной условной оптимизации $\min (\Phi(\mathbf{q}) + \sum \lambda_i J_i(\mathbf{q}))$, $\mathbf{q} \in Q$ является, вообще говоря, многоэкстремальной. В работе для решения этой задачи используется метод мултистарта в комбинации с известным, хорошо зарекомендовавшим себя методом Нелдера-Мида [4]. Отметим, что метод мултистарта может быть эффективно распараллелен.

Как отмечалось выше, одним из важных применений робота-манипулятора типа «хобот» может быть его применение в технологиях катастроф. В этом случае принципиальным является наличие в области достижимости манипулятора различного рода препятствий. Поэтому в работе задача планирования целевой конфигурации ставится как задача, в которой, наряду с конструктивными ограничениями на вектор обобщенных координат \mathbf{q} , имеются ограничения, обусловленные наличием препятствий.

Для решения задачи планирования целевой конфигурации манипулятора в условиях наличия в его области достижимости препятствий могут быть использованы некоторые методы, развитые для решения задачи планирования пути мобильного робота, и, прежде всего, методы виртуальных информационных полей [7]. К классу этих методов относится метод потенциалов, метод репеллеров и некоторые другие методы.

Метод потенциалов (Potential Field Approach) предложен в работах [8, 9]. Конфигурация манипулятора строится в этом случае с использованием таких понятий, как "сила притяжения к цели", "силы отталкивания от препятствий" и, возможно, некоторые другие "силы". Метод получил развитие в работе [10] и ряда других работ, выполненных в ИПМ им. М.В. Келдыша. Основными недостатками метода потенциалов является его громоздкость, а также многоэкстремальность потенциальной функции.

В методе репеллеров стационарные и нестационарные препятствия трансформируются в отталкивающие многообразия (репеллеры), а целевая точка схвата – в притягивающее многообразие (аттрактор) [11].

В данной работе окружение манипулятора описывается стационарной детерминированной геометрической моделью, задающей точную форму и положение всех

препятствий. Препятствия, как и конструктивные ограничения на вектор обобщенных координат \mathbf{q} , учитываются методом штрафных функций – путем добавления в критерий оптимальности $(\Phi(\mathbf{q}) + \sum \lambda_i J_i(\mathbf{q}))$ специально сконструированных штрафных критериев.

Одной из особенностей многосекционного манипулятора типа «хобот» является возможность самопересечения его секций. Для исключения такой ситуации в число препятствий следует включать секции самого манипулятора.

При планировании целевой конфигурации манипулятора в среде со многими препятствиями самостоятельной задачей является задача поиска допустимой начальной конфигурации. Эта задача может быть решена, например, с помощью алгоритма декомпозиции ячеек (Cell Decomposition) или метода динамического программирования [12]. В работе данная проблема не рассматривается.

В первом разделе рассмотрены варианты структурной организации многосекционного робота-манипулятора типа «хобот». Второй раздел содержит постановку задачи. В третьем и четвертом разделах приводится метод решения задачи. В пятом разделе дается краткое описание соответствующего программного обеспечения. Шестой раздел представляет результаты решения двух тестовых задач. В заключении формулируются основные результаты работы и обсуждаются перспективы ее развития.

1. Структура манипулятора

Хобот слона способен выполнять следующие движения: растяжение/сжатие; изгиб в любой из плоскостей; поворот вокруг своей оси. В зависимости от целевого назначения манипулятора может быть необходимым воспроизведение не всех этих движений. Поэтому рассмотрим следующую иерархию возможностей манипулятора:

- изгиб манипулятора в любой из плоскостей;
- изгиб манипулятора в любой из плоскостей; растяжение/сжатие;
- изгиб манипулятора в любой из плоскостей; растяжения/сжатия; поворот вокруг своей продольной оси;
- изгиб манипулятора в любой из плоскостей; растяжения/сжатия; поворот вокруг своей продольной оси, плоско-параллельное перемещение.

Для построения манипуляторов первого типа достаточно, чтобы последующее звено манипулятора обладало двумя вращательными степенями подвижности относительно двух осей, перпендикулярных продольной оси предыдущего звена манипулятора. В манипуляторе второго типа к указанным двум степеням свободы добавляется одна поступательная степень свободы – растяжение и сжатие звена манипулятора относительно его продольной оси

симметрии. В манипуляторе третьего типа по сравнению с манипулятором второго типа добавляется еще одна вращательная степень свободы – вращение звена манипулятора вокруг его продольной оси симметрии. Манипулятор четвертого типа обладает всеми шестью степенями подвижности – к возможным перемещениям манипулятора третьего типа добавляется два поступательных перемещения.

Манипуляторы первого типа построим на основе механизма параллельной кинематики типа «трипода 2» $3-U\underline{P}S$, который состоит из неподвижного основания, подвижной платформы, трех штанг, каждая из которых состоит из двух полуштанг и активной поступательной кинематической пары (привода), а также из центральной неподвижной штанги [13].

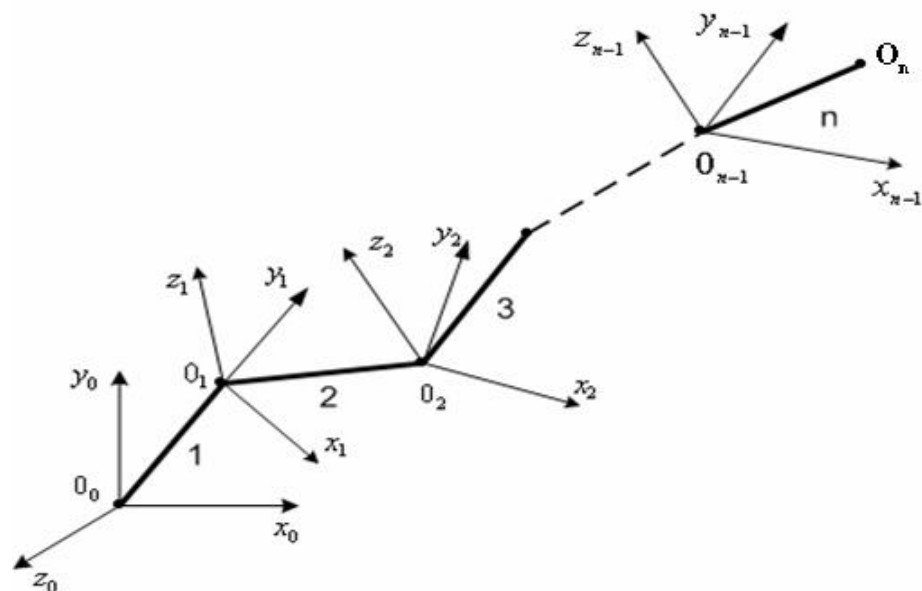
Для построения манипуляторов второго типа также используем механизм параллельной кинематики на основе «трипода 3» $3-U\underline{P}S$, который состоит из неподвижного основания, подвижной платформы и четырех штанг, каждая из которых состоит из двух полуштанг и активной поступательной кинематической пары [13].

В качестве звеньев манипуляторов третьего типа будем рассматривать механизм параллельной кинематики на основе «гексапода 4» $6-U\underline{P}S$. Механизм состоит из неподвижного основания, подвижной платформы, шести штанг, каждая из которых состоит из двух полуштанг и активной поступательной кинематической пары, а также седьмой центральной штанги, неподвижно связанной с основанием, а с помощью сферического шарнира – с платформой [14].

Манипуляторы четвертого типа построим на основе механизма параллельной кинематики типа «гексапод 6» $6-U\underline{P}S$, который состоит из неподвижного основания, подвижной платформы и шести штанг, каждая из которых состоит из двух полуштанг и активной поступательной кинематической пары [14].

2. Постановка задачи

Свяжем с i -ой секцией манипулятора систему координат $0_i x_i y_i z_i$, в которой ось $0_i y_i$ совпадает с продольной осью симметрии этой секции, а оси $0_i x_i$, $0_i z_i$ расположены таким образом, что образуют с осью $0_i y_i$ правую тройку (рис. 1). Инерциальную систему координат, связанную с неподвижным основанием манипулятора, обозначим $0_0 x_0 y_0 z_0$. Положим, что оси $0_0 x_0$, $0_0 z_0$ этой системы координат горизонтальны, а ось $0_0 y_0$ - вертикальна.



1, 2, ..., n – номера секций; O_n – схват манипулятора

Рис. 1. Системы координат многосекционного манипулятора

Введем следующие обозначения [3]: T_i , $i \in [1:n-1]$ – однородная (4×4) -матрица, задающая переход от системы координат $O_i x_i y_i z_i$ к системе координат $O_{i-1} x_{i-1} y_{i-1} z_{i-1}$; \mathbf{q}_i – вектор обобщенных координат i -ой секции манипулятора; $\mathbf{q} = (\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \dots, \mathbf{q}_{n-1})^T$ – вектор обобщенных координат n -секционного манипулятора; $T_n = T_1 T_2 \dots T_{n-1}$ – (4×4) однородная матрица, определяющая положение системы координат $O_{n-1} x_{n-1} y_{n-1} z_{n-1}$ в системе координат $O_0 x_0 y_0 z_0$; \mathbf{s} – (4×1) обобщенный вектор положения схвата O_n в системе координат $O_0 x_0 y_0 z_0$; \mathbf{S} – (4×1) аналогичный вектор положения схвата O_n в системе координат $O_{n-1} x_{n-1} y_{n-1} z_{n-1}$.

Во введенных обозначениях обратная позиционная задача для рассматриваемого манипулятора записывается в виде

$$\mathbf{S} = T_n(\mathbf{q})\mathbf{s} = \mathbf{F}(\mathbf{q}), \quad (1)$$

где $\mathbf{q} \in Q$. Множество Q – совокупность допустимых значений вектора обобщенных координат \mathbf{q} – формируют конструктивные ограничения на компоненты вектора \mathbf{q} вида $|q_i| \leq q_i^{\max}$, $i \in [1:N]$, где N – размерность вектора \mathbf{q} . Кроме того, это множество формируют m неподвижных препятствий B_j , $j \in [1:m]$, каждое из которых определяется в системе координат $O_0 x_0 y_0 z_0$ известными ограничивающими функциями $g_{j,1}(X) \geq 0$, $g_{j,2}(X) \geq 0, \dots$

Ставятся две следующих задачи.

Задача 1. Сформировать целевую конфигурацию манипулятора, определяемую вектором $\mathbf{q}^* \in Q$, которая обеспечивает заданное положение схвата

$$\mathbf{S}^* = \mathbf{F}(\mathbf{q}^*) \quad (2)$$

при условии, что каждая из секций манипулятора отстоит от каждого из препятствий B_j не менее чем на величину $\varepsilon_B > 0$.

Задача 2. На решениях задачи 1 найти такую конфигурацию манипулятора, которая обеспечивается минимум k функционалов качества конфигурации $J_i(\mathbf{q})$, $i \in [1 : k]$.

Наряду с обеспечением заданного положения схвата может ставиться задача обеспечения требуемой ориентации n -й секции манипулятора в системе координат $0_0 x_0 y_0 z_0$. Зададим эту ориентацию тремя углами Эйлера и поставим в соответствие им (4×1) обобщенный вектор \mathbf{P} . Тогда в задаче 1 вектор $\mathbf{q}^* \in Q$ наряду с уравнением (2) должен удовлетворять аналогичному уравнению

$$\mathbf{P}^* = \mathbf{F}_p(\mathbf{q}^*). \quad (3)$$

Решение системы уравнений (2) и системы уравнений (2), (3) может быть выполнено по одной и той же схеме. Поэтому для простоты записи ограничимся далее рассмотрением системы уравнений (2).

3. Метод решения задачи 1

Обратная позиционная задача (2) представляет собой систему трех нелинейных тригонометрических уравнений. Эта система может не иметь ни одного решения (требуемое положение схвата недостижимо), иметь одно решение, иметь бесконечно много решений (требуемое положение схвата может обеспечить бесконечное количество конфигураций манипулятора). Для многосекционного манипулятора случай наличия бесконечного множества решений задачи (2) является типичным. Именно это обстоятельство позволяет ставить задачу (2), как оптимизационную задачу.

В работе [1] в качестве основного метода решения системы уравнений вида (2) рассматривается метод Ньютона. Однако этот метод требует определения на каждой итерации (аналитически или численно) значений компонентов соответствующей матрицы Якоби, а также обращения этой матрицы. Т.е. метод, во-первых, требует больших вычислительных затрат, а, во-вторых, работоспособен только в том случае, когда количество обобщенных координат не превышает количества уравнений в системе. Для рассматриваемого многосекционного манипулятора последнее требование, очевидно, не выполнимо.

Используем сведение задачи 1 к задаче нелинейного программирования. Для этого представим систему (1) в скалярном виде

$$\begin{cases} S_1 = F_1(\mathbf{q}), \\ S_2 = F_2(\mathbf{q}), \\ S_3 = F_3(\mathbf{q}), \end{cases}$$

где $S_i, F_i, i \in [1:3]$ - три первые компоненты вектора \mathbf{S} и вектор-функции \mathbf{F} соответственно. Введем в рассмотрение вспомогательную скалярную функцию

$$\Phi_0(\mathbf{q}) = \sum_{i=1}^3 (F_i(\mathbf{q}) - S_i)^2. \quad (4)$$

Тогда система уравнений (2) сводится к многомерной задаче глобальной условной оптимизации

$$\min \Phi_0(\mathbf{q}) = \Phi_0(\mathbf{q}^*), \mathbf{q} \in Q. \quad (5)$$

Задача (5) может быть решена многими методами решения многомерных задач глобальной условной оптимизации. Из соображений простоты реализации мы ориентируемся на следующую комбинацию последовательно применяемых методов:

- сведение задачи (5) к задаче глобальной безусловной оптимизации методом штрафных функций;
- сведение указанной задачи глобальной безусловной оптимизации к совокупности задач локальной оптимизации методом мультистарта;
- решение каждой из этих задач локальной безусловной оптимизации каким-либо прямым методом (методом нулевого порядка), например, хорошо себя зарекомендовавшим методом Нелдера-Мида [4].

3.1. Случай отсутствия препятствий. В этом случае множество допустимых значений вектора обобщенных координат \mathbf{q} имеет вид

$$Q = \{q_i \mid -q_i^{\max} \leq q_i \leq q_i^{\max}, i \in [1:N]\},$$

а функция штрафа задается выражением

$$W(\mu^r, \mathbf{q}) = \sum_{i=1}^N \mu_i^r \bar{q}_i^2, \quad (6)$$

где $r = 1, 2, \dots$ - номер итерации; $\mu^r = (\mu_1^r, \mu_2^r, \dots, \mu_N^r)$, $\mu_i^r > 0$ - вектор коэффициентов штрафа;

$$\bar{q}_i = \begin{cases} 0, & q_i \in [-q_i^{\max}, q_i^{\max}], \\ q_i, & q_i \notin [-q_i^{\max}, q_i^{\max}]. \end{cases}$$

Если в процессе решения задачи 1 на r -ой итерации нарушается ограничение по обобщенной координате q_i , т.е. оказывается, что $|q_i| > q_i^{\max} + \varepsilon_q$, то коэффициент штрафа μ_i^r

увеличивается (например, удваивается) и итерация повторяется с новым вектором штрафных функций μ^r . Здесь $\varepsilon_q \geq 0$ - заданная константа.

3.2. Общий случай. Пусть кроме ограничений на компоненты вектора обобщенных координат \mathbf{q} вида $|q_i| \leq q_i^{\max}$, $i \in [1:N]$, имеются ограничения на компоненты этого вектора, обусловленные наличием препятствий B_j , $j \in [1:m]$.

Если известна граница Γ множества Q , то штрафная функция может быть и в данном случае построена по рассмотренной выше схеме. Однако, поскольку эта граница определяется указанными выше препятствиями, произвольно расположенными в области достижимости манипулятора, топология границы Γ может быть весьма сложной, так что задача ее построения представляет собой самостоятельную проблему.

Используем иной способ формирования штрафной функции - построим эту функцию на основе функции штрафа (6) в виде

$$W(\mu^r, \nu^r, \mathbf{q}) = \sum_{i=1}^n \mu_i^r \bar{q}_i^2 + \sum_{j=1}^m \nu_j^r.$$

Здесь $\nu^r = (\nu_1^r, \nu_2^r, \dots, \nu_n^r)^T$ - дополнительный вектор коэффициентов штрафа, которые формируются по следующему правилу.

1) В качестве начального приближения к решению задачи используем допустимую конфигурацию \mathbf{q}^0 . Все компоненты вектора ν полагаем равными нулю.

2) Выполняем одну итерацию решения задачи глобальной условной оптимизации (5) с использованием в качестве штрафной функции $W(\mu^r, \nu^r, \mathbf{q})$.

3) Если конфигурация \mathbf{q}^r оказывается недопустимой по компонентам i_1, i_2, \dots вектора \mathbf{q}^r , то выполняем действия, указанные в следующем пункте. В противном случае продолжаем итерации по общей схеме метода штрафных функций.

4) Результаты r -ой итерации отвергаем, увеличиваем по некоторому правилу значения коэффициентов штрафа $\nu_{i_1}, \nu_{i_2}, \dots$ и переходим к п. 2.

Здесь недопустимость конфигурации \mathbf{q}^r по обобщенным координатам $q_{i_1}^r, q_{i_2}^r, \dots$ означает недопустимость положения соответствующих секций манипулятора, что определяется по следующей схеме.

1) Строим параллелепипед P , описанный вокруг области достижимости манипулятора.

2) Покрываем параллелепипед равномерной сеткой Ω с шагом ε_B по каждому из измерений.

3) Перебором всех узлов $X_{i,j,k}$ сетки Ω находим узлы, принадлежащие области B_j , $j \in [1:m]$, которые образуют дискретную аппроксимацию \tilde{B}_j множества B_j .

4) Строим дискретную аппроксимацию \tilde{B}_j^E расширенного множества B_j , $j \in [1:m]$: включаем во множество \tilde{B}_j^E все узлы множества \tilde{B}_j ; если узел $X_{i,j,k}$, принадлежащий множеству \tilde{B}_j , имеет соседний узел, не принадлежащий этому множеству, то включаем последний узел во множества \tilde{B}_j^E .

5) Положение секции манипулятора считается недопустимым, если хотя бы один узел $X_{i,j,k}$, принадлежащих хотя бы одной из областей \tilde{B}_j^E , $j \in [1:m]$, принадлежит данной секции манипулятора.

Для сокращения вычислительных затрат в программной реализации рассмотренной схемы предварительно целесообразно построить границу каждого из множеств \tilde{B}_j^E .

Заметим, что более строго допустимость положения секции манипулятора можно определить с привлечением понятия расстояния точки X , принадлежащей границе препятствия B_j , до рассматриваемой секции манипулятора. Однако постановка задачи в таких терминах приводит к алгоритмам, требующим значительно больших вычислительных затрат.

4. Метод решения задачи 2

Задача 2 поставлена, как многокритериальная задача. Используем решение этой задачи методом скалярной свертки, когда вместо векторного критерия оптимальности $J_i(\mathbf{q})$, $i \in [1:k]$ рассматривается скалярный критерий

$$\Phi_1(\mathbf{q}) = \sum_{i=1}^k \lambda_i J_i(\mathbf{q}), \lambda_i \in [0,1], \sum_{i=1}^k \lambda_i = 1,$$

где λ_i - весовой коэффициент, формализующий относительную важность частного критерия оптимальности $J_i(\mathbf{q})$ [5]. В результате задача 2 запишется в виде

$$\begin{cases} \mathbf{S}^* = \mathbf{F}(\mathbf{q}^*), \\ \min \Phi_1(\mathbf{q}) = \Phi_1(\mathbf{q}^*), \mathbf{q} \in Q. \end{cases}$$

Вместо критерия оптимальности (4) в этом случае используется критерий

$$\Phi(\mathbf{q}) = \rho_0 \Phi_0(\mathbf{q}) + \rho_1 \Phi_1(\mathbf{q}). \quad (7)$$

В результате задача сводится к решению с этим критерием многомерной задачи глобальной условной оптимизации

$$\min \Phi(\mathbf{q}) = \Phi(\mathbf{q}^*), \mathbf{q} \in Q. \quad (8)$$

В формуле (7) ρ_0, ρ_1 - положительные весовые множители, задающие относительные веса критериев оптимальности $\Phi_0(\mathbf{q}), \Phi_1(\mathbf{q}); \rho_0 + \rho_1 = 1$.

Задача (8) решается по схеме решения задачи (5), рассмотренной в п. 2.

5. Программная реализация.

Выполнено две программных реализации рассмотренного метода решения задач (5), (8) - реализация на основе языка программирования C++, а также реализация в среде пакета математических вычислений MatLab.

5.1. C++ - реализация. C++ объектно-ориентированное программное обеспечение реализует ввод исходных данных, решение задач (5), (8), визуализацию решения, а также его сохранение на жестком диске компьютера.

Язык программирования C++ использован в силу его кроссплатформенности и высокой эффективности. Оконный графический интерфейс реализован средствами кроссплатформенного инструментария Qt, а визуализация результатов – средствами Qt и библиотеки OpenGL.

Для решения задачи многомерной глобальной безусловной оптимизации, к которой сводится решение задач (5), (8), используется комбинация методов Нелдера-Мида и мултистарта.

Реализованы два критерия оптимальности конфигурации манипулятора - критерий

$$J_1(\mathbf{q}) = g \sum_{i=1}^N M_i h_i^C(\mathbf{q}),$$

формализующий его потенциальную энергию, и критерий

$$J_2(\mathbf{q}) = \sum_{i=1}^N q_i^2,$$

формализующий суммарную кривизну манипулятора. Здесь g - ускорение свободного падения; M_i - масса i -ой секции манипулятора; h_i^C - расстояние центра тяжести i -ой секции до плоскости $0_0x_0y_0$.

Отметим следующее обстоятельство. В случае, когда в качестве критерия оптимальности конфигурации манипулятора используется его кривизна, т.е. когда $\Phi_1(\mathbf{q}) = J_2(\mathbf{q})$, в процессе решения задачи (8) по мере приближения схвата 0_n к его

требуемому положению значения критерия оптимальности $\Phi_0(\mathbf{q})$ стремятся к нулю. В то же время, за исключением вырожденного случая, когда все секции манипулятора лежат на одной прямой, значения критерия оптимальности $\Phi_1(\mathbf{q})$ отличны от нуля. Поэтому при решении задачи (8) можно не добиться точного совмещения схвата O_n с требуемой точкой при любых фиксированных значениях коэффициентов ρ_0, ρ_1 . В таком случае для повышения точности позиционирования схвата целесообразно использовать решение задачи в два этапа. На первом этапе путем решения задачи (8) с некоторыми постоянными весовыми коэффициентами ρ_0, ρ_1 находится конфигурация манипулятора, имеющая близкую к минимальной кривизну. На втором этапе, исходя из полученной конфигурации манипулятора, частное ρ_0/ρ_1 увеличивается до тех пор, пока не будет достигнута требуемая точность позиционирования схвата. Для каждого отношения ρ_0/ρ_1 при этом решается задача (8).

5.2. MatLab-реализация выполнена на языке MatLab в среде Matlab 7.9.0 (R2009b) с использованием Matlab-расширения Optimization Toolbox и расширения Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox, которые предназначены для решения оптимизационных задач.

Для решения задачи многомерной глобальной безусловной оптимизации, к которой сводится решение задач (5), (8), используется комбинация метода на основе генетического алгоритма, реализованного в программе `ga(fitnessfcn,nvars)`, и метода мультистарта [15].

Основные вычисления выполняются в модулях `createFmin`, `gastat.m`.

Модуль `createFmin` реализует графический интерфейс пользователя и служит для задания параметров манипулятора: координаты целевой точки; размеры секций манипулятора и их количество. Модуль `gastat.m` содержит набор инструкций для сбора информации о работе генетического алгоритма и сохранения её на жесткий диск компьютера.

6. Примеры.

Рассматривается манипулятор из 7 цилиндрических секций, длины которых убывают в геометрической прогрессии. Эксперименты выполнены с 2-х и 3-х мерными моделями манипулятора.

6.1. C⁺⁺ - реализация. Некоторые результаты экспериментов, выполненных с помощью C⁺⁺ - реализации, приведены на рисунках 2 – 5.

Рисунки 2, 3 иллюстрируют результаты исследования 2-х мерной модели манипулятора при отсутствии препятствий. Рисунок 2 демонстрирует эффект учета кривизны манипулятора. Здесь и далее символ \otimes обозначает целевую точку.



Рис. 2. Оптимальная конфигурация манипулятора:
двумерный случай; препятствия отсутствуют

На рисунках 2а), 2б) положения точек 0_0 , 0_7 одинаковы, но для конфигурации, представленной на рис. 2а), суммарная кривизна равна $J_2(\mathbf{q}) = 46,5$, а для конфигурации, представленной на рис. 2б) – равна $J_2(\mathbf{q}) = 118,5$.

Процесс последовательного приближения схвата к целевой точке в процессе итераций показывает рис. 3.

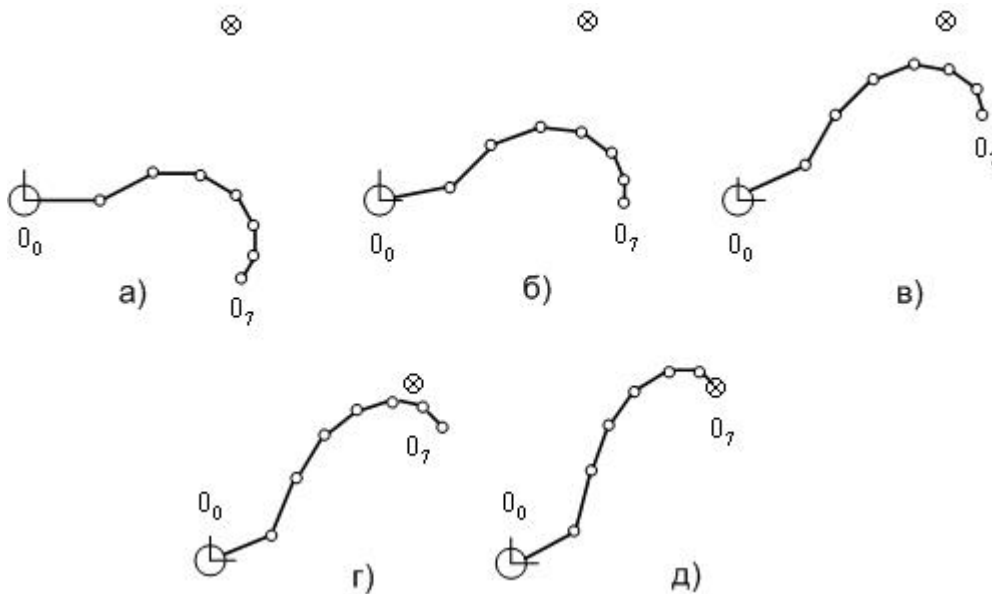


Рис. 3. Приближение схвата манипулятора к целевой точке в процессе итераций:
двумерный случай; препятствия отсутствуют

Рисунок 4 иллюстрирует неоднозначность задачи планирования целевой конфигурации манипулятора – на каждом из рисунков 4а) – 4е) положения точек 0_0 , 0_7 одинаковы, хотя конфигурации манипулятора существенно различны.

Результаты экспериментов с 3-х мерной моделью при наличии двух шаровых препятствий иллюстрирует рис. 5.

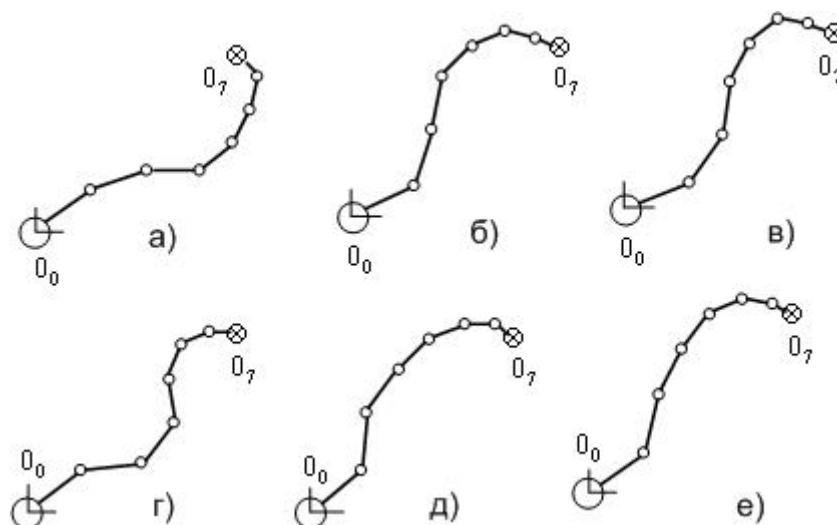


Рис. 4. Различные конфигурации манипулятора, соответствующие одной и той же целевой точке: двумерный случай; препятствия отсутствуют

Рисунок 4 иллюстрирует неоднозначность задачи планирования целевой конфигурации манипулятора – на каждом из рисунков 4а) – 4е) положения точек O_0 , O_7 одинаковы, хотя конфигурации манипулятора существенно различны.

Результаты экспериментов с 3-х мерной моделью при наличии двух шаровых препятствий иллюстрирует рис. 5.

6.2. Matlab - реализация. Целью экспериментов с MatLab реализацией было сравнение эффективности планирования целевой конфигурации манипулятора с использованием алгоритма многомерной безусловной оптимизации на основе метода Нелдера-Мида и генетического алгоритма. Итоговые результаты этого сравнения, выполненные для двухмерной задачи, приведены на рис. 6.

Рисунок 6 показывает, что с точки зрения среднего количества вычислений критерия оптимальности (количества испытаний), генетический алгоритм существенно проигрывает методу Нелдера-Мида при высокой требуемой точности оптимизации. Наоборот, при невысокой точности – генетический алгоритм дает заметный выигрыш. Этот вывод позволяет рекомендовать использование комбинации генетического алгоритма с методом Нелдера-Мида, так чтобы на начальных итерациях для поиска грубого приближения к решению применялся генетический алгоритм, а для уточнения решения – метод Нелдера-Мида.

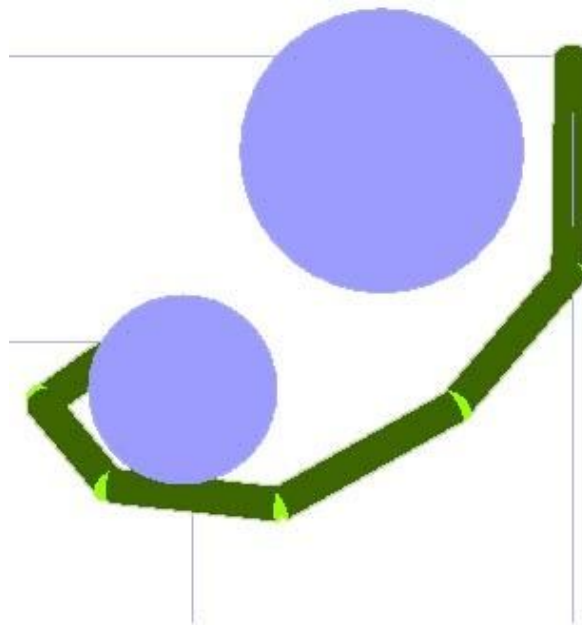


Рис. 5. Оптимальная конфигурация манипулятора:
трехмерный случай; два шаровых препятствия

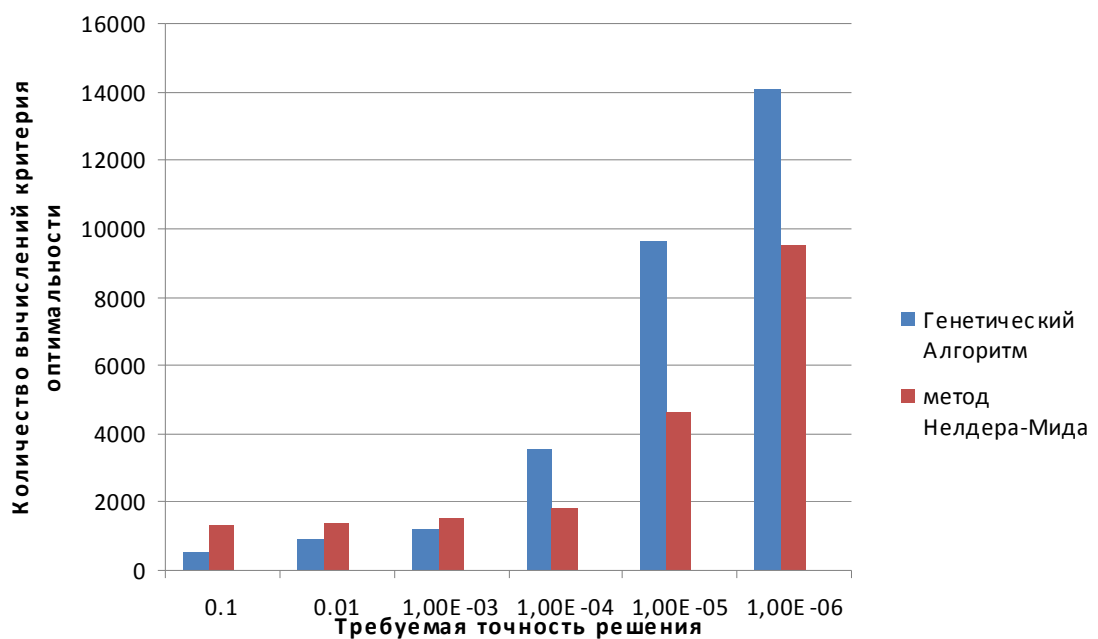


Рис. 6. Сравнение эффективности метода Нелдера –Мида и генетического алгоритма:
двухмерный случай; препятствия отсутствуют

Заключение

В работе поставлены две задачи планирования целевой конфигурации многосекционного манипулятора типа “хобот”. В первой из задач критерий оптимальности формализует только близость схвата манипулятора к целевой точке. Во второй задаче

дополнительно введены критерии оптимальности, формализующие, например, потенциальную энергию манипулятора, его суммарную кривизну и т.п.

В обоих случаях решение задачи сведено к задаче многомерной глобальной условной оптимизации. Эта задача с помощью метода штрафных функций сведена к задаче многомерной глобальной безусловной оптимизации, для решения которой используется метод Нелдера-Мида в комбинации с методом мултистарта, а также генетический алгоритм.

Программная реализация комбинации методов Нелдера-Мида и мултистарта выполнена на языке программирования C++, оконный графический интерфейс реализован средствами инструментария Qt, а визуализация результатов – средствами Qt и библиотеки OpenGL.

Программная реализация оптимизации целевой конфигурации манипулятора с помощью генетического алгоритма выполнена в среде Matlab 7.9.0 с использованием пакетов расширения Optimization Toolbox и Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox.

Апробация разработанного программного обеспечения произведена для двумерной задачи без препятствий и для трехмерной задачи с двумя шаровыми препятствиями. результаты решения указанных задач показали работоспособность и высокую эффективность предложенных методов, алгоритмов и программного обеспечения.

Авторы выражают благодарность Ю.Т. Каганову за плодотворные обсуждения постановки задачи и методов ее решения, а также Богомолу А.В. и Жук Е.А. за помощь в проведении экспериментов с генетическим алгоритмом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глазунов В.А., Колискор А.Ш., Крайнев А.Ф. Пространственные механизмы параллельной структуры.- М.: Наука, 1991.- 94 с.
2. Интеллектуальные системы автоматического управления / Под ред. И.М. Макарова, В.М. Лохина.- М.: Физматлит, 2001.- 576 с.
3. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Основы управления манипуляционными роботами.- М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.- 480 с.
4. Грешилов А.А. Математические методы принятия решений.- М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006.- 584 с.
5. Штойер Р. Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения.– М.: Радио и связь, 1992.- 504 с.
6. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач.– М.: Наука, 1979.– 285 с.

7. Кирильченко А.А., Зуева Е.Ю., Платонов А.К., Соколов С.М. Формальные подходы к проектированию алгоритмов информационного обеспечения мобильных систем (выбор пути, навигация, надежность).- М.: Препринт Ин-та прикл. матем. им. М.В.Келдыша РАН, 2008, 32 с.
8. Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. // "IEEE Int. Conf. Robotics and Automation", 1985, pp. 500-505.
9. Brooks R.A. Self calibration of motion and stereo vision for mobile robots // "IEEE Int. Robotics and Automation", 1986, 2:14.
10. Платонов А.К., Кирильченко А.А., Колганов М.А. Метод потенциалов в задаче выбора пути: история и перспективы. // М.: Препринт Ин-та прикл. матем. им. М.В.Келдыша РАН, 2001, № 40, 32 с.
11. Пшихопов В.Х. Организация репеллеров при движении мобильных роботов в среде с препятствиями // Мехатроника, автоматизация, управление, 2008, №2, С.34-41.
12. Steven M. LaValle. Planning Algorithms.- Cambridge University Press, 2006.- 842 p. (<http://msl.cs.uiuc.edu/planning>).
13. Каганов Ю.Т., Карпенко А.П. Математическое моделирование кинематики и динамики робота-манипулятора типа «хобот». 1. Математические модели секции манипулятора, как механизма параллельной кинематики типа «трипод» // Наука и образование: электронное научно-техническое издание, 2009, 10, (<http://technomag.edu.ru/doc/133262.html>).
14. Каганов Ю.Т., Карпенко А.П. Математическое моделирование кинематики и динамики робота-манипулятора типа «хобот». 2. Математические модели секции манипулятора, как механизма параллельной кинематики типа «гексапод» // Наука и образование: электронное научно-техническое издание, 2009, 11, (<http://technomag.edu.ru/doc/133731.html>).
15. Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox // (<http://matlab.exponenta.ru/genalg/index.php>).