

На правах рукописи

Орлов Игорь Александрович

**СИНТЕЗ ДВИЖЕНИЯ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ
СИСТЕМ ДЛЯ ПРОСТРАНСТВ СО СЛОЖНЫМИ
СВЯЗЯМИ И ОГРАНИЧЕНИЯМИ**

01.02.01 — Теоретическая механика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Москва — 2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном
учреждении науки Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша
Российской академии наук

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Павловский Владимир Евгеньевич

Официальные оппоненты: **Кугушев Евгений Иванович**
доктор физико-математических наук,
профессор
Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

Яцун Сергей Федорович
доктор технических наук, профессор
Юго-Западный государственный
университет, заведующий кафедрой
«Теоретической механики и мехатроники»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Брянский государственный
технический университет»

Защита состоится __ октября 2013 г. в __-- часов на заседании дис-
сертационного совета Д 002.024.01 при ИПМ им. М.В.Келдыша РАН по ад-
ресу: 125047, Москва, Миусская пл., д.4

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПМ им.
М.В.Келдыша РАН.

Автореферат разослан __ сентября 2013 года.

Ученый секретарь диссертационного совета

д. ф.-м. н.



Полилова Татьяна Алексеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена решению задачи синтеза движения манипуляционных роботов при работе в пространствах со сложными связями и ограничениями. В работе предлагается единая технология синтеза движения механических систем: специальный кинематический и динамический анализ задачи, построение соответствующих алгоритмов планирования траекторий с учетом пространственных ограничений и связей, налагаемых на систему и на их основе построение систем управления роботами - в рамках которой рассматриваются три модельные задачи. Для их решения создаются динамические модели роботов в программном комплексе «Универсальный механизм», а также созданы два лабораторных макета манипуляторов (робот ManGo со SCARA-подобной кинематикой на пневматических приводах и избыточный манипулятор SnakeMan на сервоприводах) для натуральных экспериментов.

Актуальность темы

В настоящее время несмотря на то, что теоретически манипуляторы являются универсальными устройствами, которые могут использоваться в самых разных ситуациях, из технических соображений их проектируют с учетом конкретных задач и функций, которые они будут выполнять. От объема и качества рабочего пространства манипулятора, жесткости его конструкции и других характеристик зависит кинематика и динамика манипулятора. Отмеченные факторы делают актуальной цель работы - синтез движения манипуляционных роботов под конкретные задачи с учетом возможных ограничений или сложных связей, налагаемых на рабочее пространство создание и исследование систем управления и динамических моделей манипуляторов с различной кинематикой.

Объект исследования

Компьютерные модели и лабораторные макеты следующих робототехнических систем: манипулятор РМ-01, оснащенный инструментом для проведения «мягких» операций, в частности, процедуры массажа; SCARA-подобные манипуляторы ManGo на пневматических приводах, предназна-

ченные для решения операционных задач в плоскости, гиперизбыточный манипулятор SnakeMan, предназначенный для работы в стесненных средах.

Предмет исследования

Динамические процессы, протекающие в управляемых манипуляционных системах при работе в пространствах со сложными связями и ограничениями.

Цель работы

Исследование синтеза движения манипуляционных роботов для конкретных задач с учетом возможных ограничений или сложных связей, налагаемых на механическую систему. Построение систем управления, реализующих это движение.

Задачи

Рассматриваются три типа задач:

1. Работа манипулятора с податливой средой;
2. Манипулирование предметом в плоскости двумя манипуляторами;
3. Движение гиперизбыточного манипулятора в стесненной среде.

Для каждой задачи решаются следующие подзадачи:

- Кинематический анализ задачи;
- Построение динамической модели робота и рабочего пространства в программном комплексе «Универсальный механизм» (УМ);
- Разработка алгоритмов планирования траекторий движения;
- Синтез систем управления;
- Эксперименты на компьютерных моделях и лабораторных макетах роботов;
- Анализ характеристик предложенных методов и алгоритмов.

Методы исследования

Поставленные задачи решаются с применением методов теоретической и прикладной механики, теории робототехнических систем, вычислительной математики и систем управления. Исследование работоспособности предложенных в работе методов и алгоритмов проводится путем построения моделей в программных комплексах «Универсальный механизм», MATLAB Simulink, Mathematica и САПР-программах, а также путем отработки их на собранных для этих целей макетах роботов.

Научная новизна и положения, выносимые на защиту

В процессе проведения теоретических и экспериментальных исследований в работе получены следующие новые научные результаты:

- Разработана модель позиционно-силового управления системой робот-инструмент при работе с податливой средой;
- Исследована кинематика и синтезировано управление двух манипуляторов с пневматическими приводами при работе с одним предметом в плоскости;
- Предложен оригинальный алгоритм построения траекторий для работы избыточного манипулятора в стесненной среде.

Достоверность результатов. Основные научные результаты диссертации.

Основные научные результаты диссертации получены на основе фундаментальных положений и методов теоретической механики, динамики машин, экспериментальных методов исследования. Теоретические результаты подтверждены экспериментальными данными и соответствуют теоретическим оценкам. Синтезировано три типа движения роботов для поставленных задач. Построена модель комбинированного позиционно-силового управления системой робот-инструмент для работы с податливой средой, алгоритм позиционного управления для работы двух манипуляторов при наличии общих геометрических связей, разработан и исследован алгоритм планирования траекторий движения для избыточного манипулятора

в стесненной среде. Собраны макеты роботов для проведения экспериментов.

Практическая ценность

В работе предложены алгоритмы синтеза движения манипуляционных систем для работы в пространствах с ограничениями и при наличии сложных связей, налагаемых на механическую систему. Разработанные системы управления и алгоритмы планирования траекторий могут быть использованы в промышленных и бытовых манипуляционных системах для решения поставленных задач. Разработано два прототипа манипуляторов для задач работы в плоскости:

- при наличии геометрических связей между двумя роботами и инструментом;
- при наличии ограничений, налагаемых на рабочее пространство.

Апробация диссертации

Основные положения работы докладывались на:

- Международной молодежной научно-практической конференции «Мобильные роботы и мехатронные системы», НИИ механики МГУ (г. Москва);
- Международной научно-технической конференция «Экстремальная робототехника» (ЭР-2011, г. Санкт-Петербург);
- 4-ой Всероссийской мультikonференция по проблемам управления (МКПУ-2011, в пос. Дивноморское Геленджикского района);
- III Российско-тайваньском симпозиуме «Современные проблемы интеллектуальной мехатроники, механики и управления», НИИ механики МГУ (г. Москва);
- семинарах кафедры теоретической механики и мехатроники МГУ им. М.В. Ломоносова;

- семинарах Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 5 работ, включая 1 статью в рецензируемом журнале.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, дана общая характеристика диссертации, показана научная новизна и практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту. Приведен обзор современных манипуляционных роботов и систем их управления, предназначенных для решения задач, подобных поставленным в данной работе.

В первой главе исследуется задача работы манипулятора с податливой средой. Рассматривается модель манипулятора, который используется в механотерапии, а именно для массажа человека. В качестве прототипа рассматривается манипулятор РМ-01 с рабочим инструментом для проведения процедуры массажа, разработанным в Московском государственном индустриальном университете.

При работе с пациентом особое внимание уделяется безопасности выполнения процедур, что обеспечивается, в том числе, включением в контур управления «врач \rightarrow робот \rightarrow пациент» модели робота: «врач \rightarrow **модель робота** \rightarrow робот \rightarrow пациент» – на которой отрабатываются алгоритмы управления.

В рамках поставленной задачи построены математическая и динамическая модели манипулятора, инструмента и рабочей поверхности в программном комплексе «Универсальный механизм» (УМ), см. рис. 1.

Рабочий инструмент компьютерной модели состоит из двух графических элементов (ГЭ): цилиндра и сферы. Высота цилиндра $h_{ef} = 90$ мм, радиус оснований равен 20 мм. Радиус сферы равен 30 мм. Центр сферы и одного из оснований цилиндра совпадают.

Рабочая поверхность состоит также из двух ГЭ – сферы (собственно

контактной поверхности), заданной параметрически, и цилиндра («подставки» для сферы). Формула, задающая сферу, имеет вид:

$$\begin{cases} x = x_s + R \sin \alpha \cos \beta, \\ y = y_s + R \sin \alpha \sin \beta, \\ z = z_s + R \cos \alpha, \end{cases} \quad \alpha \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right], \quad \beta \in [0, 2\pi),$$

где, в нашем случае, $x_s = 0,4$, $y_s = 0$, $z_s = 0,3$, $R = 0,12$.

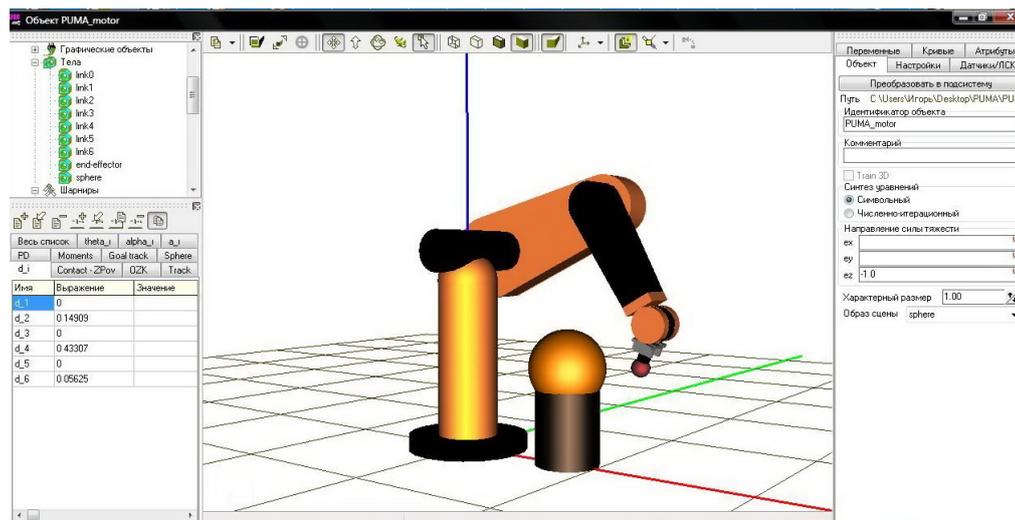


Рис. 1: Деревяно-структура и общий вид РМ-01 и рабочей поверхности в UM.

Для построения модели системы управления, наиболее адекватно отвечающей задаче, исследуется кинематика робота и рабочего инструмента. Модель системы управления для данной задачи создается в среде MATLAB Simulink, затем импортируется в UM и связывается с моделью механической части, что в итоге позволяет исследовать динамику движения управляемой системы привод-манипулятор (рис. 2).

В работе реализована классическая модель привода с ПД-регулятором, в качестве двигателя рассматривается двигатель постоянного тока с независимым возбуждением и управлением по напряжению:

$$\begin{cases} u = iR + C_\omega \dot{\theta}, \\ M = C_m i. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь I – ток в цепи якоря двигателя, C_m – коэффициент электромагнитного момента, C_ω – коэффициент противо-э.д.с. двигателя, R – активное сопротивление цепи якоря двигателя, M – момент двигателя.

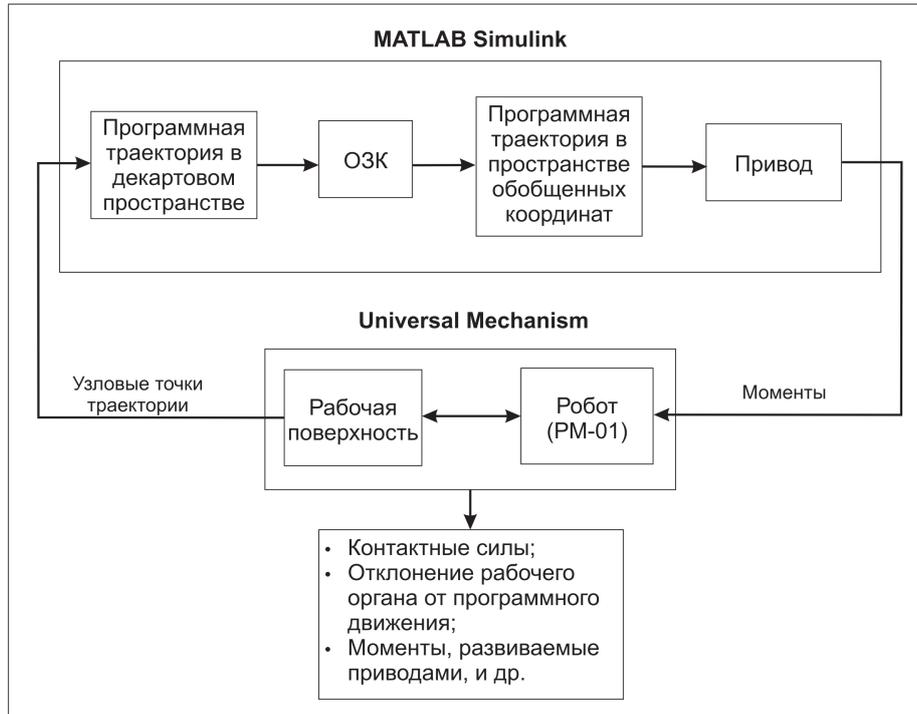


Рис. 2: Блок-схема взаимодействия MATLAB Simulink и UM.

Для моделирования контактного взаимодействия в UM используется силовой элемент типа «контакт сфера - сфера», реализующий модель податливого контакта, при котором допускается внедрение контактирующих элементов одного тела в поверхность, связанную с другим телом. Нормальная сила определяется в соответствии с моделью вязкоупругого взаимодействия, касательная сила вычисляется в соответствии с моделью сухого трения:

$$\mathbf{N} = -(c\Delta z + k\Delta\dot{z})\boldsymbol{\nu}, \quad (2)$$

$$\mathbf{F} = \begin{cases} -fN\mathbf{v}/|\mathbf{v}|, & |\mathbf{v}| > v_f, \\ -fN\mathbf{v}/v_f, & |\mathbf{v}| \leq v_f, \end{cases} \quad (3)$$

где \mathbf{N} — нормальная реакция, \mathbf{F} — сила сухого трения, $\boldsymbol{\nu}$ — нормаль к поверхности, Δz — глубина погружения рабочего инструмента, c, k — параметры поверхности, \mathbf{v} — скорость проскальзывания, f — коэффициент трения, v_f — достаточно малая величина.

В ходе работы построены модели позиционного и комбинированного позиционно-силового управления для системы робот-инструмент, при условии что инструмент оснащен поступательным приводом. Для позиционно-силового управления инструмент выступает в роли фиктивного сочленения

робота. Таким образом, для шести сочленений робота реализовано позиционное управление, а для фиктивного сочленения – силовое. Силовое управление задается следующим законом:

$$f = m \left[\frac{k_{pf}}{k_p} e_f - k_{vf} \dot{x} \right] + f_e. \quad (4)$$

Здесь $e_f = f_d - f_e$ – разница между желаемой силой f_d и измеряемой силой f_e , k_{pf} , k_{vf} – коэффициенты усиления ПД-регулятора.

Далее в главе проведен сравнительный анализ позиционного и комбинированного позиционно-силового управлений. Исследовано силовое управление инструментом манипулятора на предмет максимально быстрого не осциллирующего отклика системы. Численным экспериментом найдены коэффициенты усиления для силового управления, отвечающие данному критерию. Исследована задача планирования траекторий на модели рабочей поверхности. Показана зависимость между количеством узловых точек траектории и силовой ошибкой. Для сферической поверхности и траектории, представляющей собой ломаную, состоящую из отрезков равной длины, интерполяция по $n + 2$ узловым точкам уменьшает силовую ошибку в m раз:

$$m = \frac{\sin^2 \frac{\phi}{4n}}{\sin^2 \frac{\phi}{4}}, \quad (5)$$

где ϕ – центральный угол дуги, концы которой есть соседние точки траектории.

Для сферической поверхности радиуса 0.12 метров при прохождении вдоль ломаной с 7 узловыми точками расположенными равномерно на дуге длины π силовая ошибка при позиционном управлении превышает заданную контактную силу в 3 раза, а при комбинированном позиционно-силовом управлении силовая ошибка не превышает 5% заданной силы.

Во второй главе рассматривается динамическая модель манипулятора со SCARA-подобной кинематикой (ManGo), разработанного автором в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН (см. рис. 3). В главе решается задача манипулирования одним предметом в плоскости двумя роботами ManGo. В рамках поставленной задачи исследуется кинематика манипулятора ManGo и зависимость объема рабочего пространства от точек крепления пневмоцилиндров. Кинематическая схема робота изображена на рисунке 4.



Рис. 3: Манипулятор типа SCARA. ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

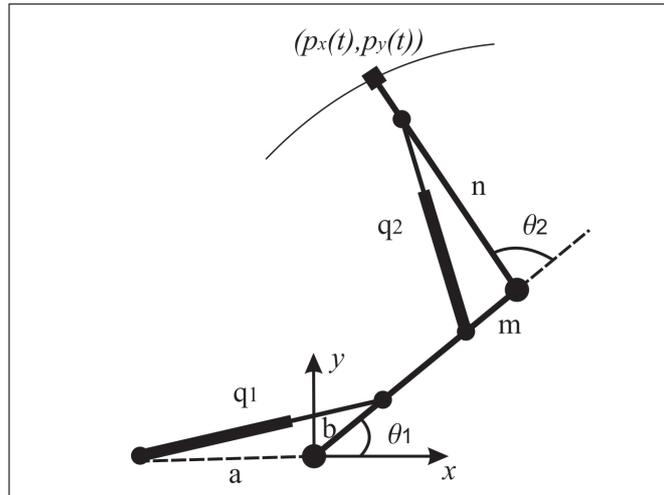


Рис. 4: Кинематическая схема манипулятора ManGo.

Здесь l – длины звеньев, θ_1, θ_2 – углы в сочленениях, a, b, m, n – расстояния от сочленений до точек крепления цилиндров, q_1, q_2 – ходы цилиндров, D_1, D_2 – длины цилиндров в сложенном состоянии.

По заданным минимальным и максимальным длинам цилиндров, положению первого сочленения, длинам звеньев, находятся точки крепления цилиндров к звеньям, обеспечивающие заданное рабочее пространство робота. Для этого решается следующая система уравнений относительно k и p :

$$\begin{cases} h_{min}^2 = k^2 + p^2 + 2kp \cos \theta_{min}, \\ h_{max}^2 = k^2 + p^2 + 2kp \cos \theta_{max}, \end{cases} \quad (6)$$

где h_{min}, h_{max} – принимают значения 1-ого и 2-ого цилиндров в сложенном и разложенном состоянии соответственно, k, p – принимают значения a, b и m, n для 1-ого и 2-ого цилиндра соответственно.

Далее синтезируется позиционное управление для двух таких роботов

при совместном манипулировании одним предметом, для чего исследуются геометрические связи с точки зрения планирования траекторий движения.

Пусть заданы следующие системы отсчета (см. рис. 5):

$\{G\}$ – система отсчета, связанная с телом, начало которой находится в точке, траектория которой нас интересует;

$\{S\}$ – система отсчета, связанная с рабочим пространством (в ней задается движение тела);

$\{B_i\}$ – системы отсчета, связанные с неподвижными основаниями роботов;

${}^S P$ – вектор, задающий движение точки тела в системе $\{S\}$;

${}^G r_i$ – векторы точек, в которых манипуляторы держат тело, в системе $\{G\}$.

Формулы, описывающие взаимодействие двух и более манипуляторов при одновременном оперировании одним инструментом, следующие:

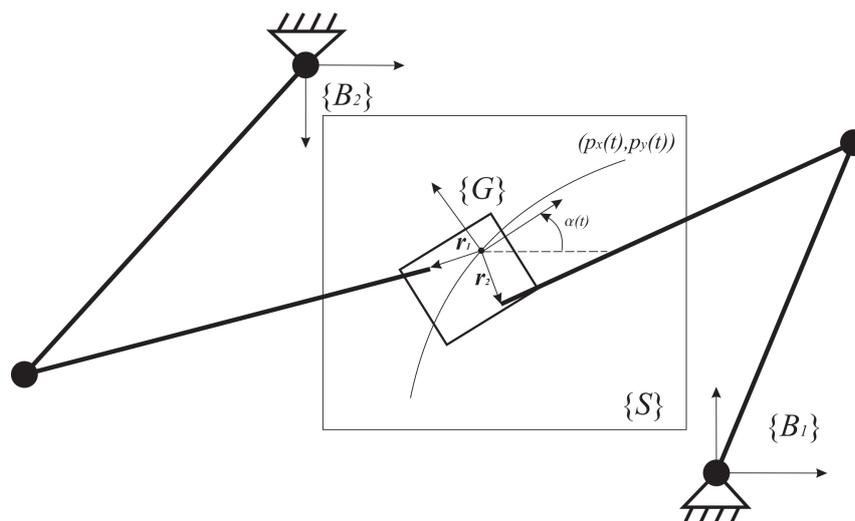


Рис. 5: Системы отсчета роботов, пространства и тела.

$${}^{B_i} P_i = {}^{B_i} P + {}^{B_i} r_i, \quad (7)$$

где

$${}^{B_i} P = {}^{B_i} R {}^S P + {}^{B_i} P_{SORG}, \quad (8)$$

$${}^{B_i} r_i = {}^{B_i} R {}^S r_i + {}^{B_i} P_{SORG} = {}^{B_i} R ({}^S R {}^G r_i + {}^S P_{GORG}) + {}^{B_i} P_{SORG}, \quad (9)$$

где ${}^A_B R$ – матрица вращения, описывающая поворот системы $\{B\}$ относительно системы $\{A\}$, ${}^A P_{BORG}$ – вектор, локализирующий начало системы $\{B\}$ в системе $\{A\}$. Таким образом, получены уравнения, позволяющие задать движение схватов манипуляторов в системах отсчета, связанных с их основаниями. В качестве модельной задачи рассматривается перемещение тела вдоль прямой с заданной ориентацией и скоростью. Траектория тела задается в системе отсчета $\{S\}$ и далее, с использованием формулы (7)-(9), рассчитываются траектории движения в системах отсчета $\{B_1\}$ и $\{B_2\}$ для схватов манипуляторов. Модели позиционного управления и робота ManGo построены в УМ. Показана работоспособность данных моделей. Таким образом, они могут быть использованы на реальных роботах данного типа. Для натуральных экспериментов разработаны манипуляторы с пневматическими приводами (см. рис. 3), поэтому они отличаются высоким быстродействием и могут развивать большие усилия.

В третьей главе рассматриваются вопросы моделирования динамики избыточных манипуляторов в задачах планирования траекторий в стесненных средах. В данной задаче рассматривается n -звенный «плоский» манипулятор, длины звеньев манипулятора равны l_i , массы – m_i . Первое звено двумя вращательными шарнирами закреплено в точке (x_0, y_0, z_0) . Углы в шарнирах соответственно ϕ_i, ψ_1 (см. рис. 6).

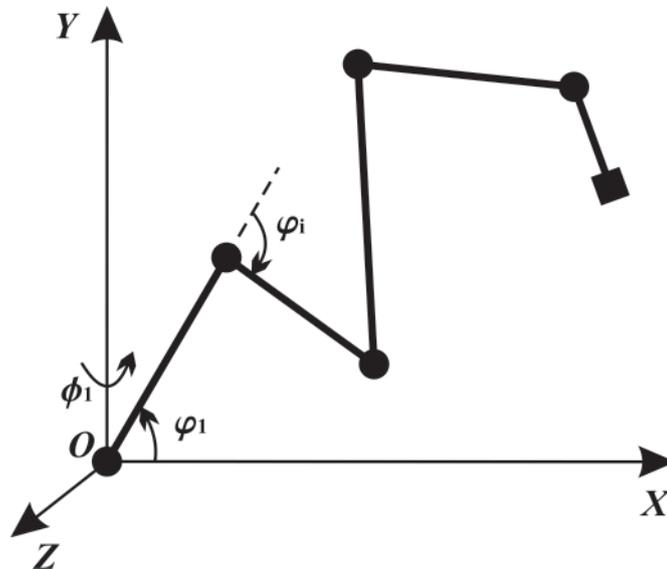


Рис. 6: Кинематическая схема гиперизбыточного манипулятора.

В качестве стесненного пространства рассматривается плоская область

(тоннель) в плоскости Oxy , ограниченная прямолинейными отрезками вида: $x_i = a_i t + b_i, y_i = c_i t + d_i, t \in t_{i1}, t_{i2}, i=1, \dots, 2k$, где k – количество колен тоннеля (см. рис. 7).

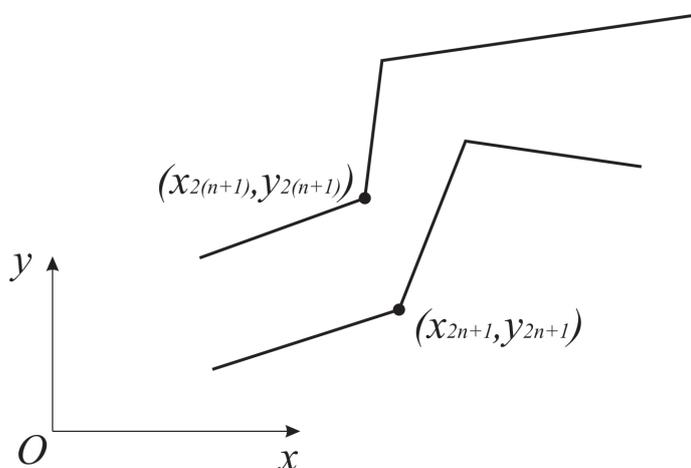


Рис. 7: Геометрическая схема тоннеля.

Предлагается оригинальный алгоритм, позволяющий эффективно планировать траектории для многозвенных манипуляторов, работающих в тоннеле (трубе), когда стоит задача достижения целевой точки без соприкосновения со стенками тоннеля.

На параметры трубы накладываются следующие ограничения:

- Расстояние между двумя соседними угловыми точками превышает длину l самого длинного звена манипулятора;
- Ширина самого узкого места тоннеля больше, чем $l/2$.

Для реализации управления манипулятором, обеспечивающего прохождение тоннеля без столкновений, сначала генерируются траектории движения всех звеньев манипулятора, заведомо гарантирующие беспрепятственное движение в тоннеле, а затем находится решение обратной задачи кинематики, позволяющее построить систему позиционного управления. Из геометрической схемы тоннеля находятся угловые точки. Затем с центром в этих точках строятся окружности радиуса больше, чем половина длины самого большого звена робота. Далее находятся общие касательные к каж-

дым двум соседним окружностям, для чего решается система уравнений:

$$\begin{cases} (X_j - x_j)(X_{j+1} - x_j) - (Y_j - y_j)(Y_{j+1} - y_j) = r^2, \\ (X_{j+1} - x_{j+1})(X_j - x_{j+1}) - (Y_{j+1} - y_{j+1})(Y_j - y_{j+1}) = r^2, \\ (X_j - x_j)^2 + (Y_j - y_j)^2 = r^2, \\ (X_{j+1} - x_{j+1})^2 + (Y_{j+1} - y_{j+1})^2 = r^2. \end{cases} \quad (10)$$

Здесь (x_j, y_j) , (x_{j+1}, y_{j+1}) – центры соседних окружностей, (X_j, Y_j) ,

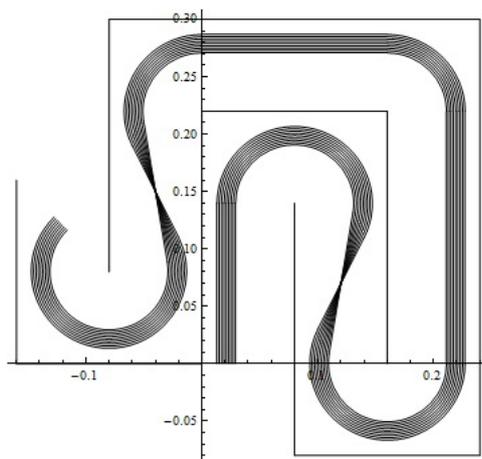


Рис. 8: Сгенерированное семейство траекторий в пакете Mathematica.

(X_{j+1}, Y_{j+1}) – точки касания общей касательной к этим окружностям. В зависимости от последовательности поворотов (вправо-влево, влево-вправо, вправо-вправо, влево-влево) выбирается необходимая касательная и строится траектория движения. Траектория состоит из отрезков касательных, ограниченных точками касания, и дуг окружностей, также ограниченных этими точками. Данный алгоритм построения траекторий реализован в пакете Wolfram Mathematica (рис. 8).

Далее в данной главе доказывается корректность предложенного алгоритма, использован метод доказательства от противного.

Обратная задача кинематики для избыточного манипулятора решается с помощью УМ. Между траекторией, сгенерированной по построенному алгоритму, и сочленениями манипулятора назначается контактная сила, которая во время движения удерживает все звенья на траектории. Таким образом, в пакете УМ находятся зависимости углов в сочленениях от времени, которые затем можно использовать на реальном роботе.

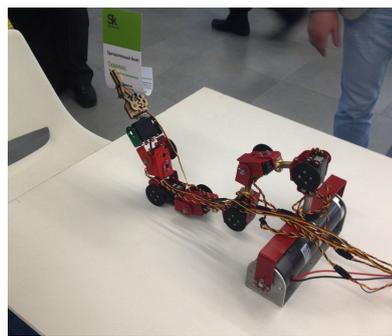
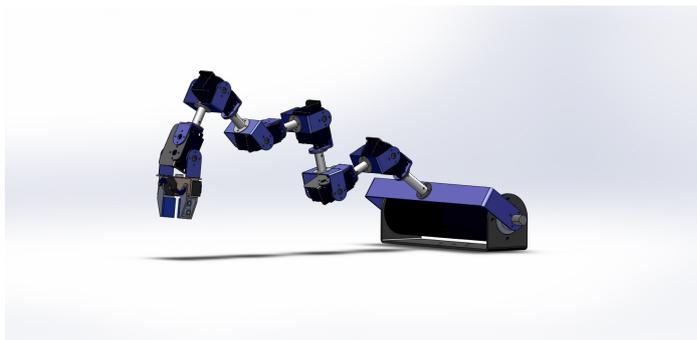


Рис. 9: Манипулятор SnakeMan. ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

Поставленные эксперименты в УМ показали работоспособность предложенного алгоритма построения траекторий в тоннеле. Для натуральных экспериментов был создан лабораторный макет робота, который изображен на рисунке 9.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе проведенных исследований и обобщений в диссертации получены следующие научные и практические результаты:

1. Построены математические и динамические модели манипуляторов, отвечающие целям поставленных задач.
2. Исследованы задачи планирования траекторий движения.
 - В задаче взаимодействия манипулятора РМ-01 с вязко-упругой средой построен алгоритм планирования прямолинейного движения в декартовом пространстве. Построена зависимость между количеством узловых точек траектории и силовой ошибкой контактного взаимодействия.
 - Исследована задача планирования траекторий движения в плоскости для двух SCARA-подобных манипуляторов при наличии геометрических связей между схватами роботов. Получены кинематические уравнения, связывающие траектории движения в системе отсчета рабочего пространства с траекториями движения в системах координат, связанных с основаниями роботов. На основе данных уравнений построен алгоритм планирования траекторий движения. Экспериментально обоснована корректность

предложенного алгоритма, а также возможность его распространения на любое количество роботов, одновременно оперирующих одним предметом.

- Построен алгоритм планирования траекторий для гиперизбыточного манипулятора в стесненной среде. Разработана программа для генерации траекторий в тоннеле, а также метод численного решения обратной задачи кинематики для отработки полученных траекторий «плоским» манипулятором с произвольным количеством звеньев в пакете «Универсальный механизм». Доказана корректность данного алгоритма для тоннелей с ограничениями.

3. Синтезированы следующие модели систем управления:

- Позиционного и комбинированного позиционно-силового управления с обратной связью для работы робота с податливой средой. Проведен сравнительный анализ такого управления с классическим позиционным управлением. Модель блока управления разработана в пакете Matlab Simulink что позволяет использовать его как для механической компьютерной модели (например в пакете UM), так и для управления реальным роботом. Исследовано силовое управление инструментом манипулятора на предмет максимально быстрого не осциллирующего отклика системы. Экспериментально найдены коэффициенты усиления для силового управления.
- Позиционного управления с обратной связью для работы робота со SCARA-подобной кинематикой. Спроектирован и собран макет дешевого робота ManGo с использованием пневмоприводов, обеспечивающий высокие скорости работы и большие усилия, для натуральных экспериментов.
- Позиционного управления избыточного манипулятора, которое было реализовано и успешно опробовано на макете робота SnakeMan с использованием сервоприводов для натуральных экспериментов.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

Публикации в рецензируемых научных журналах

1. Головин В.Ф., Журавлев В.В., Архипов М.В., Павловский В.Е., **Орлов И.А.**. Особенности математического моделирования многосуставного робота, взаимодействующего с упругой динамической средой. / Научно-техническая информация. Серия 2: Информационные процессы и системы. М.: ВИНТИ. 2012. №12. С. 16-27.

Другие публикации

2. **Орлов И.А.**, Павловский В.Е.. Динамическое моделирование процессов функционирования роботов для механотерапии. / Тр. международной молодежной научно-практической конференции «Мобильные роботы и мехатронные системы». М.: Изд-во Московского университета. 2011. С. 114-116.
3. Павловский В.Е., **Орлов И.А.** Динамическая модель робота для механотерапии. / Тр. международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». СПб.: Изд-во «Политехника-сервис». 2011.
4. Павловский В.Е., **Орлов И.А.**, Головин В.Ф., Журавлев В.В. Динамическое моделирование процессов функционирования роботов для механотерапии. / Материалы 4-й Всероссийской мультikonференции по проблемам управления. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ. 2011. Т. 2. С. 232-233.
5. **Orlov I.A.**, Aliseychik A.P. Dynamic Modeling of the Redundant Manipulator in a Constrained Environment. / III российско-тайваньский симпозиум «Современные проблемы интеллектуальной мехатроники, механики и управления». Сборник трудов. М.: Изд-во Московского университета. 2012. С. 186-188.

