

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Сетевая научно-образовательная подготовка молодых исследователей
в инновационной среде университета

Карпенко А.П.

**РОБОТОТЕХНИКА И СИСТЕМЫ
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

Учебное пособие

Москва, 2014

УДК 001

ББК 72

К 26

Автор:

А.П. Карпенко —

заведующий кафедрой «Системы автоматизированного проектирования»

МГТУ им. Н.Э. Баумана,

профессор, доктор физико-математических наук

К 26

Карпенко А.П. Робототехника и системы автоматизированного проектирования: Учебное пособие. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 71 с.

Учебное пособие предназначено как для начинающих, так и для «продвинутых» молодых исследователей. Рассмотрено одно из перспективных направлений современной робототехники – роевая робототехника. Представлен обзор аппаратного и алгоритмического обеспечения роботов.

Также в разработке представлены факультет «Робототехника и комплексная автоматизация» (РК) МГТУ им. Н.Э. Баумана и, в частности, кафедра РК6 «Системы автоматизированного проектирования» (САПР).

Публикация подготовлена заведующим кафедрой САПР МГТУ им. Н.Э. Баумана.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Перспективные направления развития робототехники. Роевая робототехника	5
1.1. Общие сведения	5
1.2. Проекты роев роботов	6
2. Аппаратное обеспечение роботов	14
2.1. Двигатели	14
2.2. Манипуляторы и схваты роботов	29
2.3. Проблемы проектирования двигателей и манипуляторов	32
3. Алгоритмическое обеспечение роботов	37
3.1. Управление отдельным роботом	38
3.2. Управление роем роботом	41
4. Системы автоматизированного проектирования и их связь с робототехникой	48
4.1. Общие сведения	48
4.2. Знаковые события в истории САПР	50
4.3. Характеристика современного состояния САПР	52
4.4. Актуальные задачи и проблемные ситуации в области разработки САПР	53
4.5. Примеры научных и инженерных решений в области разработки и применения САПР	55
5. Факультет «Робототехника и комплексная автоматизация» МГТУ им. Н.Э. Баумана	59
5.1. Общие сведения	59
5.2. Кафедра РК6 «Системы автоматизированного проектирования»	61
5.3. Примеры актуальных научно-исследовательских тем и практических разработок в области САПР	70
6. Заключение	71
7. Литература	72

Введение

Робототехника представляет собой высокотехнологическую, наукоемкую инженерную отрасль, которая интенсивно развивается во всех передовых странах. Робототехнические системы в настоящее время широко используются в промышленности, на транспорте, в медицине, военном деле, космонавтике и в других областях. Альтернативы роботам не существует в ситуациях, когда выполнение некоторой задачи находится за пределами возможностей человека либо сопряжено с чрезмерной угрозой его здоровью и жизни.

Несмотря на значительное отставание от таких стран как США и Япония по числу выпускаемых роботов и их номенклатуре, Россия занимает достойное место в мире по научным разработкам в области робототехники. Значительная доля достижений ученых России в области робототехники принадлежит Российской Академии Наук (РАН). Большой вклад в достижения российской робототехники вносят также ведущие университеты России, в том числе, МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Не смотря на широкое использование роботов в жизни современного общества, общепринятого определения робота не существует. Википедия определяет робот как автоматическое устройство, созданное по принципу живого организма. Действуя по заранее заложенной программе и получая информацию о внешнем мире от датчиков (аналогов органов чувств живых организмов), робот самостоятельно осуществляет производственные и иные операции, обычно выполняемые человеком (либо животными). При этом робот может как иметь связь с оператором (получать от него команды), так и действовать автономно (<http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%EE%E1%EE%F2>).

Многообразие роботов столь велико, что существует самостоятельная проблема их классификации. Обычно роботы классифицирует по следующим признакам: - область применения (промышленные, военные, исследовательские, медицинские и т.д.); - среда эксплуатации (наземные, подземные, надводные, подводные, воздушные, космические, комбинированные); - степень подвижности (стационарные, мобильные); - тип системы управления (программные, адаптивные, интеллектуальные); - функциональное назначение (манипуляционные, транспортные, информационные, комбинированные); - уровень универсальности (специальные, специализированные, универсальные); - тип исполнительных приводов (электрические, гидравлические, пневматические и т.д.); - тип движителя (гусеничные, колесные, шагающие, водометные, реактивные и т.д.); - способ управления (автоматические, телеуправляемые, ручные (экзоскелетоны, например); - и так далее.

1. Перспективные направления развития робототехники. Роевая робототехника

1.1. Общие сведения

В последние годы интенсивно развивается новое направление робототехники – *роевая робототехника*. Общую идею этого направления можно сформулировать следующим образом: некоторые задачи может лучше решать не один большой и сложный робот, а большое число маленьких и простых роботов, способных действовать согласованно.

Роевая робототехника позволит в будущем создавать рои роботов, способные коллективно решать большое число задач, физически или информационно объединяясь в единое целое на основе принципа самоорганизации. Важно, что выход из строя отдельных роботов не уменьшает или уменьшает незначительно функциональные возможности роя в целом. Поскольку роботы, образующие рой, относительно просты и имеют низкую стоимость, экономические потери в этом случае также незначительны. Для военных применений рой роботов обладает еще тем важным свойством, что в силу возможных небольших размеров каждого из роботов, их сложно уничтожить.

Интересна точка зрения Николауса Коррела, учёного из Университета Колорадо (США), который говорит: «Все живые организмы состоят из клеток, которые функционируют как единое целое. Рой роботов можно также рассматривать в качестве киберорганизма». Другими словами, можно сказать, что развитый рой роботов представляет собой коллективный искусственный интеллект.

Число возможных применений роев роботов очень велико. Назовем следующие основные из этих применений:

- мониторинг и изучение планеты Земля и других планет солнечной системы;
- очистка земной поверхности, акваторий морей и океанов, а также космического пространства от опасных химических и радиоактивных веществ;
- проведение поисково-спасательных операций в зонах природных и техногенных катастроф, а также зонах боевых действий;
- выполнение технологических операций, в том числе на опасных и вредных производствах;
- выполнение некоторых хирургических операций, например, неинвазивное удаление злокачественных опухолей.

Некоторые другие возможные применения роев роботов рассмотрены ниже.

При проектировании роботов вообще и роев роботов в частности широко используют бионические подходы. *Бионикой* называют прикладную науку о применении в технических устройствах и системах принципов организации, свойств, функций и структур живой природы (<http://ru.wikipedia.org/wiki/%C1%E8%EE%ED%E8%EA%E0>). Таким об-

разом, бионика реализует идею технического копирования эффективных решений, которые найдены живыми видами в процессе многомиллионного естественного отбора.

Основная причина того, почему роевая робототехника начала бурно развиваться именно в настоящее время, состоит в том, что технологические и экономические возможности изготовления большого числа роботов появились только в последнее время. Ранее по этой причине эксперименты с роями роботов были возможны только с помощью компьютерного моделирования в форме вычислительного эксперимента. В настоящее время технологически и, что немало важно, экономически доступны компактные решения в области движителей, миниатюрных источников энергии, малогабаритных вычислительных систем и систем беспроводной связи, «умных» датчиков и т.д.

Частным случаем роя роботов является так называемая *умная пыль* (*smart dust*) - сеть из малых беспроводных микромеханических систем и дополнительных устройств, которые могут взаимодействовать между собой и получать данные о состоянии внешней среды). Предполагается, что базовые элементы умной пыли — *моты* (англ. *mote* — пылинка) будут иметь размеры частицы песка или даже пыли.

Концепция умной пыли находит свое продолжение в *наноробототехнике*, когда размеры робота (*наноробота*, или *нанобота*) сопоставимы с размерами молекулы (менее 10 нм). Рои нанороботов, предполагается, найдут применение в медицине (например, целенаправленная доставка лекарств в раковые клетки), в военном деле (в качестве средств наблюдения и шпионажа, а также в качестве оружия), в космических исследованиях.

К проблематике роевой робототехники примыкает проблематика многомодульных *полиморфных роботов* (*PolyBots*). Основная идея в этом случае заключается в создании реконфигурируемого робота, который состоит из множества однотипных модулей, объединяющихся в зависимости от решаемой задачи в разнообразные формы наподобие детского конструктора *Lego*. Наиболее впечатляющих результатов в создании *PolyBot*-роботов добились ученые Исследовательского центра Хехо в Пало-Альто (США). В настоящее время экспериментальные образцы полиморфных роботов состоят из десятков, максимум сотен модулей. Предполагается, что когда размеры модулей удастся существенно уменьшить, такие роботы будут состоять из сотен тысяч и даже миллионов модулей.

1.2. Проекты роев роботов

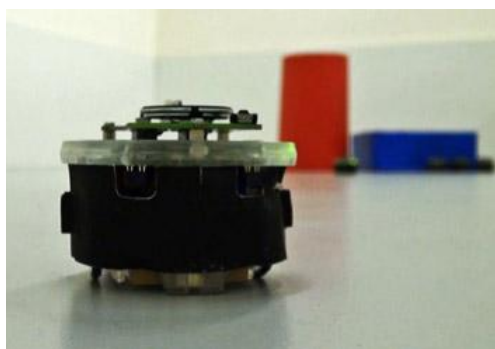
Роевая робототехника развивается очень быстро. Если совсем недавно рои роботов могли двигаться только по суше, то в настоящее время они умеют летать по воздуху, плавать, передвигаться под землей и в космическом пространстве. В соответствие с этим разделим рои роботов на семь классов:

- роботы, предназначенные для применения на суше (наземные);
- подземные;
- над- и подводные;
- воздушные;
- летающие в космическом пространстве (космические);
- способные функционировать в нескольких средах (комбинированные);
- специальные роботы.

Нам неизвестны проекты подземных и специальных роев роботов. Поэтому ограничиваемся рассмотрением роботов остальных перечисленных классов.

Наземные роботы

Специалисты из Шеффилдского центра робототехники (Англия) создали робота (рисунок 1.1а), который имеет колеса, батарею для приводов колес, микрофон, камеру и восемь сенсоров, которые позволяют роботу ориентироваться в пространстве. Выполнены эксперименты по управлению роем из 40 роботов. В ходе экспериментов рой успешно решал простые задачи, например, группируясь вокруг объекта и толкая его в нужном направлении.



а) Колесный робот из Шеффилда



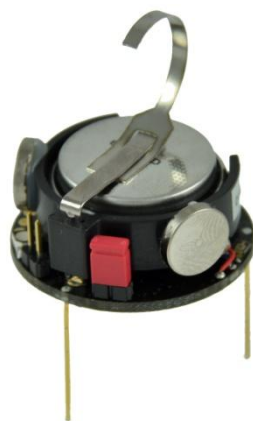
б) Вибрационный робот университета Колорадо



в) Прыгающий робот *Jollbot*



г) Робот-паук Миланского университета



д) Вибрационный робот килобот

Рисунок 1.1 – Примеры роевых наземных роботов

Ученые из университета Колорадо (США) создали рой миниатюрных роботов, размеры которых сравнимы с размерами шариков для пинг-понга (рисунок 1.1б). Каждый из роботов оснащен инфракрасным излучателем и приемником, так что роботы в рое могут общаться между собой по беспроводной инфракрасной связи. «Интеллект» роботов обеспечивают микропроцессоры *Atmel XМega 128*. Движение роботов обеспечивают специальные вибрационные двигатели.

Ученые университета Саутгемптона (Англия) предложили использовать для исследования Марса рой из сорока-шестидесяти прыгающих или катящихся автономных роботов по имени *Jollbot* – (рисунок 1.1в). *Jollbot* преодолевает препятствия, перепрыгивая их по методу кузнечика или блохи. Интересно, что, хотя создатели робота были вдохновлены способностями насекомых, их робот не похож ни на одно из известных насекомых. Для минимизации веса «скелет» *Jollbot* образуют металлические прутья, расположенные подобно меридианам земного шара. Внутри шара на его центральной оси прикреплены аккумуляторы, сервоприводы, датчики, а так же приёмно-передатчик для дистанционного управления и передачи собранной информации. Сервоприводы заставляют сжимают «скелет», а потом отпускают его, заставляя тем самым подпрыгивать шар на полметра. Для управления роем роботов *Jollbot* авторы проекта предлагают использовать принципы функционирования пчелиного роя.

Для исследования Луны и, в частности, доставки на Землю образцов ее грунта, команда из Миланского политехнического университета (Италия) предлагают вместо одного большого робота использовать рой небольших автономных роботов в виде пауков (рисунок 1.1г). Предполагается, что каждый такой робот будет оснащен собственной камерой для съемки, набором датчиков для сбора научной информации, батареей и солнечной батареей для ее подзарядки. Роботы за короткий промежуток времени смогут исследовать и

собрать пробы с большой площади. За счет небольших габаритов этих роботов их можно компактно разместить в отсеке спускаемого аппарата и сэкономить на весе подъемного устройства.

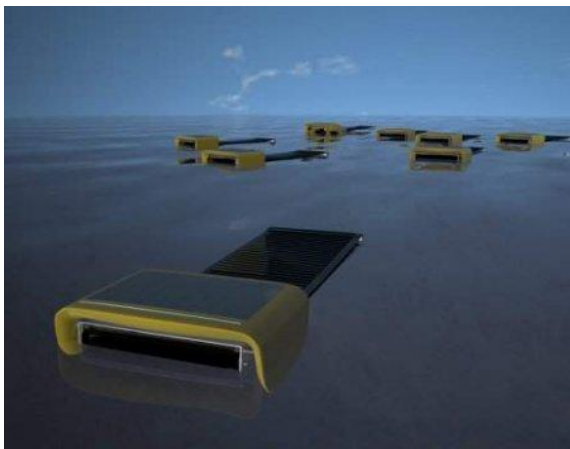
В Гарвардском Университете (США) созданы миниатюрные жукоподобные роботы (рисунок 1.1д), названные авторами *килоботами* (*kilibot*). Каждый килобот имеет диаметр около трёх сантиметров и питается от литиевого аккумулятора напряжением 3,4 вольта, что обеспечивает ему три часа бесперебойной работы. Передвигается килобот вправо, влево и вперёд, вибрируя на трёх жёстких ножках, оснащённых двумя двигателями. В нижней части каждого робота установлен широкоугольный инфракрасный приёмопередатчик, который посылает световой луч вниз на гладкую поверхность, по которой робот движется. При этом луч отражается, и его принимают ближайшие соседи, находящиеся в радиусе 10 сантиметров. Робот оснащён бортовым микроконтроллером. Управление роем осуществляется с помощью контрольной станции, расположенной над экспериментальной поверхностью с килоботами. В 2011 году учёные продемонстрировали коллективные операции роя из 29 килоботов. В одном из экспериментов, например, роботы действовали как муравьи в поисках пищи. В другом эксперименте килоботы повторяли действия лидера, образуя своеобразный паровозик. В настоящее время авторы выполнили серию экспериментов с роем уже из 100 роботов.

Над- и подводные роботы

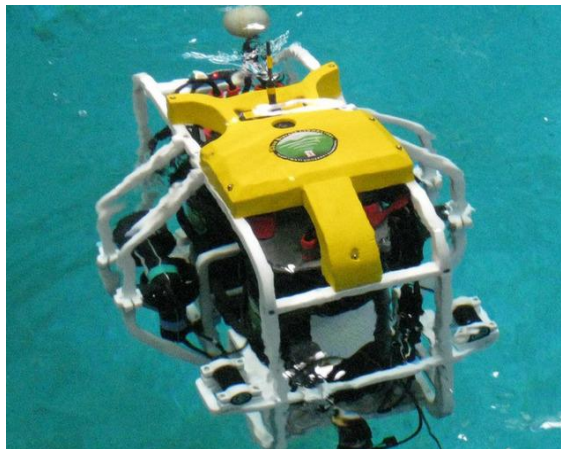
Исследователями из Массачусетского технологического университета (США) разработан проект роя роботов *Seaswarm*, предназначенного для борьбы с нефтяными загрязнениями водных поверхностей большой площади (рисунок 1.2а). Разработчики утверждают, что рой *Seaswarm* из 5-10 тысяч роботов сможет убрать нефтяное пятно с морской поверхности размером с Мексиканский залив за один месяц. Опытный образец робота *Seaswarm* имеет длину 49 см, ширину 21 см, вес 16 кг. Энергию для движения робота дают две солнечные батареи. Робот оборудован с системами *GPS* и *WiFi*, что позволяет роботам обмениваться информацией между собой и управляться оператором. Нефть поглощается тонким, гидрофобным наноматериалом ленточного конвейера позади робота.

Коралловые рифы — важный элемент экосистемы, непоправимый вред которому наносит деятельность человека. Учёные из Университета Хериот-Ватта (Англия) предлагают «чинить» коралловые рифы с помощью *кораллоботов* (рисунок 1.2б). Уже построено несколько прототипов таких роботов, которые оборудованы камерой, компьютером и гибкими руками с захватами. Планируется создать рой кораллоботов, которые будут автома-

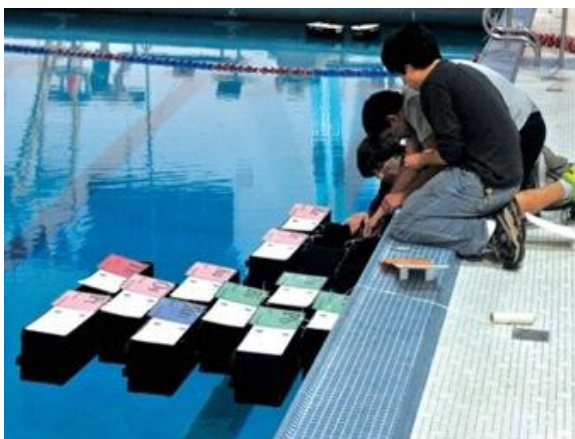
тически осматривать повреждённые коралловые рифы и трансплантировать кораллы в разрушенные места.



а) роботы роя *Seaswarm*



б) Кораллобот



в) Роботолодки

Рис. 1.2 – Примеры роевых плавающих роботов

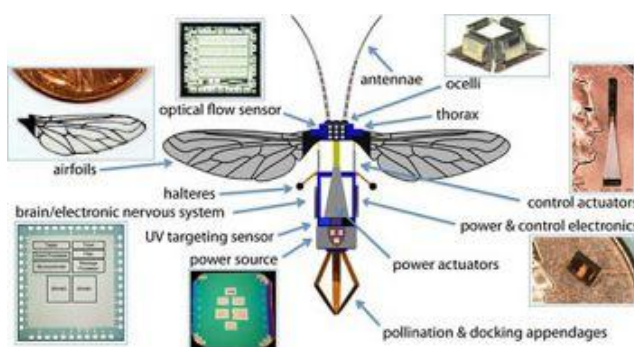
Инженерами из Пенсильванского университета (США) созданы, так называемые роботолодки (рисунок 1.2в). В настоящее время авторы пытаются заставить флот роботолодок координировано работать вместе с целью построения различных сложных структур. При достаточном числе таких лодок, они могут соорудить мосты, взлетно-посадочные полосы и даже острова. В настоящее время в Пенсильванском университете имеется около ста роботолодок. Каждая лодка управляется промышленным компьютером фирмы *Gumstix* и использует четыре независимых мотора, которые позволяют ей плыть в любом направлении и осуществлять повороты с нулевым радиусом. Обсуждается возможность увеличения роботолодок до размера стандартного грузового контейнера.

Воздушные роботы

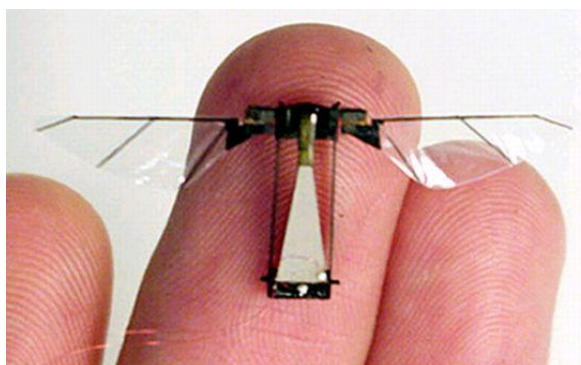
Инженеры немецкой компании *Festo* разработали бионического робота-стрекозу, названного ими *BionicOpter* (рисунок 1.3а). Ранее специалисты этой же компании продемонстрировали крупного летающего робота *SmartBird*, который перемещается аналогично соколу. Длина искусственной стрекозы составляет 48 сантиметров, размах крыльев — 70 сантиметров, вес робота - 175 граммов. Как и живой прототип, *BionicOpter* имеют четыре крыла, которые могут двигаться независимо друг от друга, обеспечивая роботу очень высокую маневренность. Так, *BionicOpter* может висеть в воздухе и летать боком. Авторы робота планируют разработку системы управления роем роботов *BionicOpter*.



а) Робот *BionicOpter*



б) Робот-пчела Гарвардского университета



в) Робот роя *RoboBees*

Рис. 1.3 – Примеры воздушных роевых роботов

Ученые из Гарвардского университета (США) разработали проект роя летающих роботов-пчел (рисунок 1.3б). Каждый из этих роботов будет в состоянии принимать собственные решения, но, в тоже время, эти роботы будут иметь возможность «общаться» с другими роботами роя, с целью совместного решения общих для роя задач. Проект основан на разработке этих ученых 2007 года, когда ими была создана уникальная двигательная система, полностью копирующая движения крыльев пчелы. Предполагается, что каждый робот-пчела будет оборудован современными «умными» датчиками, позволяющими ему получать информацию об окружающей среде. Управление роботом будет осуществляться с помощью собственного микропроцессора, который реализует специально разработанные интеллектуальные алгоритмы, позволяющие имитировать поведение, как от-

дельной пчелы, так и целого роя этих насекомых. Возможные применения роя еще не определены.

Неожиданное применение роя миниатюрных роботов демонстрируют специалисты Пенсильванского университета (США). Роботы роя взмывают вверх и направляются к музыкальным инструментам. Каждый робот самостоятельно выполняет свою задачу: несколько роботов играют на синтезаторе, один - на тарелке, еще один - на барабанах и т.д. В целом, рой роботов может сыграть заданную мелодию.

Вследствие человеческой деятельности популяции медоносных пчел во всем мире находятся в упадке. Исчезновение этих насекомых представляет очень большую опасность экосистеме Земли. Проблема настолько остра, что команда ученых из Гарвардского и Северо-Восточного университетов США работают над проектом созданием пчелиного роя миниатюрных роботов (рисунок 1.3в), которые могли бы опылять цветы и выполнять работу настоящих пчел. В рамках проекта создан рой роботов *RoboBees*, каждый из которых представляет собой летающий робот размером с пчелу. Рой роботов *RoboBees* управляется теми же алгоритмами, которым подчинено взаимодействие тысячи пчел в их природном рое.

Космические роботы

Инженеры из американской компании *SpaceWorks Engineering* работают над проектом защиты Земли от астероидов с помощью роя роботов. Каждый из роботов роя представляет собой, по сути, космический корабль, называемый *MADMEN (Modular Asteroid Deflection Mission Ejector Node)* – рисунок 1.4. *MADMEN* имеет вес в одну тонну и высоту, равную 11 метрам. В космос робота выводит ракета-носитель. Достигнув астероида, *MADMEN* самостоятельно садится на его поверхность и начинает сверлить скалу. Закрепившись на поверхности астероида, робот с помощью своей ядерной двигательной установки начинает медленно толкать астероид с частотой, равной примерно одному импульсу в минуту. Поскольку опасность для Земли представляет только большой астероид, на нем должно работать сразу несколько роботов, сотрудничая между собой, чтобы координировать свои действия. Необходимость использования роя роботов объясняется еще и тем, что, как правило, астероиды имеют некоторую угловую скорость вращения. Поэтому высаживать роботы следует по всей поверхности астероида, и включать их корректирующие двигатели так, чтобы результирующая их тяга уводила астероид от Земли. Требуемое число роботов зависит от массы астероида, угловой скорости его вращения, дальности от Земли, начиная с которой роботы начинают свою работу. Кроме того, при определении

этого числа следует учитывать надежность роботов, так чтобы при выходе из строя некоторого их числа оставшиеся могли решить задачу защиты Земли.



Рис. 1.4 – Пример космического робота *MADMEN*

Комбинированные роботы

Уникальный проект роя роботов *Swarmanoid* разрабатывается в ряде европейских институтов и лабораторий. Основной целью исследования является создание распределенной системы гетерогенных роботов (рисунок 1.5) и разработка алгоритмов управления ею. Предполагается создать рой роботов *Swarmanoid* из 60 ботов трёх видов: *Eye-bot* (глаза-бот), *Hand-bot* (рука-бот) и *Foot-bot* (нога-бот). Авторы проекта полагают, что разделение ботов по назначению повышает надежность и простоту эксплуатации всего роя роботов, позволяет сформировать более точную картину местности, успешно преодолевать различные препятствия. Летящий робот *Eye-bot* (самый большой робот на рисунке 1.5) построен на платформе квадролета, имеет магнитный крючок и специализируется на зондировании и анализе окружающей среды, благодаря установленным на нем телевизионной камере, инфракрасному сканеру, ультразвуковому локатору и другим датчикам. Этот же робот передает информацию о местности другим ботам и координирует их действия. Подвижный робот *Foot-bot* предназначен для транспортировки роботов типа *Hand-bot* и других объектов. Робот имеет собственную телекамеру, измеритель расстояния и способен объединяться для совместной работы с другими ботами. Робот *Hand-bot* не может передвигаться по земле, но способен преодолевать вертикальные препятствия и манипулировать объектами с помощью своих двух манипуляторов и магнитного гарпуна.



Рис. 1.5 – Пример гетерогенного роя роботов *Swarmanoid*

Специалисты федерального института технологий в Цюрихе (Германия) создали автономных роботов-дронов, которые могут объединяться друг с другом на земле, а затем подниматься в воздух в виде летающей платформы. Проект носит название «Распределённый летающий строй» (*Distributed Flight Array*). Обмен информацией между роботами роя реализован с помощью инфракрасных датчиков. Роботы могут быстро адаптироваться к меняющимся условиям полета роя, оптимизируя свою траекторию полета и траекторию роя в целом. Такой рой роботов может успешно применяться для слежения. Например, каждый робот может «смотреть» в заданную сторону, и при необходимости отделиться от основной группы и продолжить выполнение задания самостоятельно.

2. Аппаратное обеспечение роботов

Конструктивно, робот включает в себя движители, манипуляторы и их схваты, двигатели, различные датчики, устройства связи и т.д. Специфическими для роботов являются первые два типа устройств. Ограничиваемся поэтому рассмотрением проблем, связанных с проектированием движителей и манипуляторов роботов, а также их схватов.

2.1. Движители

Движителем называется устройство, преобразующее энергию двигателя или внешнего источника в полезную работу по перемещению, в нашем случае, робота в соответ-

вующей среде. Тип движителя робота определяется реализуемым им способом передвижения в пространстве, который, в свою очередь обусловлен средой, в которой должен функционировать робот.

Различают движители для перемещения по земле и под землей, по воде и под водой, в атмосфере, в космосе, а также движители для роботов специального назначения. К классическим движителям для перемещения по суше относят колесный, гусеничный, шнековый, шагающий, на основе магнитной левитации, а также большое число их различных комбинаций. Для перемещения под землей преимущественно используют те же движители. Для перемещений по воде / под водой служат парусный, гребковый (весло), винтовой (гребной винт), на основе воздушной левитации (суда на воздушной подушке), ластовый, водомётный движители. Движение в атмосфере обеспечивают следующие типы движителей: лопастной винт (самолёты), реактивное сопло (реактивные самолёты, ракеты), машущее крыло (махолёты). Перемещение в космосе возможно с помощью реактивного сопла и солнечного паруса.

В робототехнике используют почти все перечисленные выше типы движителей. Наряду с этим, для роботов разработано значительное число других движителей. Чаще всего при конструировании движителей роботов используют бионический подход. Поэтому прежде рассматриваем способы передвижения земных живых существ. Далее последовательно рассматриваем движители роботов для реализации их перемещения на конечностях, путем ползания, летания и плавания соответственно, и имеющие прототипы в живой природе. Затем даем обзор колесных, гусеничных и некоторых других движителей для роботов, не имеющих таких прототипов.

Способы передвижения животных

Зоологи выделяют шесть способов передвижения (локомоций) животных: передвижение на конечностях (ходьба, бег, прыжки); ползание; активное и пассивное летание; плавание; рытье.

Передвижение на конечностях - наиболее распространенная форма передвижения на Земле. Особенности данного способа передвижения определяют, прежде всего, число ног животного, устройство его стопы и походка (ходьба, бег, прыжки).

Число ног различно у различных видов животных, более того, иногда одно и то же животное использует различное число ног в различных обстоятельствах. Большое число животных являются двуногими. Так, исключительно двуногими являются птицы. К двуногим относятся также многие млекопитающие (грызуны, кенгуру, люди, некоторые ящерицы). За исключением птиц, все земные позвоночные с ногами являются, главным

образом, четвероногими. Живые существа самой разнообразной на Земле группы животных, насекомых, являются, за небольшим исключением, шестиногими. Пауки и их многие родственники имеют по восемь ног. У земных ракообразных число ног может достигать четырнадцати. Личинки некоторых насекомых и некоторые виды беспозвоночных обладают пятьюдесятью и большим числом ног (до 750). Заметим, что животные могут передвигаться на конечностях не только по суше, но и по воде (водомерки, например).

Ползание. Скользят по поверхности, например, слизни и улитки. При этом улитка может ползти по гладкому стеклу, поднимаясь снизу вверх. Дождевые черви ползают, цепляясь щетинками за неровности грунта. Змеи используют для этого щитки и чешуйки, а пиявки – присоски

Летание. Активно могут летать насекомые, птицы и летучие мыши. Пассивно летают, например, некоторые виды белок. У птиц органы полета представляют собой крылья, у летучих мышей - тонкую эластичную складку кожи. Насекомые летают преимущественно с помощью двух пар крыльев. У двукрылых насекомых задняя пара крыльев недоразвита или превращена в твердый хитиновый покров.

Плавание. Для плавания живые существа используют различные гребные органы: волоски, реснички, жгутики (бактерии); конечности (водоплавающие птицы, тюлени); специальные плавники (рыбы). Органом движения у большинства рыб является хвост. Угорь движется змееобразно. Скаты плавают при помощи изгибающихся краев тела, игла-рыба и морские коньки – посредством колебательных движений спинного плавника. Луна-рыба совсем потеряла способность к активному движению и плавает “по воле волн”. Рыба-парусник имеет высокий спинной плавник и использует его в качестве паруса. Рыба-прилипало имеет на голове присоску, которой она присасывается к другой рыбе (чаще всего к акуле) и путешествует за ее счет. Личинки стрекоз, а также медузы и каракатицы пользуются реактивным способом движения, с силой выталкивая воду из полости тела.

Рытье. Известны два основных способа передвижения рытьем, которые демонстрируют черви и кроты. Передвигаясь в плотной почве, червь проглатывает землю и пропускает ее сквозь кишечник, а затем выбрасывает через анальное отверстие у собственной норки. При движении через неплотную почву червь использует другой способ движения - раздвигает заостренным концом тела землю и протискивается между ее частицами. Крот по-разному движется в земле при строительстве гнездовой камеры и кольцевых галерей вокруг нее, с одной стороны, и кормовых нор, с другой стороны. В первом случае при проходке крот проталкивается сквозь землю, оставляя за собой нору с уплотненными круглыми стенками. Кормовые норы сделаны по-другому: мощными передними ногами крот выбрасывает лишнюю землю наверх.

Движители, имеющие прототипы в живой природе

Несмотря на то, что имеется большое число важных задач, которые могли бы решать автономные подземные роботы, известно небольшое число таких разработок. Вероятно, дело в высокой сложности соответствующих роботов. Например, подземные роботы вряд ли могут использовать *GPS* и радиоволны вообще. На этом основании исключаем из дальнейшего рассмотрения роботов, использующих рытье, и в соответствии с приведенной выше классификацией последовательно рассматриваем роботов, использующих для своего перемещения конечности, летание, плавание, рытье.

Передвижение на конечностях. Выделяют три основных типа движителей, обеспечивающих передвижение на конечностях: 1) двуногие, 2) четырехногие, 3) многоногие.

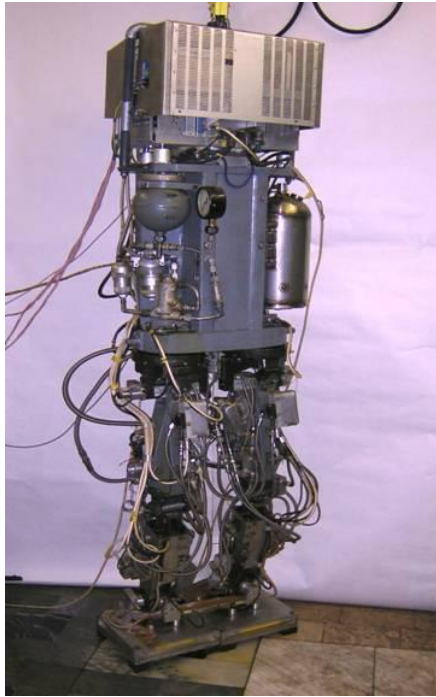
1) Двуногие роботы (андроиды). В настоящее время ведущие компании мира и почти каждый крупный технический университет ведут разработки в области двуногих шагающих роботов. В результате создано чрезвычайно большое число таких роботов. Отметим, что планируется следующее неожиданное применение коллектива антропоморфных роботов: в 1992 году была поставлена цель создать команду полностью автономных футболистов-гуманоидов, способных обыграть команду победителей последнего Кубка мира по футболу в игре, проводимой в полном соответствии с официальными правилами ФИФА. По оценкам специалистов, эта цель может быть достигнута в течение ближайших 40-50 лет. На рисунках 2.1а, 2.1б приведены примеры антропоморфных роботов *CHARLI* и *MABEL* соответственно.



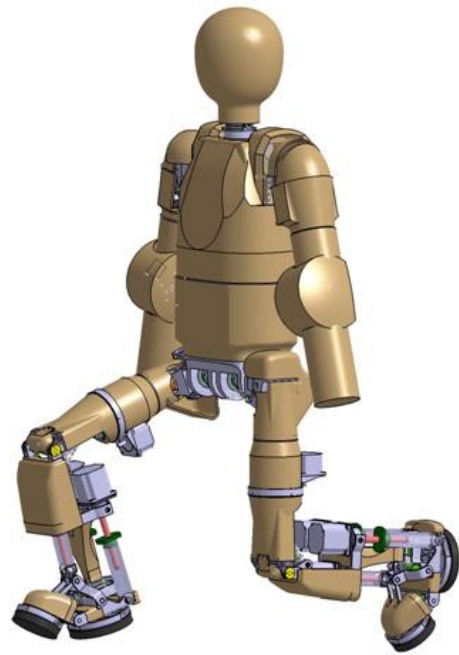
а) Робот *CHARLI*



б) Робот *MABEL*



в) робот кафедры Э-10 МГТУ:
лабораторный образец



г) робот кафедры Э-10 МГТУ:
разрабатываемый робот

Рис. 2.1 - Примеры двуногих шагающих роботов

Разработкой двуногих роботов занимаются также в МГТУ им. Н.Э. Баумана. На рисунках 2.1в, 2.1г представлены, соответственно, лабораторный образец двуногого гидравлического шагающего робота, а также проект робота, разрабатываемого в настоящее время на кафедре Э-10.

2) Четырехногие роботы. Примером таких роботов является робот *AlphaDog* (рисунок 2.2), разрабатываемый в рамках одной из американских военных программ.

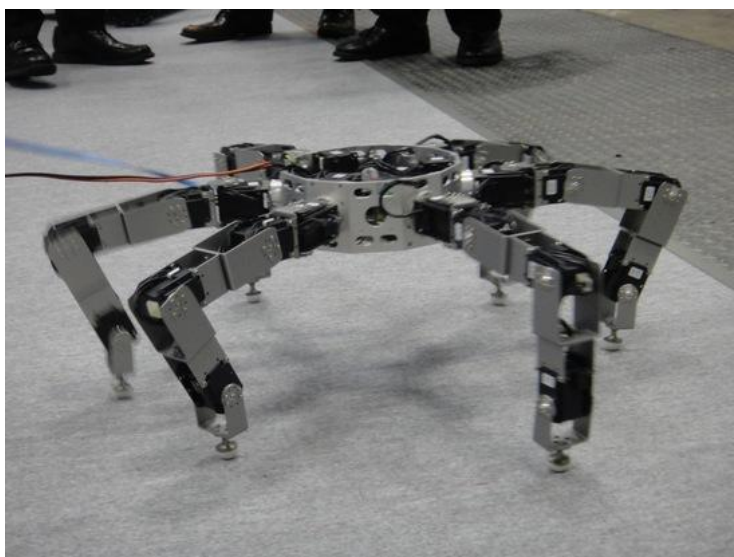
Интеллектуальная система управления позволяет роботам *AlphaDog* работать группами по несколько единиц и самостоятельно находить путь к заданному месту назначения.



Рисунок 2.2 – Пример четырехногого шагающего робота *AlphaDog*

3) Многоногие роботы. Японский робот *Asterisk* (рисунок 2.3а) представляет собой крупного электромеханического паука с широким набором возможностей. Робот создан в лаборатории *Arai Robotics*. Ноги расположены на круглом теле *Asterisk*, каждая нога имеет четыре степени свободы, что обеспечивает роботу всенаправленность движения, легкость перемещения среди препятствий и по наклонной поверхности.

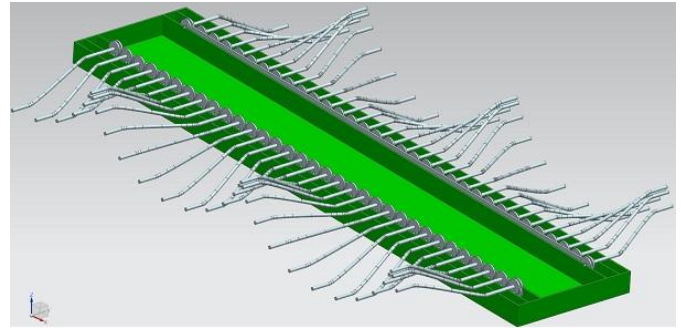
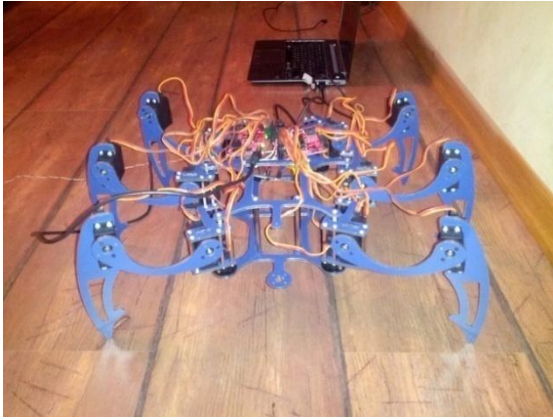
Двигатели робота настолько универсальны, что будучи перевернутым на спину, он продолжает нормально работать. *Asterisk* способен перемещаться по лестнице, пролезает под низкой оградой и т.д. По команде робот может использовать пару своих ног качестве манипуляторов.



а) робот *Asterisk*



б) робот *RiSE*



в) «Шестиног»: кафедра РК-6 МГТУ

г) Серфер: кафедра РК-6 МГТУ

Рисунок 2.3 – Примеры многоногих шагающих роботов

Шестиногий паукообразный робот, спроектированный командой Миланского университета (Италия) представлен в пункте 1.1.

Еще одним примером шестиногого робота является робот *RiSE* (рисунок 2.3б), который лазает по деревьям и текстурированным стенам, используя ступни с микро-когтями. Робот разработан компанией *Boston Dynamics* (США) в сотрудничестве с рядом университетов этой страны. *RiSE* имеет длину 0,25м, вес 2 кг и может перемещаться со скоростью до 0,3 м/с.

Разработка шетиногого робота ведется также на кафедре РК-6 (САПР) МГТУ им. Н.Э. Баумана (рисунок 2.3в). Кроме того, на кафедре разрабатывается проект многоногого шагающего робота Серфер (рисунок 2.3г). Идея последнего взята из одного из научно-фантастических произведений Н.Н. Горькаватого (астрофизик, писатель, доктор физико-математических наук). Математическое моделирование робота показало, что он может преодолевать препятствия, высота которых равна $2/3$ высоты корпуса, подниматься на склоны с уклоном до 35%, забираться на отвесные стены высотой до 0,6 длины тела. Потеря некоторого числа лапок не влияет на проходимость робота. Ожидается, что робот сможет перемещаться по рыхлым почвам, снегу, песку, болоту и, возможно, по воде и под водой.

Ползание. Наиболее известными существами в природе, которые передвигаются с помощью ползания, являются змеи и гусеницы. Способы движения этих животных несколько отличаются. В робототехнике использует движители, реализующие, как змееподобные движения, так и движения подобные гусенице.

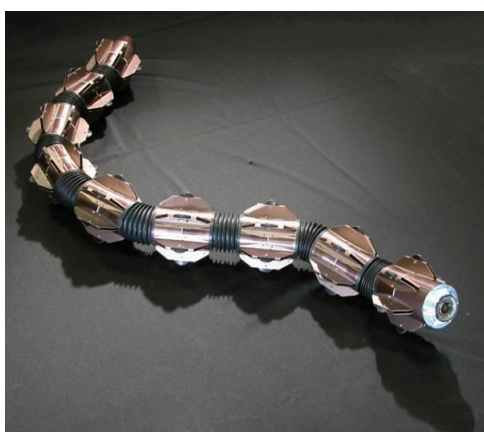
1) Роботы, имитирующие движение змеи (змеероботы). Змея, главным образом, ползает по горизонтальной или наклонной поверхности, используя силу трения между своим телом и этой поверхностью. Поэтому подъем змеи по вертикальной поверхности невозможен. С другой стороны, змея может подниматься, например, по вертикальным де-

ревьям не слишком большого диаметра. Однако при этом используется иной принцип движения. Используя изгибы в плоскости движения, змеи могут прекрасно плавать по воде и под водой.

Членистое строение змеероботов облегчает их ремонт и дает возможность роботам объединяться в длинные структуры путем «стыковки» двух и более роботов. Основная проблема движителей змеинового типа – их высокая энергозатратность. Поэтому такие роботы, как правило, автономно могут двигаться лишь кратковременно, либо по гладкой поверхности.

Высокая мобильность змеероботов может быть незаменима, например, при поиске пострадавших от землетрясений в руинах зданий – в этих условиях не способны передвигаться роботы на гусеницах или колесах. Такие роботы могут в будущем избавить ремонтные бригады от необходимости взбираться на опоры линий электропередач для их диагностики и ремонта.

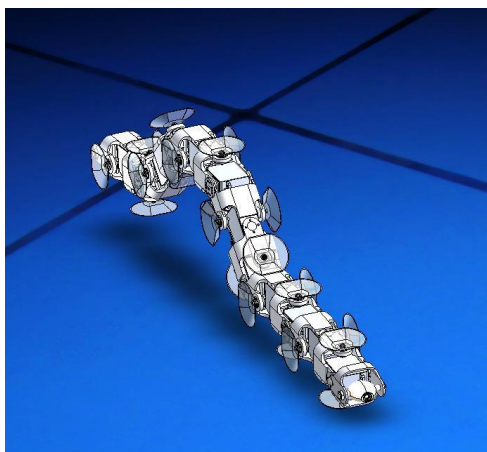
Примером змееподобного робота-амфибии является японский робот *ACM-R5*, который умеет не только ползать, но и плавать (рисунок 2.4а). Робот разработан лабораторией *Hirose Fukushima Robotics Lab*, и состоит из девяти сегментов. Вес робота составляет 7,5 кг, длина - 1750 мм, диаметр - 80 мм (без лопаток). Сегменты робота, число которых может меняться в широких пределах, одновременно играют роль скелета и наружного покрова. Каждый сегмент оснащен лопатками с колесами, которые помогают роботу передвигаться, как по суше, так и по воде и под водой. Сегменты автономны в том смысле, что каждый из них имеет свой элемент питания, электродвигатель, позволяющий сегментам изгибаться со скоростью 70 градусов в секунду, и управляющий процессор.



а) Змееробот-амфибия *ACM-R5*



б) Змееробот *SnakeBot*



в) Робот-гусеница: проект *BICCA*



г) Робот-гусеница *Softbot*

Рисунок 2.4 – Примеры ползающих роботов

В Израиле разработан змееподобный робот *SnakeBot*, ориентированный на военные применения (рисунок 2.4б). Робот состоит из полностью автономных сегментов, каждый из которых имеет управляющий микропроцессор, двигательную систему, аккумуляторную батарею и сеть различных датчиков. Кроме того, сегменты могут нести устройства визуального и звукового обнаружения, устройства радиоэлектронной разведки и подавления, заряды взрывчатого вещества для выполнения диверсионно-подрывных операций. В ходе выполнения боевой задачи отдельные сегменты могут отсоединяться и выполнять каждый свою задачу. Благодаря универсальности сегментов, длину *SnakeBot* можно варьировать в широких пределах в зависимости от функций робота, которые необходимы для выполнения конкретной боевой задачи.

2) Роботы, имитирующие движение гусеницы. Гусеница, в отличие от змеи, может перемещаться, как по горизонтальной, так и по вертикальной поверхностям. Движение гусеницы по горизонтальной и наклонной под небольшим углом поверхностям может быть основано, как у змеи, на силе трения. Однако при движении по поверхности, наклоненной под большим углом, или «по потолку» гусеница адсорбируется (например, прилипает) к этой поверхности.

Таким образом, можно выделить три класса движителей для роботов-гусениц: основанные на использовании силы трения; использующие адсорбцию; комбинированные движители. С другой стороны, эти движители разделяют на «твердые» и «мягкие».

Примером робота с «твердым» движителем, использующим прилипание к поверхности, является робот, разработанный в рамках совместного проекта *BICCA* испанских и китайских ученых (рисунок 2.4в).

«Мягкий» движитель, основанный на трении, использует гусеницеподобный робот *Softbot*, созданный группой исследователей из университета Тафта (США) – рисунок 2.4г.

Робот *Softbot* не имеет твердых частей – его перемещение обеспечивают синтетические мышцы. Силиконовое тело робота способно в течение 100 миллисекунд сворачиваться в кольцо перед своим «бегством». *Softbot* представляет собой прототип небольших эластичных роботов, которые будут способны передвигаться по пересеченной местности и даже по веревкам. Однако основное предназначение таких роботов – выполнять работу внутри щелей и полостей космической станции, доступ в которые другими средствами невозможен. Роботы типа *Softbot* могут также использоваться для проведения внутренних обследований человека и его малотравмирующих операций.

Летание. Бионический летающий робот представляет собой махолёт или орнитоптёр — летательный аппарат тяжелее воздуха, двигателем которого является машущее крыло. Трудности создания махолетов обусловлены, прежде всего, чрезвычайной сложностью крыла как механизма. Современные исследования показывают, что крылья менее эффективны, чем вертолетный несущий винт. Это обусловлено тем, что машущее крыло в начале и в конце каждого взмаха останавливается, подъемная сила его в эти моменты становится равной нулю. В то же время, вращающийся вертолетный винт создает подъемную силу непрерывно. Кроме того, машущее крыло по сравнению с вертолетной лопастью значительно сложнее конструктивно и поэтому при прочих равных условиях тяжелее.

Бионические роботы в виде стрекозы, пчел представлены нами в п. 1.2. Приведем пример еще одного летающего робота, построенного на бионических принципах.

Немецкая компания *Festo* спроектировала летающего робота *SmartBird*, который внешним видом и стилем полета полностью подражает своему живому прототипу чайке (рисунок 2.5б). *SmartBird* весит менее 500 граммов и способен самостоятельно взлетать, летать и приземляться. Конструкция *SmartBird* в значительной мере повторяет строение тела серебристой чайки, поэтому все управление и собственно полет робот осуществляет подобно птице – путем вращения тела, поворота головы и хвоста, положением и движениями крыльев.

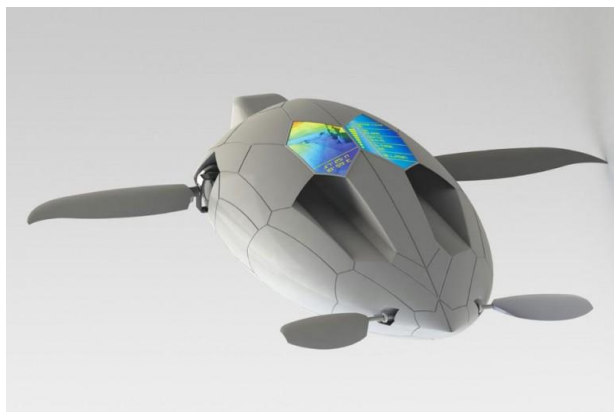


Рисунок 2.5 – Примеры летающих роботов: робот *SmartBird*

Плавание. Наибольший практический интерес представляют подводные роботы. Именно этот класс плавающих роботов развивается наиболее интенсивно. В основном подводные роботы создаются для исследований и проведения спасательных операций. Имеются планы использования таких роботов для организации рыбной ловли, при поиске подводных полезных ископаемых и так далее.

Водоплавающие роботы преимущественно используют не бионические движители, но винт. Однако известно значительное число водоплавающих роботов, разработанных на принципах бионики. Приведем несколько примеров.

Роботы-пингвины разработаны уже упоминавшейся компанией *Festo*. В качестве движителей роботы используют плавники, плавая в воде так же, как настоящие пингвины. Интересно, что существуют воздушные варианты этих роботов, подобные дирижаблям. Изменение направления движения робота-пингвина, как и настоящего пингвина, осуществляется путем изменения положения его головы.



а) Робот *Naro-Tartaruga*



б) Рыборобот университета Эссекса

Рисунок 2.6 – Примеры плавающих роботов

Ученые Швейцарской высшей технической школы Цюриха построили робота *Naro-Tartaruga* (рисунок 2.6а), похожего на водоплавающую черепаху, которая передвигается под водой при помощи плавников и лап. Длина робота составляет один метр при массе 75 кг. Робот плавает под водой со скоростью до 7,2 км/ч и может погружаться на глубину до 100 метров. Передвижение робота при помощи плавников (а не винтов) позволяет ему перемещаться намного тише и дает дополнительные исследовательские возможности.

В университете Эссекса (Англия) создан автономный робот в виде рыбы длиной 50 см, движителями которого являются хвост и плавники, так что робот реализует способ передвижения настоящих рыб (рисунок 2.6б).

Рыборобот оснащен датчиками для обнаружения скоплений загрязнений в водоемах Система управления роботом использует элементы искусственного интеллекта.

Заметим, что хвост у рыб, который можно считать подводным крылом, вертикален и совершает движения из стороны в сторону, оставаясь таковым. Известны примеры использования плавающими существами иного использования хвоста. Например, у дельфинов хвост горизонтален и совершает колебания вверх, вниз. Известны примеры роботов, которые также используют этот способ движения в воде.

Движители, не имеющие прототипов в живой природе

Ограничимся рассмотрением наземных, над- и подводных, воздушных, а также некоторых специальных роботов.

Наземные роботы. Наиболее распространенными роботам этого класса являются колесные и гусеничные роботы.

Среди роботов, использующих колесные движители, можно выделить одно-, двух-, трех-, четырех- и многоколесные роботы. Чаще всего применяют четырёхколёсные роботы.

Примером такого робота является универсальная робототехническая платформа, разработанная в Центральном научно-исследовательском и опытно-конструкторском институте робототехники и технической кибернетики (Россия) – рисунок 2.7а.

Робот предназначен для ликвидации последствий крупных аварий, катастроф и террористических актов, для разминирования, проведения поисково-спасательных операций, обеспечения охраны и внутренней безопасности, для радиационной, химической, биологической разведки и мониторинга.

Одно- и двухколесные решения позволяют упростить конструкцию робота, придать ему возможность работать в ограниченных пространствах.

Системы управления такими роботами, как правило, используют в качестве датчика угловых отклонений гироскоп, как это сделано в сегвее. Почти ту же гибкость в использовании при более простой системе управления могут обеспечить трехколесные роботы.



а) Универсальная платформа: ЦНИИ РТК



б) Комплекс МРК-02 ВТ: МГТУ



в) Боевой комплекс МРК-300БТ: МГТУ

Рисунок 2.7 – Примеры наземных колесных и гусеничных роботов

Большей проходимостью обладают многоколесные роботы (шести-, восьми и более колесные). Приведем в качестве примера шестиколесный мобильный робототехнический комплекс МРК-02 ВТ, разработанный в специальном конструкторско-технологическом бюро прикладной робототехники МГТУ им. Н.Э. Баумана (рисунок 2.7б). Робот МРК-02 ВТ имеет массу 40 кг, габариты - 0,66×0,55×0,4 м и предназначен для проведения инспекционных проверок, аварийно-спасательных работ, взрыво-технических работ.

Большее сцепление с грунтом, чем колесные движители обеспечивают гусеничные движители. Многие современные боевые и исследовательские роботы разрабатываются как гусеничные. Примером таких роботов может служить перспективный образец боевого мобильного робототехнического комплекса МРК-300БТ (рисунок 2.18), созданный в том же конструкторско-технологическом бюро МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Над- и подводные роботы. Чаще всего в плавающих роботах используют в качестве движителя один или несколько гребных винтов. Приведем в качестве примера российский подводный робот «Клавесин», разработанный в Институте проблем морских технологий ДВО РАН (рисунок 2.8). Робот может работать, как автономно, так и в режиме дистанционного управления. Испытания Клавесина прошли в Северном Ледовитом океане на глубине более полутора тысяч метров.



Рисунок 2.8 – Пример подводного робота «Клавесин»

Воздушные роботы. Летающих роботов обычно конструируют по самолетной или вертолетной схеме, когда движителем является воздушный винт.

Известно большое число роботов, летающих по самолетной схеме и предназначенных, прежде всего, для использования в военных целях (разведка территорий, борьба с террористами и т.д.). Примером такого робота является разработка израильской компании *Israel Aircraft Industries* – робот *Birdy* (масса – 1,3 кг, ресурс автономной работы – 40 минут) – рисунок 2.9.



а) Рисунок 2.20 – Робот *Birdy*



б) Робот *Cyber Quad*

Рисунок 2.9 – Примеры воздушных роботов

Примером робота, летающего по вертолетной схеме, является робот *Cyber Quad* (рисунок 2.21) австралийской компании *Cyber Technology*. Максимальная скорость робота – 64 км/ч, а время полёта без подзарядки – около 35 минут.

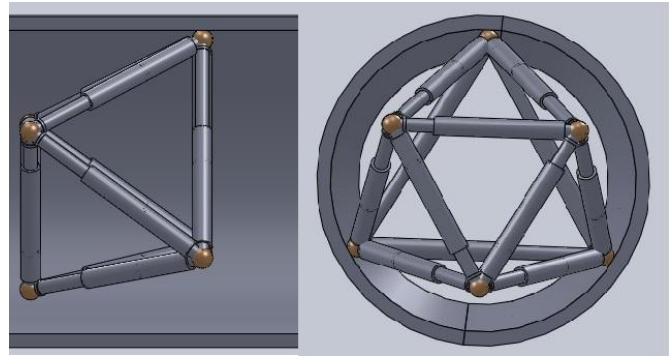
Оригинального летающего микроробота *MEMS* разработали канадские инженеры (исследовательская группа университета Ватерлоо). Для перемещения в пространстве *MEMS* использует магнитное поле Земли, то есть летает за счет левитации. Весит микроробот всего 0,83 грамма.

Специальные роботы. Выделим роботов, предназначенных для перемещения по вертикальным тестурированным поверхностям, и трубных роботов.

Роботы для перемещения по вертикальным поверхностям могут использовать классические движители, а также движители на основе конечностей, ступни которых оснащены присосками, коготками либо используют свойство адгезии. Прототипом последних роботов можно считать обыкновенных мух, которые могут свободно перемещаться по любой твердой поверхности — по побеленному потолку, по оконному стеклу и т.д.

Создание роботов для перемещения по внутренним поверхностям труб также сопряжено с большими проблемами, поскольку они должны перемещаться не только по прямолинейным, но и по криволинейным трубам, трубам переменного сечения, трубам, внутренние поверхности которых покрыты отложениями и т. д. Часто также необходима возможность перемещения по вертикальным трубам.

При проектировании «трубоходов» широко используют классические, прежде всего, колесные и гусеничные движители. Приведем в качестве примера телеуправляемый колесный робот, созданный на кафедре РК-10 «Роботы и робототехнические системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана и предназначенный для диагностики состояния вентиляционных труб, прежде всего, с точки зрения оценки уровня их загрязненности – рисунок 2.10а. Габаритные размеры робота составляют 180x150x90 мм.



а) Трубоход: кафедра РК-10 МГТУ

б) Модель трубохода: кафедра РК-6 МГТУ

Рисунок 2.10 – Примеры специальных роботов

Известно также большое число трубоходов, использующих не классические движители. Примером могут служить роботы на основе щеточного движителя, прототипом которых служит червь, тело которого покрыто щетинками. Робот-трубоход, построенный на основе такого движителя, в простейшем варианте имеет две цилиндрические щетки, соединенные между собой возвратно-поступательным приводом. Важно, что щеточные движители могут обеспечивать перемещение робота-трубохода не только в цилиндрических трубах, но и каналах с сечением произвольной формы. Известны роботы-трубоходы, предназначенные для использования в ферромагнитных трубах и удерживаемые на опорной поверхности трубы силами магнитного взаимодействия. Используются также роботы, движители которых основаны на явлении адгезии.

На кафедре РК-6 «Системы автоматизированного проектирования» и в ИМАШ РАН проводятся работы, имеющие целью разработку нового типа движителей для роботов-трубоходов на основе механизма параллельной структуры типа додекапод, имеющего двенадцать степеней свободы (рисунок 2.10б).

2.2. Манипуляторы и схваты роботов

Манипулятор – это механизм для управления пространственным положением орудий труда робота (его рабочих органов) и объектов труда. Манипуляторы, как правило, включают в себя звенья, обеспечивающие поступательные и вращательные перемещения его рабочих органов. Среди рабочих органов, в первую очередь, выделяют захватные устройства (схваты), технологические инструменты и специальные устройства. Специфическими для роботов являются их схваты.

Манипуляторы

Определим манипулятор как совокупность пространственного рычажного механизма и системы приводов, осуществляющей под управлением автоматического устройст-

ва или человека-оператора действия (манипуляции), аналогичные действиям руки человека. В качестве приводов (актуаторов) манипулятора чаще всего используют гидравлические, пневматические и электромеханические приводы.

В зависимости от используемой кинематической схемы манипуляторы разделяют на два больших класса - манипуляторы последовательной и параллельной кинематики.

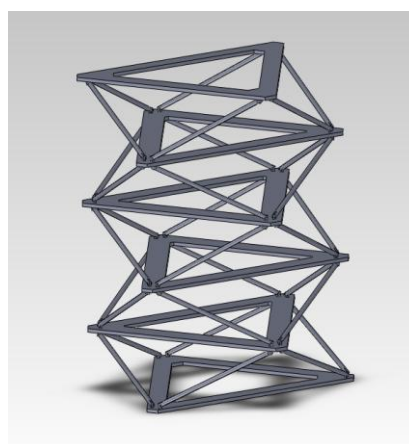
Манипуляторы первого класса представляют собой последовательное соединение звеньев и имеют следующие недостатки: низкий показатель грузоподъемности, низкая точность позиционирования схвата, относительно низкая жесткость. Эффективным способом преодоления указанных недостатков является использование в качестве звеньев механизмов параллельной кинематики.

Основные преимущества манипуляторов на основе таких механизмов заключаются в следующем: высокая точность исполнения движений, высокие скорости и ускорения схвата, высокая степень унификации узлов магнипулятора.

Пример робота, использующего манипуляторы последовательной кинематики, представляет робот *MK2* (рисунок 2.11а) компании *HDT Robotics* (США), предназначенный для обезвреживания взрывных устройств.



а) Манипуляторы робота *MK2*



б) 3-D модель манипулятора для Миллимитрона: кафедра РК-6 МГТУ; АКЦ ФИАН РАН



в) Манипулятор *Snake-arm*

Рисунок 2.11 – Примеры манипуляторов

Совместно с астрокосмическим центром ФИАН РАН кафедра РК-6 (САПР) МГТУ им. Н.Э. Баумана разрабатывает проект пятисекционного манипулятора, построенного на основе механизмов параллельной кинематики типа гексапод и предназначенного для ориентации антенны перспективной космической обсерватории «Миллиметр».

Известен инновационный бионический манипулятор в виде змеи *Snake-arm* (Англия).

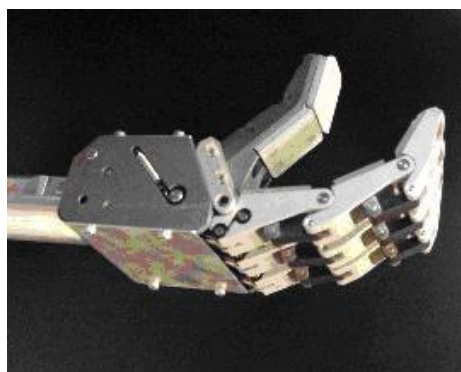
Схваты

Схват следует считать одной из основных частей робота, поскольку он выполняет действия, ради которых и создан сам робот. Схват крепится к последнему звену манипулятора. Часто хват делают съемным, чтобы один и тот же робот мог выполнять различные функции при присоединении к нему соответствующего рабочего органа. В качестве актуаторов хвата обычно используют гидравлические, пневматические и электромеханические приводы.

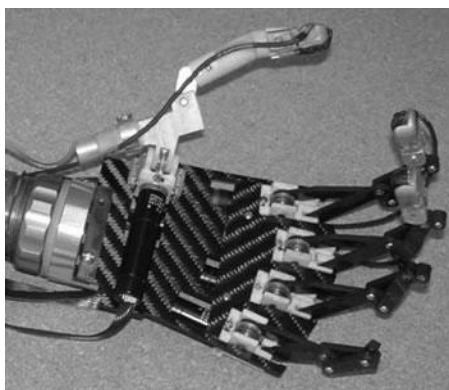
Наиболее сложным типом хватов является антропоморфный бионический хват, моделирующий руку человека (андроидный хват). Несколько примеров таких хватов представлено ниже (<http://www.androidworld.com/prod76.htm>).



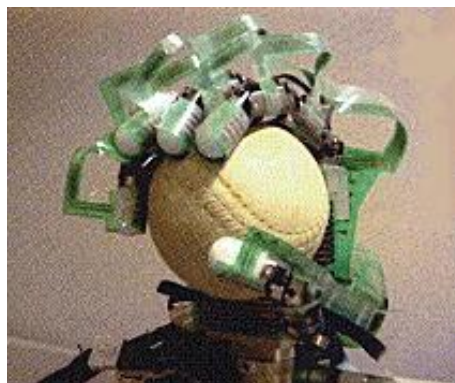
а) Схват компании *Shadow Robot Company*



б) Схват компании *Techno Concept*



в) Схват *Southampton Remedi-Hand*



г) Схват компании *Dainichi*

Рисунок 2.11 – Примеры хватов

2.3. Проблемы проектирования движителей и манипуляторов

Методы проектирования традиционных движителей прошли большой путь развития и в настоящее время поддержаны большим числом специализированных программных систем. Эти методы и программное обеспечение используются также для проектирования традиционных движителей роботов. Иной является ситуация с проектированием движителей, не имеющих прототипов в живой природе.

Из этого класса движителей только для шагающих роботов усилиями большого числа ученых, в том числе советских и российских, в настоящее время достаточно развита их теория, которая позволяет оптимизировать режимы движения этих роботов, синтезировать алгоритмы управления ими. Для других движителей данного класса только предстоит разработать математические модели, а также методы, алгоритмы и программное обеспечение, построенные на основе этих моделей.

Аналогичная ситуация имеет место в области проектирования манипуляторов роботов. К настоящему времени хорошо развита теория, методы, алгоритмы и программное обеспечение, предназначенные для проектирования классических манипуляторов последовательной структуры. Подобный инструментарий для анализа и синтеза манипуляторов параллельной структуры находится в стадии становления.

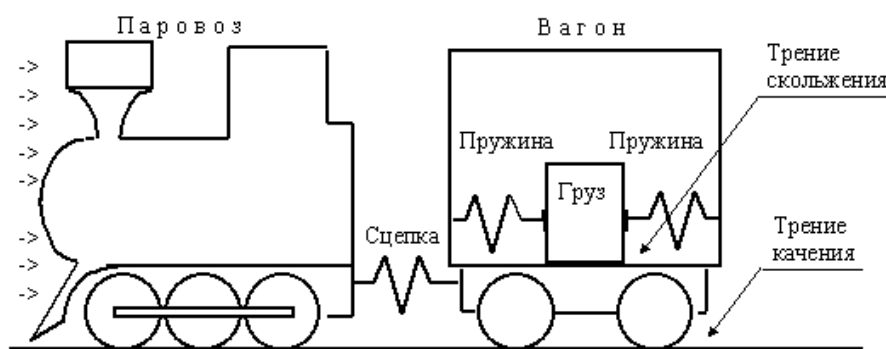
Математическое моделирование движителя и манипулятора

Одной из ключевых проблем, связанных с проектированием робототехнических движителей и манипуляторов, является проблема разработки математических моделей этих устройств. Для решения, в том числе, этой проблемы на кафедре РК-6 (САПР) МГТУ им. Н.Э. Баумана разработан инструментальный программный комплекс многоаспектного моделирования (*multi-domain modeling*) ПА. Здесь под многоаспектностью понимается возможность с помощью данного комплекса моделировать динамические системы различной физической природы (электронные, электрические, механические, гидравлические, пневматические, тепловые), а также произвольные комбинации этих систем.

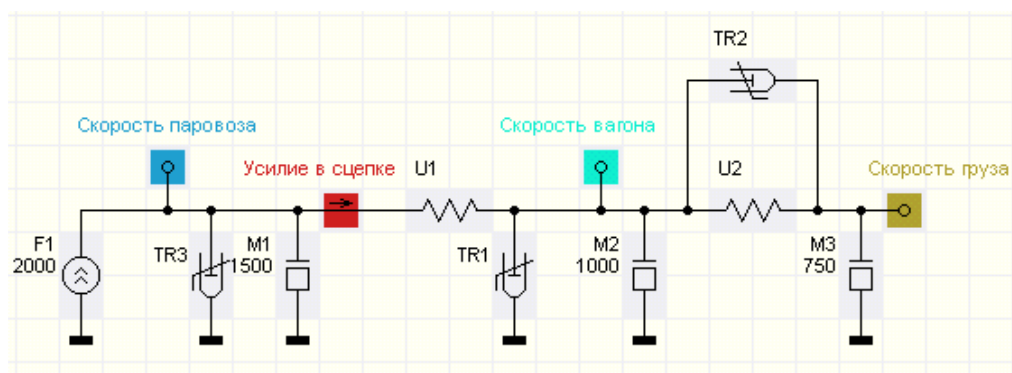
Комплекс ПА прошел большой путь развития. Первая версия этого комплекса (ПА - 6) была разработана в 80-е годы прошлого века. В настоящее время в ряду таких комплексов, как *MathModelica*, *SimulationX*, *Simplorer*, *LMS Virtual.Lab* и некоторые другие, функционирует девятая версия комплекса (ПА-9). Для моделирования систем различной природы в комплексе ПА используется метод физических аналогий. Моделируемый объект задается графическим изображением в виде, так называемой, эквивалентной схемы. Эта схема представляет собой совокупность связанных между собой по определенным правилам элементов, которые являются математическими моделями компонентов модели-

руемого объекта. На основе графического изображения эквивалентной схемы, комплекс ПА автоматически формирует математическую модель объекта в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), которая описывает динамические процессы в этом объекте.

Рассмотрим в качестве примера объект в виде паровоза и одного вагона, в котором находится подпружиненный с двух сторон груз (рисунок 2.12а). Простейшая математическая модель этого объекта в виде эквивалентной схемы имеет вид, представленный на рисунке 2.12б.



а) моделируемая динамическая система



б) простейшая эквивалентная схема системы (интерфейс комплекса ПА-9)

Рисунок 2.12 – К описанию программного комплекса многоаспектного моделирования ПА

Еще одной особенностью проектирования робототехнических движителей и манипуляторов является возможность получения в качестве их математических моделей, так называемых, жестких систем ОДУ, которые, говоря простым языком, имеют в своих решениях, как медленно, так и быстро меняющиеся составляющие. Решение таких систем уравнений сопряжено с большими трудностями. На кафедре РК-6 разрабатываются оригинальные методы решения жестких и сверхжестких систем ОДУ.

Принципиальным является то обстоятельство, что в математическом ядре любого программного комплекса *CAE (Computer Aided Engineering)*, включая комплекс ПА, реализованы различные методы численного интегрирования систем ОДУ, включая методы, ориентированные на решение жестких систем уравнений. Однако не все эти методы обеспечивают корректное решение систем ОДУ, имеющих высокую или очень высокую жесткость (см. п.5.2).

Оптимизация конструкции движителя и манипулятора

Как правило, при автоматизированном проектировании любых объектов, включая движители и манипуляторы роботов, ставится задача получить не любую, а в некотором смысле оптимальную конструкцию. Поэтому одной из важнейших в автоматизированном проектировании является процедура оптимизации проектных решений.

Задача оптимизации проектируемого объекта обычно ставится в следующих терминах. Заданы вектор варьируемых в процессе оптимизации параметров объекта проектирования $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, множество допустимых значений этого вектора D , а также формула либо алгоритм, которые позволяют для любого допустимого X вычислить соответствующее значение критерия оптимальности (целевой функции) $f(X)$. Требуется найти такой допустимый вектор X^* , который обеспечивает экстремальное (минимальное или максимальное значение) функции $f(X)$, что записывают в виде

$$\underset{X \in D}{extr} f(X) = f(X^*) = f^*. \quad (1)$$

При проектировании многосекционного манипулятора, например, компонентами вектора X могут быть размеры каждой из секций, а критерием оптимальности – подлежащая максимизации жесткость манипулятора.

С математической точки зрения задача (1) представляет собой задачу глобальной условной оптимизации. Особенности этой задачи при автоматизированном проектировании часто являются высокая размерность вектора варьируемых параметров X , сложность топологии множества допустимых значений D , недифференцируемость (негладкость) целевой функции $f(X)$, ее овражность и многоэкстремальность, а также высокая вычислительная сложность.

В настоящее время известно большое число алгоритмов решения задачи (1). Указанные выше ее особенности делают актуальной разработку новых, более эффективных алгоритмов. В этой связи на кафедре РК-6 ведутся научно-исследовательские работы в области разработки, так называемых, популяционных, вдохновленных природой (опять

бионический подход!) алгоритмов оптимизации, к которым относятся также широко известный генетический алгоритм.

В области популяционных алгоритмов глобальной оптимизации на кафедре РК-6 предложены новые либо модифицированы известные алгоритмы роя частиц, пчелиного роя, колонии муравьев, искусственной иммунной системы, эволюции разума, кукушки, биогеографии. Кроме того, разработан или модифицирован ряд алгоритмов на основе гибридизации указанных выше алгоритмов, в том числе на основе, так называемых, ко-алгоритмической и мультимемеевой гибридизации.

С помощью разработанных методов, алгоритмов и соответствующего программного обеспечения выполнена оптимизация размещения опор многосекционного манипулятора параллельной структуры, решена задача оптимального управления управляемым спуском космического аппарата на землю, задача управления вибрационным роботом, ряд других задач оптимального проектирования технических объектов.

Современные задачи оптимизации проектируемых объектов, как правило, являются многокритериальными (многоцелевыми), когда путем варьирования вектор параметров X требуется добиться минимума или максимума не одного, а сразу нескольких (частных) критериев оптимальности $f_1(X), f_2(X), \dots, f_m(X)$, которые в совокупности образуют векторный критерий оптимальности $F(X) = (f_1(X), f_2(X), \dots, f_m(X))$. Примерами таких критериев могут быть вес, энергопотребление (требуется минимизировать), надежность (необходимо максимизировать). Будем для определенности далее говорить о задаче минимизации каждого из частных критериев оптимальности. Задачу максимизации некоторого критерия легко свести к задаче минимизации исходного критерия со знаком минус.

Во введенных обозначениях и соглашениях *условно* задачу многокритериальной оптимизации можно записать в виде выражения

$$\min_{X \in D} F(X) = F(X^*) = F^*, \quad (2)$$

которое понимается только в том смысле, что нужно добиться минимальных значений каждой из компонент вектора $F(X)$. Проблема решения задачи (2) состоит в том, что частные критерии оптимальности, как правило, противоречивы, то есть своих минимальных значений они достигают при разных значениях компонент вектора X .

Основным понятием в задаче многокритериальной оптимизации является понятие множества Парето D^* этой задачи. Множество Парето образует такая совокупность векторов X , в которой ни один из частных критериев $f_1(X), f_2(X), \dots, f_m(X)$ невозможно уменьшить, не увеличив хотя бы один из других критериев. В теории принятия решения принято считать, что решение задачи (2) нужно искать на множестве D^* .

При автоматизированном проектировании для каждого из частных критериев оптимальности характерны особенности, указанные выше для задачи (1). Поэтому, несмотря на наличие большого числа алгоритмов решения задач многокритериальной оптимизации, актуальной является разработка новых алгоритмов, которые учитывают особенности задач, возникающих при автоматизированном проектировании современных сложных технических объектов. Поэтому на кафедре РК-6 ведется разработка новых и модификация известных алгоритмов многокритериальной оптимизации. Так, на кафедре предложен интерактивный алгоритм *PREF*, основанный на аппроксимации функции предпочтений лица, принимающего решения, с помощью аппарата искусственных нейронных сетей, нечеткой логики (так называемых, мягких вычислений), а также на основе нейронечеткого подхода. Кроме того, кардинально модифицирован с целью повышения эффективности современный интерактивный алгоритм многокритериальной оптимизации *BC-EMO*.

С помощью разработанных алгоритмов многокритериальной оптимизации и соответствующего программного обеспечения решен ряд сложных задач: двумерная двухкритериальная оптимизация механической подсистемы двигателя внутреннего сгорания; трехмерная трехкритериальная оптимизация геометрии щелевого фильтра для очистки жидкостей; восьмимерная двухкритериальная оптимизация геометрии исполнительного механизма пресса.

Упомянутый алгоритм многокритериальной оптимизации *BC-EMO*, а также ряд других современных алгоритмов многокритериальной оптимизации используют предварительное построение конечномерной аппроксимации множества Парето либо его фрагментов. Построение аппроксимации этого множества представляет и самостоятельный интерес. Поэтому на кафедре РК-6 в рамках тематики многокритериальной оптимизации ведется разработка новых и модификации известных методов Парето-аппроксимации. Так на кафедре разработаны бионические и иные методы такого сорта на основе модифицированного генетического алгоритма, алгоритмов роя частиц, муравьиной колонии, адаптивного алгоритма взвешенных сумм

При синтезе манипулятора работа приходится решать задачу построения его области достижимости, то есть задачу построения множества точек в трехмерном пространстве, в которые конструкция манипулятора позволяет перевести его схват. Решение задачи усложняет возможность наличия в области достижимости различных препятствий, в том числе подвижных. Оказалось, что алгоритмы многокритериальной оптимизации могут быть использованы для конечномерной аппроксимации границы области достижимости многосекционного манипулятора. На основе этой идеи, на кафедре разработан *SPSO*-метод, основанный на многокритериальной модификации известного метода роя частиц.

Аналогичную работу кафедры проводит в настоящее время вместе с ВЦ РАН с целью использовать разработанный в ВЦ, так называемый метод, неравномерных покрытий для аппроксимации границы области достижимости многосекционного манипулятора.

Параллельные вычисления при математическом моделировании и оптимизации движителей и манипуляторов роботов

Как уже отмечалось выше, спецификой задачи математического моделирования движителя робота и его манипулятора является высокая вычислительная сложность моделей этих механизмов. Например, динамическая модель достаточно сложного многосекционного манипулятора может содержать сотни дифференциальных уравнений. Отсюда следует высокая вычислительная сложность целевых функций при оптимизации тех же механизмов. Поэтому актуальными являются две проблемы: 1) уменьшение вычислительной сложности математической модели исследуемой динамической системы, 2) разработка параллельных методов, алгоритмов и соответствующего программного обеспечения для математического моделирования и оптимизации этой системы.

На кафедре РК-6 ведутся работы над обеими указанными проблемами. С целью уменьшения вычислительной сложности модели используем подход на основе так называемых метамоделей рассматриваемых динамических систем, который, в частности, предполагает использование нейросетевой аппроксимации этих систем. Для параллельного решения одно- и многокритериальной задач оптимизации на кафедре разработаны алгоритмы и программное обеспечение на основе генетического алгоритма и алгоритма роя частиц, разворачиваются работы по параллельной реализации большого числа других популяционных алгоритмов одно- и многокритериальной оптимизации. Разработанные и разрабатываемые алгоритмы и программное обеспечение ориентированы на различные классы параллельных вычислительных систем: вычислительные кластеры, графические процессорные устройства, облачную платформу.

Общей проблемой параллельных вычислений является, так называемая, проблема балансировки загрузки многопроцессорной вычислительной системы, суть которой заключается в такой организации вычислений, чтобы все процессоры этой системы были загружены равномерно. На кафедре РК-6 в этой области также проводятся работы.

3. Алгоритмическое обеспечение роботов

Отметим прежде, что по степени участия человека в управлении роботом выделяют биотехнические и автономные (автоматические) роботы. К биотехническим относят все дистанционно-управляемые копирующие роботы, экзоскелетоны, роботы, управляемые

человеком с пульта управления, а также полуавтоматические роботы (включая роботы с супервизорным управлением, когда оператор вмешивается в действия робота путем, например, целеуказания). Автономные роботы после их создания и настройки могут, в принципе, функционировать без участия человека. Такие роботы обязательно должны обладать элементами искусственного интеллекта. Поскольку в роевой робототехнике возможно применение только автономных роботов, всюду далее имеем в виду именно их.

При построении систем управления роем роботов целесообразно исходить из так называемой композиционной концепции, сходной с физиологическими моделями управления движением в живых организмах и их сообществах (опять же, бионический подход!). В соответствии с этой концепцией управление роем роботов можно разбить на три иерархических уровня.

Первый (низший) уровень – это процесс автоматического регулирования отдельных устройств одного робота, например, процесс отработки с помощью соответствующего регулятора (элементарного автомата) задающего воздействия на какой-либо сустав в андронидном схвате. Какие-либо связи между отдельными регуляторами (горизонтальные связи) на этом уровне отсутствуют.

Второй уровень управления отвечает за управление всем роботом в целом. Систему управления этого уровня можно считать автоматом, объединяющим все элементарные автоматы первого уровня. При этом каждый элементарный автомат решает свою собственную задачу, а, например, локомоционный процесс или процесс выполнения некоторой рабочей операции является результатом совместного действия этих автоматов. Важно, что управление всеми элементарными автоматами осуществляется параллельно.

Третий (верхний) уровень иерархии управления – это управление все роем в целом. Конечной целью управления на этом уровне является выполнение роем поставленной перед ним задачи.

Методы, алгоритмы и программное обеспечение для синтеза элементарных автоматов в настоящее время хорошо развиты, так что с алгоритмической точки зрения управление на низшем уровне иерархии не представляет проблем. Ограничиваемся поэтому двумя оставшимися уровнями.

3.1. Управление отдельным роботом

В настоящее время очень многое сделано для разработки теории и методов синтеза автоматов, управляющих роботом в целом. Проблема эта очень сложна, но близкие проблемы приходится решать при разработке любого сложного современного изделия (самолет, ракета, корабль, подводная лодка и т.д.). Специфика робототехники в данном случае

состоит в том, что движители робота могут быть кинематически очень сложными. Кроме того, роботу часто приходится работать в условиях очень высокой природной неопределенности (перемещение по пересеченной местности, например) и/или неопределенности, обусловленной действиями и противодействиями других роботов, механизмов и людей. Последнее особенно характерно для военных роботов.

Поскольку робот функционирует в изменяющейся среде, он должен постоянно получать информацию об этой среде. Поэтому в системе управления роботом можно выделить две подсистемы - сенсорная и управляющая подсистемы.

Сенсорная подсистема робота

Сенсорная подсистема (подсистема очувствления) включает в себя устройства, которые собирают информацию о внешней окружающей среде и о местоположении в пространстве различных частей робота. К этим устройствам относятся датчики линейных и угловых скоростей и ускорений, тактильные датчики осязания, фотометрические, ультразвуковые и локационные датчики и так далее.

Важнейшей компонентой сенсорной подсистемы робота является система технического зрения (можно сказать, глаза робота). Основная задача этой системы состоит в том, чтобы получить изображения объектов окружающей среды (обычно, с помощью телевизионной камеры) и распознать эти изображения (принято говорить, распознать образы). Последняя проблема является центральной для создания систем технического зрения. Из многих объектов, присутствующих на изображении, робот должен выделить различные классы объектов: те, которые ему необходимы для выполнения каких-то действий; представляющие опасность; незнакомые объекты и т.д. Другими словами, система технического зрения робота должна уметь выделять признаки объектов и классифицировать объекты по этим признакам.

На кафедре РК-6 в течение длительного времени проводятся работы в области технического зрения и, в частности, в области распознавания образов (см. п.5.2).

Для того, чтобы успешно действовать в изменяющейся окружающей среде, роботу недостаточно одних знаний об окружающей обстановке. Кроме этого, робот (точнее, система управления роботом) должен знать положение в пространстве всех своих элементов. Для решения этой задачи, кроме рассмотренной «внешней» сенсорной системы, робот оснащается аналогичной сложной «внутренней» системой. Датчики этой системы постоянно передают управляющему автомату робота указанную информацию. Например, угловое положение корпуса робота может быть определено на основе информации от соответ-

вующих датчиков угловых скоростей и ускорений, положение секций многосекционного манипулятора – с помощью прецизионных потенциометров и лазерных дальномеров и т.д.

Управляющая подсистема

Системы управления современных роботов строят, как правило, на основе микропроцессорных ЭВМ. Эта ЭВМ получает информацию от «внешней» и «внутренней» сенсорных систем и на этой основе с помощью запрограммированных в ней алгоритмов управления роботом и его подсистемами вырабатывает управляющие воздействия для элементарных автоматов нижнего уровня иерархии.

Проектирование алгоритмов управления сложными современными роботами требует разработки математических моделей роботов в целом и их подсистем, решения задач оптимизации и оптимального управления и других сложных вычислительных задач. Особенностью роботов является то, что в их структуре можно выделить большое число разнородных подсистем – механическая, электрическая, гидравлическая, пневматическая и т.д. Эти подсистемы часто сильно интегрированы, так что приходится говорить, например, об электромеханических, электрогидравлических, электропневматических и других подобных системах.

Для математического моделирования таких интегральных систем и подсистем на кафедре РК-6 разработан уже упоминавшийся инструментальный программный комплекс ПА (п. 2.3). С помощью этого комплекса, например, построена математическая модель и выполнен анализ кинематики и динамики управляемого многосекционного манипулятора параллельной кинематики типа хобот (п. 2.2).

Как отмечалось в п. 2.3, при синтезе манипулятора робота приходится решать задачу построения его области достижимости. Часто схват должен не только достичь заданной точки пространства, но достичь ее с заданными скоростью и ускорением. При решении этой задачи приходится использовать динамическую модель манипулятора, представляющую собой с математической точки зрения систему ОДУ. Таким образом, возникает задача построения области достижимости манипулятора в так называемом фазовом пространстве, то есть пространстве, которое определяется еще и осями координат, соответствующими скорости схвата и его ускорению. На кафедре РК-6 развиваются методы построения множества достижимости динамического объекта, как в геометрическом пространстве, так и в расширенном фазовом пространстве (см. п.5.2).

3.2. Управление роем роботом

Обычно системы управления роем роботов строят на основе бионических принципов, используя такие популяционные алгоритмы как алгоритм роя частиц, роя пчел и т.д. Отметим, что не все популяционные алгоритмы могут быть использованы для управления роем роботов. Так широко известный муравьиный алгоритм оптимизации (*Ant Colony Optimization, ACO*) предполагает, что индивиды роя оставляют в среде, в которой они функционируют, специальные метки (в природе – феромонные). Реализация этой идеи усложняет робот, поскольку требует наличия у роботов роя соответствующих материалов, механизмов их размещения, а также детектирующих устройств. Во многих случаях изменение окружающей робота среды вообще является неприемлемым.

Выделим некоторые классы задач, которые эффективно могут быть решены с помощью роя роботов:

- 1) исследование некоторой территории с целью обнаружения участка с экстремальным значением заданного вещества;
- 2) в условиях разного рода препятствий достижение точки на местности с заданными координатами (с целью исследования окрестности этой точки или воздействия на объект(ы) в ее окрестности);
- 3) определение границ области, все точки которой обладают некоторым общим свойством (например, уровень радиации в которых не превышает заданной величины);
- 4) составление карты заданной территории;
- 5) патрулирование границы некоторой области с целью обнаружения вторжения.

Алгоритмы управления роем, с помощью которых могут быть решены указанные классы задач, весьма различны. Например, алгоритмы решения первой задачи должны обеспечивать высокую вероятность локализации участка с неизвестными координатами. Алгоритмы решения задач второго класса требуют планирования траектории каждого робота и роя в целом. В третьем случае алгоритм управления роем должен обеспечивать определение искомой границы с заданной точностью. В четвертом случае роботы роя должны обеспечить равномерное покрытие рассматриваемой территории. Пятая задача предполагает, с одной стороны, плотность покрытия границы области, а, с другой стороны, малую предсказуемость нахождения роботов в каждой из точек этой границы. Обзор перечисленных, а также значительного числа других алгоритмов далеко выходит за допустимый объем нашего изложения.

Перечислим базовые качества алгоритмов управления роем роботов, не зависящие от решаемой роем задачи:

- масштабируемость – роевой алгоритм должен работать при любом числе роботов в рое;

- децентрализованность – роботы в рое должны функционировать автономно, не используя в рабочем режиме какое-либо внешнее управление;

- локальность взаимодействий – каждый из роботов может коммутировать с ограниченным числом ближайших в некотором смысле роботов (не обязательно геометрически).

Ограничимся рассмотрением первой из перечисленных выше задач. Сформулируем эту задачу в терминах задачи глобальной максимизации (1). Положим, что двумерный вектор-столбец варьируемых параметров X образуют координаты x, y точки на поверхности, например, Земли в декартовой системе координат Oxy , так что $X = (x, y)^T$, где T - символ транспонирования; множество D - исследуемая область; целевая функция $f(X)$ - значение искомого вещества в точке X .

Выделяем два класса роев роботов: гомогенный рой, построенный из одинаковых роботов; гетерогенный рой, роботы в котором могут быть функционально дифференцированы. Рассмотрим прежде использование для решения поставленной задачи гомогенного роя роботов, функционирующего по правилам алгоритма роя части (*Particle Swarm Optimization, PSO*).

Гомогенный рой роботов, управляемый с помощью алгоритма роя частиц. Обозначим $R = \{r_i, i \in [1: s]\}$ рассматриваемый рой роботов, где s - число роботов в рое; $X_i(t) = (x_i(t), y_i(t))$ - текущее положение робота r_i . Пусть начальные положения роботов роя определяет набор векторов $X_i(0)$, $i \in [1: s]$. В соответствии с алгоритмом *PSO* в этих обозначениях положение робота r_i в следующий момент времени $t+1$ определяют формулы

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t); \quad (3)$$

$$V_i(t) = \alpha V_i(t-1) + U_2[0; \beta] \otimes (X_i^*(t) - X_i(t)) + U_2[0; \gamma] \otimes (X_i^{**}(t) - X_i(t)), \quad (4)$$

где α, β, γ - свободные параметры метода; $V_i(t)$ - двумерный вектор-столбец приращений координат робота; $U_2[a; b]$ - двумерный вектор независимых вещественных случайных чисел, равномерно распределенных в интервале $[a; b]$; \otimes - символ покомпонентного умножения векторов; $X_i^*(t)$ - вектор координат робота r_i , соответствующий его наилучшему значению функции $f(X)$ за время поиска $[0: t]$:

$$\min_{\tau \in [0:t]} f(X_i(\tau)) = f(X_i^*(t));$$

$X_i^{**}(t)$ - вектор координат соседнего с данным робота с наилучшим за то же время значением функции $f(X)$:

$$\min_{j \in N_i} f(X_j^*(t)) = f(X_i^{**}(t));$$

N_i - множество номеров роботов, являющихся соседями данного робота r_i .

Вектор $V_i(t)$ имеет смысл шага, который робот r_i совершает при переходе из текущего положения $X_i(t)$ в положение $X_i(t+1)$. Часто этот вектор называют *скоростью робота r_i* в момент времени t . Важнейшее в алгоритме *PSO* понятие соседства частиц рассмотрено ниже.

Первое слагаемое в формуле (4) обозначим $V_i^I(t)$. Это слагаемое получило название *инерционной компоненты*, которая выполняет функцию памяти робота о его перемещении на предыдущем цикле поиска.

Второе слагаемое в той же формуле обозначим $V_i^C(t)$. Слагаемое называют *когнитивной компонентой* (по социальной аналогии), поскольку она формализует тенденцию робота r_i вернуться из своего текущего положения $X_i(t)$ в положение $X_i^*(t)$, в котором он имел на предыдущих циклах наилучшее значение функции $f(X)$. Данная компонента реализует функцию памяти робота о его наилучшем за все время поиска положении.

Третье слагаемое формулы (4) обозначим $V_i^S(t)$. Данное слагаемое именуют *социальной компонентой*. Компонента отражает стремление робота r_i переместиться в направлении своего наиболее успешного соседа $X_i^{**}(t)$. Можно сказать, что социальная компонента представляет собой реализацию памяти робота об оптимальном положении его наиболее успешного соседа.

Суммарный эффект взаимодействия указанных компонентов иллюстрирует рисунок 3.6, на котором принято, что все компоненты случайных векторов $U_2[0; \beta]$, $U_2[0; \gamma]$ одинаковы, аргумент t опущен, $X_i' = X_i(t+1)$.

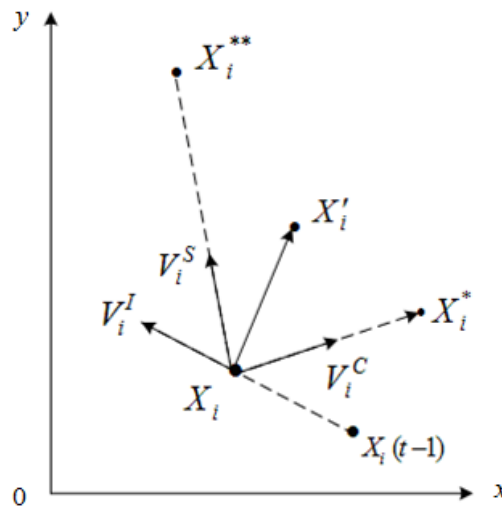


Рисунок 3.6 – К схеме алгоритма *PSO*

Эффективность алгоритм *PSO* в значительной мере зависит от используемой топологии соседства роботов (*swarm topology*), которая определяется неориентированным *графом соседства*, вершины которого соответствуют роботам роя, а ребра связывают непосредственных соседей. Соседство роботов не зависит от геометрического расположения роботов в пространстве поиска, а определяется только их индексами (номераами) и сохраняется на протяжении всего поиска (если не используется *динамическая топология соседства*). Таким образом, соседними могут быть роботы, располагающиеся в далеких областях пространства поиска.

В задачах глобальной оптимизации чаще всего используются следующие топологии соседства: клика, кольцо, двумерный тор, кластерная топология. Рассмотрим в качестве примера две топологии соседства. *Глобально оптимальную топологию «клика»* (*gbest-topology*) определяет полностью связанный граф, в котором соседями каждого из роботов r_i , $i \in [1:s]$ являются остальные $s-1$ роботов. *Локально оптимальной топологии* типа «кольцо» (*lbest-topology*) соответствует граф соседства, в котором соседями каждого из роботов r_i являются два робота. Например, в графе, приведенном на рисунке 3.7, соседями робота r_1 являются роботы r_2 , r_{12} .

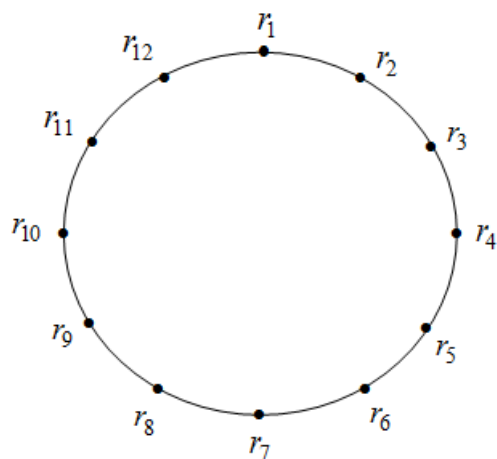


Рисунок 3.7 - Топология соседства роботов типа «кольцо»: $s = 12$

С увеличением размера популяции (числа роботов s) в алгоритме *PSO* повышается вероятность локализации глобального экстремума функции $f(X)$, поскольку такая популяция способна более равномерно покрывать область поиска. Исследования, в том числе выполненные на кафедре РК-6 на имитационной модели роя, показывают, что алгоритм *PSO* во многих случаях обеспечивает высокую эффективность поиска даже при использовании малочисленной популяции из всего 10 - 30 роботов.

Мы оставили вне нашего рассмотрения большое число вопросов, например, способы учета ограничений на допустимые значения вектора X , ограничения радиуса действия средств связи между роботами; ограничения энергетических ресурсов роботов и т.д. Заметим, что рассмотренный алгоритм управления роем не удовлетворяет требованию децентрализованности (см. выше).

Гетерогенный рой роботов, управляемый с помощью пчелиного алгоритма «Стратегию» кормления улья медоносных пчел можно определить следующим образом:

- непрерывный поиск в окрестности улья цветочных участков, содержащих достаточное для добычи количество нектара;
- посещение цветочных участков, изобилующих нектаром, который может быть собран с меньшими усилиями, большим числом пчел по сравнению с участками, содержащими меньшее количество нектара.

Для описания поведения пчёл в природе используют такие понятия, как источник пищи, рабочие пчелы, пчелы-разведчики, незанятые пчелы.

Источник пищи характеризуется своей полезностью, которую определяют такие факторы, как удалённость от улья, концентрация нектара, удобство его добычи.

Рабочие пчелы – пчелы, которые «связаны» с одним из источников нектара, то есть добывают на нем нектар, и владеют следующей информацией о «своем» источнике нектара: направление от улья на источник; полезность источника.

Пчелы-разведчики осуществляют поиск источников нектара для их использования.

Незанятые пчелы в данное время выполняют некоторые работы в улье.

Каждая незанятая пчела может полететь к источнику нектара, следуя за пчелой-разведчиком, которая нашла путь к такому источнику. Пчела-разведчик выполняет «вербовку» незанятых пчел с помощью танца на специальной площадке улья – области танцев. Завербованная (рекрутированная) пчела следует за завербовавшей ее пчелой-разведчиком к области с нектаром и становится, таким образом, рабочей пчелой. Вербовку осуществляют те из пчел-разведчиков, которые нашли участки с полезностью выше некоторого определенного порога.

Рабочая пчела после добычи нектара возвращается в улей и оставляет его там. После этого данная пчела может выполнить одно из следующих действий: оставить «свой» источник нектара и стать незанятой пчелой; продолжить заготовку нектара из прежнего источника, не вербуя других пчел; выполнить вербовку. Пчела выбирает одно из указанных действий по некоторому вероятностному закону.

Придадим целевой функции $f(X)$ смысл количества нектара в точке с координатами, определяемыми вектором X . Рабочей пчеле и пчеле-разведчику поставим в соответствие *рабочего робота* и *робота-разведчика* соответственно. Один цикл поиска пчелиным алгоритмом (*Bees Algorithm, BA*) максимального уровня концентрации искомого вещества состоит из следующих шагов.

Шаг 1. В случайные точки области поиска D отправляем роботов-разведчиков.

Шаг 2. На основании значений функции $f(X)$, вычисленных в указанных точках, выделяем некоторое число *элитных участков*, соответствующих максимальным значениям целевой функции. Аналогично определяем некоторое число *перспективных участков*, которые соответствуют значениям целевой функции, близким к максимальным.

Шаг 3. На каждый из элитных и перспективных участков посылаем определенное число рабочих роботов. Используя соответствующие значения целевой функции, находим новые элитные и перспективные участки. При этом выборе учитываем результаты, полученные, как роботами-разведчиками, так и рабочими роботами.

В качестве текущего приближения к решению задачи принимаем точку с максимальным значением целевой функции. Размеры элитных и перспективных участков уменьшаем с ростом числа итераций, так что на завершающих итерациях поиск ведется только в окрестности максимума целевой функции.

Формализуем представленную схему алгоритма *ВА*, опуская некоторые детали. Среди роботов роя $R = \{r_i, i \in [1:s]\}$ выделяем $s^o < s$ роботов-разведчиков. Положим для простоты записи, что эти роботы являются первыми в рое R , так что $R^o = \{r_i^o, i \in [1:s^o]\}$, и остальные роботы

$$R^w = \{r_i^w, i \in [1:s^w]\} = \{r_i, i \in [s^o + 1:s]\}$$

являются рабочими. Значения функции $f(X)$, соответствующие текущему положению роботов, обозначаем $f(X_i^o) = f_i^o$, $f(X_i^w) = f_i^w$ соответственно.

Множество элитных участков обозначаем $A^b = \{a_j^b, j \in [1:d^b]\}$, где d^b - число таких участков. Аналогично, множество перспективных участков обозначаем $A^p = \{a_k^p, k \in [1:d^p]\}$. Полагаем, что участки a_j^b , a_k^p представляют собой прямоугольники, грани которых параллельны координатным осям Ox , Oy , центры находятся в точках X_j^b , X_k^p и длины сторон равны $2\rho_1^b$, $2\rho_2^b$ соответственно (рисунок 3.8). Здесь $2\rho_1^b$, $2\rho_2^b$, $l = 1, 2$ - радиусы участков.

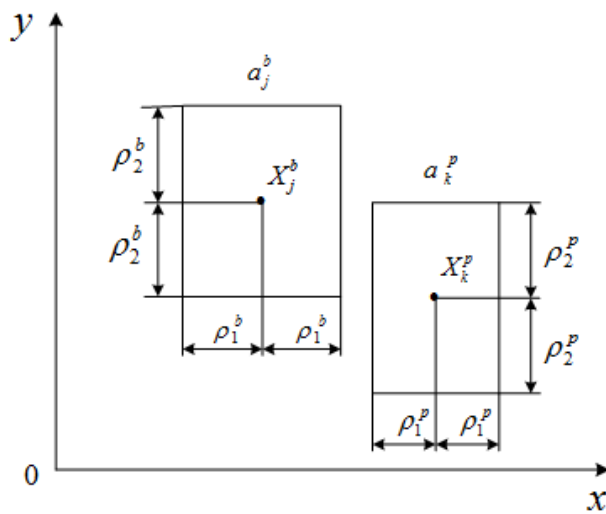


Рисунок 3.8 – К определению элитных и перспективных участков

Во введенных обозначениях схема алгоритма *ВА* имеет следующий вид.

1) Генерируем случайные точки X_i , $i \in [1:s^o]$, равномерно распределенные во множестве D , и отправляем в эти точки s^o роботов-разведчиков. Вычисляем в точках X_i значения целевой функции $f(X_i) = f_i^o$, сортируем величины f_i^o по убыванию и представляем в виде линейного списка.

2) Точки X_j , соответствующие первым d^b элементам списка, объявляем центрами X_j^b элитных участков a_j^b ; $j \in [1:d^b]$. Аналогично, точки X_k , $k \in [1:d^p]$, соответствующие последующим d^p элементам, объявляем центрами перспективных участков a_k^p .

3) В каждый из элитных a_j^b и перспективных участков a_k^p посылаем по n^b и n^p рабочих роботов, так что $n^b d^b + n^p d^p = s^w$. Координаты точек, в которые посылаются эти роботы, полагаем случайными величинами, равномерно распределенными в соответствующих прямоугольниках a_j^b , a_k^p . Во всех точках, в которые посланы роботы, вычисляем значения функции приспособленности.

4) Проверяем выполнение условия окончания поиска. Если это условие выполнено, то в качестве решения задачи принимаем точку, соответствующую максимальному достигнутому значению функции $f(X)$, и завершаем поиск. В противном случае, все значения этой функции, найденные роботами-разведчиками и рабочими роботами, сортируем по убыванию и представляем в виде линейного списка. Переходим к шагу 2.

В качестве условия окончания поиска может быть использовано, например, достижение заданного числа циклов поиска T или стагнация процесса поиска вычислительного процесса в течении заданного числа циклов.

Отметим, что в представленном алгоритме, как и в предыдущем алгоритме поиска, основанном на алгоритме роя частиц, не освещено большое число деталей, в том числе существенных.

4. Системы автоматизированного проектирования и их связь с робототехникой

4.1. Общие сведения

ГОСТ 23501.101-87 определяет систему автоматизированного проектирования (САПР) как организационно-техническую систему, входящую в структуру проектной организации и осуществляющую проектирование при помощи комплекса средств автоматизированного проектирования. О месте САПР в современном производстве говорят в терминах жизненного цикла изделия, который представляет собой период от возникновения потребности в создании изделия до его ликвидации вследствие исчерпания потребительских свойств. Основными этапами жизненного цикла изделия являются научно-исследовательская работа, проектирование, производство, эксплуатация, утилизация. Системы автоматизированного проектирования поддерживают, прежде всего, второй из указанных этапов жизненного цикла изделия.

Функциональность САПР в значительной мере определяется отраслью промышленности, в которой она эксплуатируется. Ограничиваемся рассмотрением САПР машиностроительных отраслей промышленности. В таких САПР выделяют системы конструкторского и технологического проектирования. Первые из этих систем разделяют на системы конструкторского проектирования (*CAD, Computer Aided Design*) и системы инженерного анализа (*CAE, Computer Aided Engineering*). Проектирование технологических процессов выполняется с помощью систем *CAM (Computer Aided Manufacturing)*.

Совместное функционирование указанных САПР обеспечивают системы, получившие название систем управления проектными данными *PDM (Product Data Management)*. Управление жизненным циклом изделия в целом реализуют системы *PLM (Product Lifecycle Management)*.

Выделяют следующие основные составляющие САПР (говорят «обеспечение»):

- программное обеспечение;
- информационное обеспечение;
- методическое обеспечение;
- математическое обеспечение;
- лингвистическое обеспечение;
- техническое обеспечение;
- организационное обеспечение.

Программное обеспечение САПР представляет собой совокупность всех программ и эксплуатационной документации к ним, которые необходимы для выполнения автоматизированного проектирования. Программное обеспечение подразделяют на общесистемное и специальное (прикладное). Общесистемное программное обеспечение предназначено для организации функционирования технических средств САПР и представлено операционными системами. Специальное программное обеспечение представляет собой реализацию методов и алгоритмов (математического обеспечения) для выполнения проектных процедур.

Основу информационного обеспечения САПР составляют данные, которые используют конструкторы в процессе проектирования для выработки проектных решений. Основной формой хранения этих данных в САПР являются базы данных, управляемые соответствующими системами управления базами данных (СУБД), которые представляют собой одну из основных компонент общесистемного программного обеспечения САПР.

Методическое обеспечение САПР образуют входящие в её состав документы, которые регламентируют эксплуатацию этой САПР, а также нормативы, стандарты и другие руководящие документы, регламентирующие процесс и объект проектирования.

Математическое обеспечение САПР – это методы и алгоритмы, которые реализованы в программном обеспечении САПР. Выделяют инвариантное математическое обеспечение САПР (методы и алгоритмы численного решения алгебраических и дифференциальных уравнений, экстремальных задач и т.д.), а также специальное математическое обеспечение, предназначенное для автоматизации основных проектных процедур.

Основу лингвистического обеспечения САПР составляют специальные языковые средства (языки проектирования), предназначенные для описания процедур автоматизированного проектирования и проектных решений.

Техническое обеспечение САПР включает в себя используемые системами автоматизированного проектирования ЭВМ, мониторы, графопостроители и другие технические устройства.

Организационное обеспечение САПР устанавливает организационную структуру службы САПР предприятия, задачи и функции этой службы, а также связанных с ней подразделений предприятия. Служба САПР предприятия включает в себя структуру, обеспечивающую обучение его сотрудников использованию эксплуатируемых САПР.

4.2. Знаковые события в истории САПР

Принято считать, что развитие САПР началось в 50-е годы прошлого века с создания станков с числовым программным управлением (ЧПУ). В 1952 году в Массачусетском технологическом университете (США) был создан первый фрезерный станок с ЧПУ, в 1957 году – первое коммерческое программное обеспечение для разработки управляющих программ для этого станка. В то время под САПР понимали просто использование ЭВМ в целях проектирования. Использование ЭВМ в проектировании имело место и ранее, до того, как было сформулировано понятие САПР. Например, еще до появления термина САПР в проектировании использовались программы для расчетов методом конечных элементов, а также программы для автоматизированного проектирования электронных схем и устройств.

В 1960-е годы появились системы компьютерной графики и системы автоматизации черчения. В 1963 г. Айван Сазерлэнд (*Ivan Sutherland*), работающий в том же Массачусетском технологическом университете, создал программу *SKETCHPAD*, которая считается первой САПР. В 1965 г. ведущие машиностроительные корпорации США, в частности, Локхед (*Lockheed*), разрабатывают первые коммерческие *CAD/CAM* системы, а также системы анализа методом конечных элементов. В эти же годы создаются первые софтверные компании, ориентированные на разработку САПР. Из этих компаний выросли

современные известнейшие на рынке САПР компании *Parametric Technology Corporation* и *Siemens PLM Software (SPLMS)*.

В эти же годы начали создаваться отечественные САПР, ориентированные на проектирование электронных устройств и систем. Это связано с тем, что именно в электронике в то время быстро росла сложность проектных задач, а работающие в этой отрасли специалисты были в наибольшей мере готовы к восприятию и применению компьютерных технологий. Первая отечественная программа анализа электронных схем ПАЭС (САЕ-система) была создана в МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1965 г. ПАЭС включала в себя математические модели транзисторов, диодов, трансформаторов. В программе был реализован оригинальный метод формирования математических моделей электронных схем с учетом разреженности матриц коэффициентов. Позднее разработанные технологии анализа электронных схем были распространены на моделирование объектов механической и смешанной физической природы.

70-е годы прошлого века ознаменовались появлением первых систем трехмерного проектирования (3D-систем). В эти годы были предложены быстрые алгоритмы генерации кривых и поверхностей заданной формы, французской авиастроительной компанией (в настоящее время – компания *Dassault Aviation*) создана система трехмерного проектирования *CATIA*. В настоящее время эта система представляет собой одну из наиболее мощных САПР, которая широко используется ведущими мировыми предприятиями авиакосмической и автомобильной промышленности.

В 1980-е годы появились первые системы, так называемого, твердотельного моделирования, а также первые программы автоматизации черчения, функционирующие на персональных компьютерах. В 1980 г. создается первая в мире система твердотельного моделирования *Unigraphics*. В настоящее время развитие этой системы (система *NX*) представляет собой одну из наиболее известных «тяжелых» САПР, разработку, продажу и сопровождение которой осуществляет немецкий концерн *Siemens*. В 1982 г. создается компания *Autodesk* и выпускает свой продукт *AutoCAD* – первую в мире систему для автоматизации черчения, функционирующую на персональной ЭВМ. По некоторым данным эта система до настоящего времени остается самой распространенной САПР в мире. В 1985г. С.П. Гейзберг, эмигрировавший из СССР профессор Ленинградского университета, создает компанию *PTC (Parametric Technology Corporation)*. Два года спустя компания выпускает на рынок продукт *Pro/Engineer* – первую в мире систему параметрического проектирования на основе, так называемых, конструктивных элементов. В 1989 г. создается первая российская компания АСКОН, специализирующаяся на разработке САПР. Про-

дукт этой компании КОМПАС в настоящее время является наиболее известной отечественной полнофункциональной САПР.

В 1990-е годы примечательны созданием САПР разного уровня на платформе *Windows*. В 1992 г. выпускники МГТУ «СТАНКИН» создали компанию Топ Системы, которая занимается разработкой семейства САПР *T-FLEX*. В 1993 г. основана компания *Solid Works*. Одноименная САПР этой компании сегодня является одной из самых популярных в мире систем твердотельного моделирования. Компания *Solid Works* в настоящее время поглощена компанией *Dassault Systems*. В 1996 г. компания *Intergraph* выпустила трехмерную САПР *Solid Edge*, функционирующую под управлением операционной системы *Windows NT*. В настоящее время права на данную систему принадлежат компании *SPLMS*. В 1999 г. компания *AutoCAD* представила на рынке трехмерную САПР *Inventor*.

4.3. Характеристика современного состояния САПР

В 2000-е годы бурно развиваются системы для управления жизненным циклом изделий *PLM*, число установленных в мире рабочих мест САПР достигло 5 миллионов, самими популярными становятся семейства систем *Pro/ENGINEER*, *CATIA*, *NX*, *AutoCAD*, *Mechanical Desktop*, *Inventor*, *Solid Works*, *Solid Edge*.

В настоящее время общепризнанным фактом является невозможность конкурентного изготовления таких сложных наукоемких изделий, как ракеты, самолеты, корабли, подводные лодки, танки, небоскребы, без применения САПР. Современные САПР представляют собой интегрированные программные комплексы, обеспечивающие единую поддержку всего цикла разработки изделий, начиная с эскизного проектирования и заканчивая технологической подготовкой производства, испытаниями и сопровождением. Важно, что САПР в настоящее время не только дают возможность сократить сроки внедрения новых изделий, но и позволяют повысить качество и надежность выпускаемой продукции, повышая, тем самым, ее конкурентоспособность.

Рынок САПР в настоящее время разделен на следующие сегменты:

- тяжелые системы;
- системы среднего класса;
- легкие системы;
- персональные системы.

Тяжелые системы представляют собой полнофункциональные системы автоматизации проектно-конструкторской и технологической подготовки производства, реализующие черчение, двумерное и трехмерное геометрическое, твердотельное и поверхностное моделирование. Данные системы поддерживают такие технологии автоматизирован-

ного проектирования, как поэлементное проектирование и проектирование с комплексной увязкой параметров; включают в себя подсистемы *CAE*, средства подготовки программ для станков с ЧПУ и так далее; позволяют создавать очень сложные и большие сборки, состоящие из десятков тысяч деталей. Тяжелые системы интегрированы с *PDM* и *PLM* системами и, таким образом, способны охватить предприятие в целом, а также поставщиков и партнеров; поддерживают работу с данными, поступающими из других *CAD/CAM/CAE* систем.

Системы среднего класса включают в себя многие компоненты тяжелых САПР, за исключением средств моделирования сложных поверхностей, встроенных *CAE*-подсистем, *CAM*-подсистем. Системы данного класса поддерживают сборки, включающие от сотни до нескольких тысяч деталей.

Легкие системы предназначены, прежде всего, для черчения и двумерного и трехмерного геометрического каркасного моделирования. С помощью таких систем можно создавать небольшие сборки и отдельные детали.

Персональные системы включают в себя только базовые средства черчения и двумерного/трехмерного геометрического каркасного моделирования. Такие системы, как правило, не способны поддерживать создание сборок.

В настоящее время на рынке имеется всего три тяжелых САПР: *NX* компании *Siemens PLM Software*; *CATIA (Computer Aided Three-dimensional Interactive Application)* французской фирмы *Dassault Systemes*; *Pro/Engineer* компании *PTC (Parametric Technology Corporation)*. Указанные компании являются безусловными лидерами в области САПР, на продукты этих компаний приходится львиная доля объема рынка в денежном выражении.

4.4. Актуальные задачи и проблемные ситуации в области разработки САПР

Особенностью современного производства является очень высокий уровень кооперации. Так, например, автомобильные компании работают с большим числом партнеров, организованных в многоуровневую сеть. В этой сети поставщики первого уровня разрабатывают и производят целые автомобильные подсистемы, а поставщики третьего и четвертого уровней выпускают отдельные компоненты. Такая структура разработки и производства современных сложных изделий приводит к тому, что в создании автомобиля, например, участвует целый ряд компаний, применяющих различные САПР. Из-за этого острой современной проблемой автоматизированного проектирования является проблема обмена проектными данными, созданными в разных системах.

В авиакосмической, оборонной, строительной и некоторых других отраслях производства возникает следующая проблема. Изделия этих отраслей обычно служат десятки лет (до 60 – 70 лет). Производители этих изделий должны поддерживать их функционирование на протяжении всего этого срока, снабжая, в частности, запасными частями. В результате оказывается, что производители не могут поменять САПР, которые они использовали при проектировании таких долгоживущих изделий. Данное обстоятельство делаем еще более актуальной проблему обмена проектными данными.

Еще одной особенностью современного производства является ориентация на производство не одного изделия, а целой гаммы изделий, ориентированных на различных потребителей. Детали и узлы изделия в такой гамме сильно унифицированы. Поэтому при автоматизированном проектировании изделий этого класса возникает проблема управления и синхронизации большого числа различных вариантов и версий проекта.

Каждая из ключевых отраслей промышленности предъявляет особые требования к тяжелым САПР. Для их удовлетворения компаниям-разработчикам САПР приходится предусматривать в своих системах специализированные средства. В этой же связи крупные производители могут сами разрабатывать приложения к этим системам или даже свои специализированные САПР. Например, не все автомобильные предприятия устраивают функции моделирования сложных поверхностей, имеющиеся в тяжелых САПР. Поэтому *Ford* использует свою систему *PDGS*, а *Toyota* - *Caelum*. Самостоятельная разработка предприятиями приложений к современным САПР (особенно, тяжелым) упирается в проблему недостатка высококвалифицированных специалистов, способных вести такие разработки. Кроме того, создание таких приложений требует значительных денежных средств и времени.

Значительные стимулы для развития САПР создают «облачные» вычисления, которые предполагают удаленную работу с данными, размещенными на удаленных серверах, с помощью различных устройств, имеющих выход в Интернет. Здесь возможны два варианта. В первом случае в «облако» переносится все программное обеспечение САПР. Во втором случае у конструктора остается графическая рабочая станция с установленной САПР. В ситуациях, когда необходимы большие вычислительные ресурсы, например, при проведении прочностных расчетов, он получает с этой станции доступ к соответствующим «облачным» сервисам.

В развитии САПР имеет место еще тенденция перехода на другие операционные системы, *Linux*, например. В связи с «облачными» вычислениями прогнозируется уменьшение рыночной доли персональных компьютеров, поскольку при этом появляется возможность решать значительное число конструкторских задач на планшетных ЭВМ. В ито-

ге разработчикам САПР придется разрабатывать свои решения, функционирующие, например, под управлением *Google Chrome OS*.

Значительные изменения в настоящее время происходят в САПР также в связи с изменениями в аппаратном обеспечении. Так отчетлива тенденция использования архитектурных решений, отличных от классической архитектуры *Intel*. Например, перспективной представляется архитектура *ARM*. Еще более сильные изменения в САПР происходят в связи с широким использованием в практике автоматизированного проектирования параллельных вычислительных систем. В этой связи современные САЕ САПР оснащают средствами, позволяющими производить вычисления большого объема на параллельных ЭВМ, имеющих общую память (мэйнфреймы) и распределенную память (кластерные системы), а также на графических процессорных устройствах.

Отметим, наконец, тенденцию использования в САПР мобильных устройств. В настоящее время многие сотрудники являются мобильными - работают на выезде, перемещаются по стране, трудятся дома. В ответ на этот запрос жизни, уже появились такие мобильные платформы, как *IOS Apple* и *Android Google*, а также некоторое число САПР-приложений под них.

4.5. Примеры научных и инженерных решений в области разработки и применения САПР

Геометрическое моделирование. Исторически первым языком описания инженерных моделей был язык чертежей. Поэтому первые системы автоматизации труда инженеров были предназначены для упрощения и ускорения создания чертежей. Системы такого рода существуют и в настоящее время (примером является широко известная система *AutoCAD*).

Появление трехмерной компьютерной графики позволило выполнять реалистичное изображение трехмерных объектов на двумерном экране монитора, вращать эти объекты с помощью «мыши» в воображаемом трехмерном пространстве.

В результате у инженеров появилась возможность работать напрямую с трехмерной моделью объекта проектирования (3D-моделью), а не с двумерными его чертежами (рисунок 4.1).

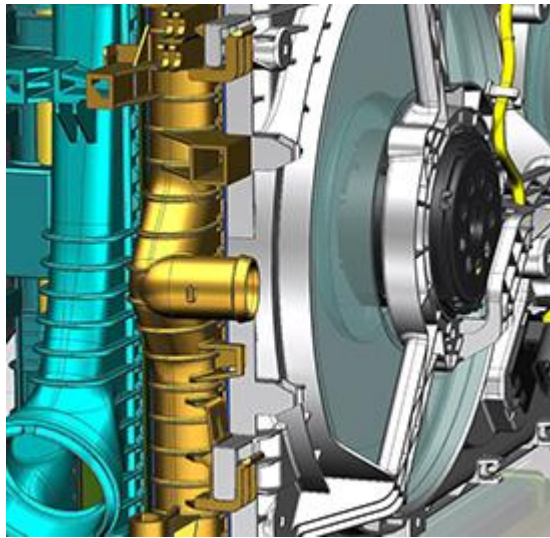


Рисунок 4.1 – Пример 3D-модели объекта проектирования
(<https://www.plm.automation.siemens.com/ru>)

Различают следующие основные виды геометрического моделирования: каркасное; поверхностное; твердотельное.

При каркасном моделировании модель строится из ограниченного набора графических примитивов – отрезки, дуги, конические кривые и т.д. Каркасная модель представляет собой лишь каркас (скелет) детали, на основании которого в общем случае невозможно однозначно восстановить саму деталь.

Поверхностное моделирование позволяет точно описать поверхность детали. Данный вид моделирования имеет особенно большое значение при проектировании изделий из листового материала (детали кузова автомобиля, например).

Твердотельное моделирование предполагает описание объекта моделирования как твердого объемного тела. При этом используется несколько методов: декомпозиционный, конструктивный, граничный.

В современных САПР, поддерживающих твердотельное моделирование, используется парадигма постепенного добавления или вычитания базовых конструктивных тел. Типовые инструменты для получения базовых тел реализуют выдавливание заданного контура, вращение этого контура вокруг заданной оси, выдавливание контура вдоль заданной кривой, построение фасок и скруглений, построение уклонов, создание различного типа отверстий и так далее.

Параметрическое моделирование. При параметрическом проектировании конструктор создаёт математическую модель объекта проектирования, состоящего из деталей, имеющих параметры. При изменении конструктором этих параметров происходят изменения конфигурации детали, взаимные перемещения деталей в сборке и т. п.

История параметрического моделирования берет свое начало в 1989 году, когда на рынке появились первые САПР с возможностью параметризации. Параметризация двумерных чертежей обычно доступна в САД-системах среднего и тяжёлого классов. Трёхмерное параметрическое моделирование является гораздо более эффективным (но и более сложным) инструментом по сравнению с двумерным параметрическим моделированием. В современных САПР среднего и тяжёлого классов параметрическое описание объекта проектирования является основой для всего процесса проектирования.

Известны три следующих основных способов параметризации – табличная; иерархическая; вариационная (размерная).

Суть табличной параметризации заключается в предварительном формировании таблицы параметров типовых деталей и создании нового экземпляра детали путём выбора из этой таблицы. Возможности табличной параметризации весьма ограничены, но эта параметризация широко применяется во всех параметрических САПР, поскольку позволяет значительно упростить и ускорить применение в процессе проектирования стандартных и типовых деталей.

Иерархическая параметризация основана на том, что в ходе построения модели в памяти ЭВМ сохраняется вся последовательность построения. Данный тип параметризации поддерживают все современные САПР, использующие трёхмерное твердотельное параметрическое моделирование.

Вариационная (размерная) параметризация основана на наложении пользователем ограничений на размеры объекта проектирования в виде системы уравнений, которая определяет зависимости между параметрами. Данный тип параметризации позволяет легко модифицировать трёхмерную модель.

Прямая и обратная задачи кинематики механизмов. Анализ кинематики механизмов является важной составной частью современных САПР. Прямая задача кинематики заключается в определении положений каждой детали (говорят, звена) механизма в каждый момент времени в зависимости от заданного закона движения одного или нескольких ведущих звеньев. Обратная задача кинематики состоит в вычислении положений ведущих звеньев механизма, которые обеспечивают заданное положение ведомых звеньев.

Положение каждого звена в трёхмерном пространстве в общем случае описывается шестью или более величинами. Допустимые значения этих величин для всех звеньев механизма образуют так называемое конфигурационное пространство механизма. Движение механизма в его конфигурационном пространстве описывают обыкновенные дифференциальные уравнения (ОДУ).

Подсистема САПР, которая реализует анализ кинематики механизма, решает следующие основные задачи: синтез по трехмерной математической модели механизма системы ОДУ, описывающей кинематику этого механизма; интегрирование полученной системы ОДУ. Проблема состоит в том, что данная система ОДУ может иметь очень высокую размерность и быть жесткой (когда в собственном движении системы присутствуют медленно и быстроменяющиеся составляющие). Поэтому в САПР для интегрирования указанных систем ОДУ приходится использовать специальные методы.

Задача анализа динамики механизмов. Основной задачей анализа динамики механизма является определение законов движения звеньев механизма под действием заданных внешних сил. Аналогично предыдущей задаче, подсистема САПР, реализующая анализ динамики механизма, решает задачу синтеза модели механизма в виде системы ОДУ, а также задачу интегрирование этой системы. В общем случае, система ОДУ имеет высокую размерность и является жесткой.

Задача параметрической оптимизации механизмов. Современные развитые САПР поддерживают однокритериальную и многокритериальную параметрическую оптимизацию спроектированных механизмов. При этом пользователь указывает варьируемые параметры механизма, допустимые диапазоны их изменения, а также назначает критерий или критерии оптимальности. На этой основе САПР осуществляет поиск наилучшего решения.

Сложность задачи заключается в высокой вычислительной сложности критериев оптимальности, их многоэкстремальности, большом числе ограничений. В этих условиях для обеспечения решения задачи за приемлемое время приходится использовать так называемые метамоделли критериальных функций, в качестве которых широко используются искусственные нейронные сети.

Конечно-элементный анализ. Конечно-элементный анализ применяют в САПР для решения задач механики деформируемых твердых тел, теплообмена, гидро- и газодинамики, электро- и магнитостатики и ряда других задач.

Метод конечных элементов (КЭ) используется для приближенного решения дифференциальных уравнений в частных производных, к которым сводятся указанные задачи автоматизированного проектирования.

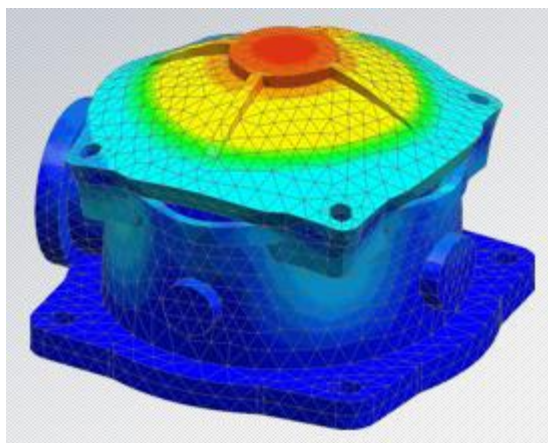


Рисунок 4.2 – Пример конечно-элементной сетки
(<https://www.plm.automation.siemens.com/ru>)

Обычно используют несколько простых типов КЭ в виде симплексов. Одна из основных задач подсистемы САПР, реализующей конечно-элементный анализ, стоит в покрытии исследуемого объекта конечными элементами. Решение задачи конечно-элементного анализа сводится, в конечном счете, к решению системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Поскольку в настоящее время используют конечно-элементные покрытия, содержащие сотни тысяч и миллионы КЭ, эти СЛАУ имеют высокую или сверхвысокую размерность.

5. Факультет «Робототехника и комплексная автоматизация» МГТУ им. Н.Э. Баумана

5.1. Общие сведения

Факультет «Робототехника и комплексная автоматизация» был создан в МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1987 году. Создание факультета было обусловлено развитием науки и техники, потребностями народного хозяйства - страна остро нуждалась в специалистах, способных вести разработку автоматизированных систем и робототехнических комплексов на современном уровне.

По замыслу организаторов факультета академиком Е.П. Попова, К.В. Фролова и профессоров И.П. Норенкова и В.Ф. Горнева предполагалась создать мощный учебный комплекс, который смог бы объединить все основные этапы подготовки специалистов в области робототехники и автоматизации производства, создать и апробировать сквозную программу подготовки инженеров системного направления, а силами общеуниверситетских кафедр факультета обеспечить совершенствование конструкторско-технологической подготовки студентов машиностроительного направления университета. Кафедры РК 4 ÷ РК-6, РК-9 и РК-10 факультета получили статус выпускающих, а кафедры РК-1 ÷ РК-3

совместно с кафедрами РК-5, РК-6 в стали решать последнюю задачу - совершенствовать конструкторско-технологическую подготовку студентов университета.

Факультет объединяет, на первый взгляд, разнородные выпускающие кафедры – от машиностроительной РК-4 до информационной РК-6, от фундаментальной РК-5 до мехатронных РК-9 и РК-10. Однако такой набор кафедр логичен и обусловлен сложностью текущих и перспективных инженерных задач в различных отраслях науки и техники. Предметом кафедры РК-4 «Подъемно-транспортные системы» являются вопросы комплексного проектирования логистической инфраструктуры предприятия – от компьютерного моделирования транспортных потоков до конструирования разнообразных видов подъемно-транспортного оборудования.

На кафедре РК-5 «Прикладная механика» решаются задачи многоаспектного анализа функционирования механических систем, как на основе компьютерного моделирования, так и на основе натуральных испытаний образцов материалов и элементов конструкций.

Основное направление деятельности кафедры РК-6 «Системы автоматизированного проектирования» - разработка программных средств автоматизации труда инженера, различные виды компьютерного моделирования, анализ и оптимизация проектных решений.

Работа кафедры РК-9 «Компьютерные системы автоматизации производства» связана с этими же вопросами, но применительно к задачам технологической подготовки производства, включая моделирование технологических и транспортных процессов.

Разработкой роботов и робототехнических комплексов различного назначения, интеллектуальных систем управления сложными техническими объектами и системами занимается кафедра РК-10 «Робототехнические системы».

Специалисты, которых готовит факультет РК, востребованы, по сути, во всех отраслях промышленности. Выпускники факультета находят работу на государственных предприятиях, в частных компаниях (в том числе филиалах зарубежных корпораций), в ведущих научно-исследовательских учреждениях России.

Программа обучения студентов факультета предполагает получение ими фундаментальной математической и общетехнической подготовки, глубокое овладение новейшими компьютерными технологиями, умение строить математические модели объектов проектирования, навыки конструирования, знание современных технологий и материалов. Выпускники факультета призваны решать задачи, связанные с комплексной автоматизацией всех этапов жизненного цикла продукции.

Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, ведущиеся на кафедрах факультета и в подразделениях научно-учебного комплекса «Робототехника и

комплексная автоматизация» (Научно-учебный центр «Робототехника» и Научно-исследовательский институт автоматизации производственных процессов), направлены на решение сложных научно-технических задач, актуальных для современных промышленных предприятий, крупных исследовательских организаций и других заказчиков.

5.2. Кафедра РК6 «Системы автоматизированного проектирования»

Кафедра РК-6 «САПР» неформально является ведущей кафедрой по специальности «Системы автоматизированного проектирования» в России. При активном участии кафедры разработаны образовательные программы и Федеральные государственные образовательные стандарты по направлению «Информатика и вычислительная техника». Преподавателями кафедры написана основная учебная литература по САПР в нашей стране.

Кафедра образована в 1982 г. бессменным руководителем кафедры вплоть до 2012 г. Норенковым И.П. Основу кафедры составила группа ученых и преподавателей, занимавшихся под руководством Норенкова И.П. в МВТУ с начала 1960-х годов вопросами автоматизации проектирования. В 1987 г. в МГТУ осуществлен первый прием студентов по специальности «САПР», а в 1993 г. первые выпускники кафедры влились в число специалистов, занимающихся развитием и внедрением новых информационных технологий.

В настоящее время научная работа на кафедре ведется в следующих основных направлениях.

1) Математическое и программное обеспечение многоаспектного моделирования технических систем и устройств.

В 1980-е годы сотрудниками кафедры одними из первых в мире были разработаны основы теории многоаспектного (мультидисциплинарного) математического моделирования систем и созданы программы анализа технических устройств и систем ПА6 – ПА9.

Сегодня научной группой под руководством доцента В.Б. Маничева ведется разработка библиотеки программ *SADEL* для численного интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) и численного решения систем линейных алгебраических уравнений (ЛАУ), которая должна послужить основой математического ядра новой программы многоаспектного моделирования ПА10. Предполагается создание методов и программного обеспечения, обеспечивающих гарантированную достоверность решения систем ОДУ и АЛУ (рисунок 5.1).

Данная работа в настоящее время выполняется в рамках Государственного задания «Системы и технологии автоматизированного проектирования и информационной поддержки этапов жизненного цикла сложных изделий».

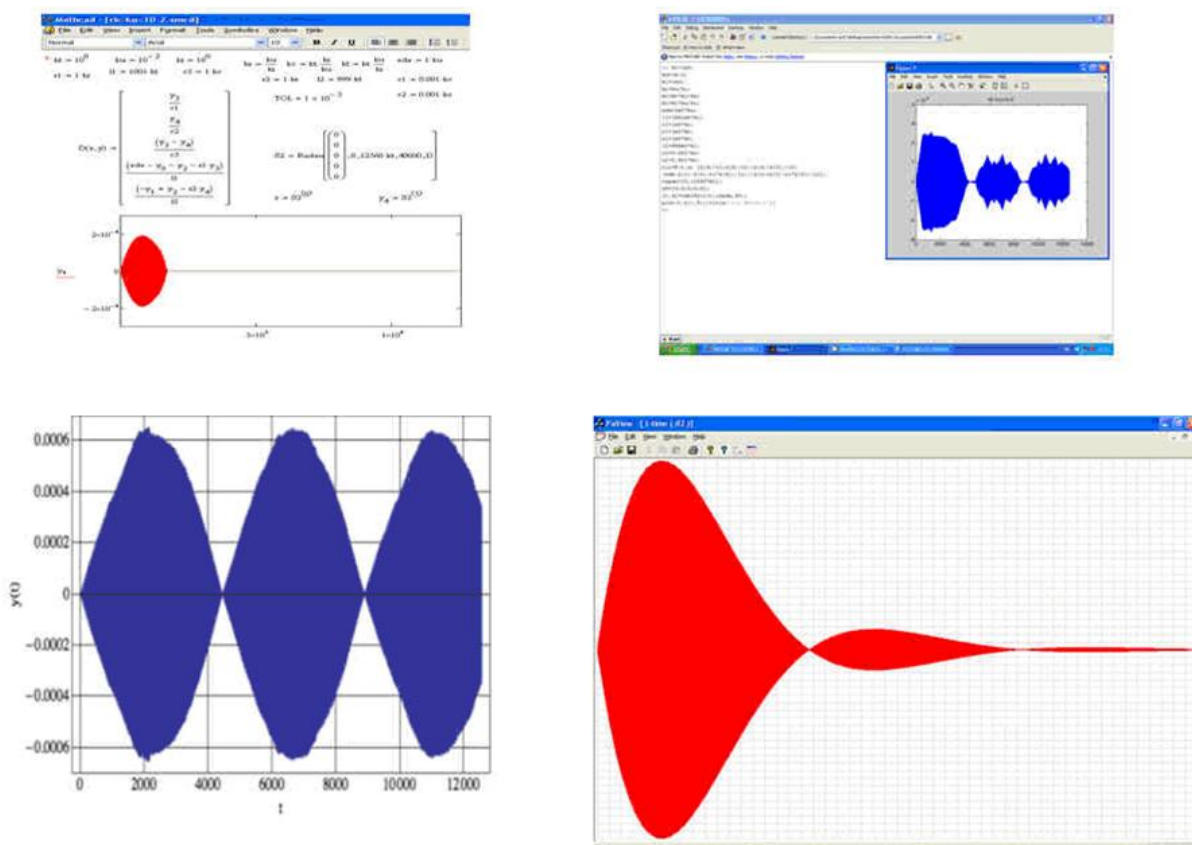


Рисунок 5.1 – Примеры некорректного моделирования динамической системы в известных программных системах *MATHCAD*, *MATLAB*, *NAG* и корректного моделирования в *SADEL*

2) Эволюционные методы структурного синтеза.

Структурный синтез является основой проектирования в технике. Однако из-за трудностей формализации в большинстве случаев задачи структурного синтеза решаются неавтоматизированными методами. Основным подходом к формализации таких задач является применение систем искусственного интеллекта.

В рамках этого подхода на кафедре разрабатываются методы дискретной оптимизации и принятия проектных решений на основе эволюционных и поведенческих алгоритмов. Силами научной группы профессора И.П. Норенкова ведется разработка в области генетических алгоритмов, а под руководством профессора А.П. Карпенко – в области алгоритмов роя частиц, колонии муравьев, роя пчел и т.д.

В настоящее время исследования в данном направлении проводятся совместно с Башкирским государственным университетом, Институтом нефтехимии и катализа РАН и Вычислительным Центром РАН в рамках проекта Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) «Структурная и параметрическая идентификация кинетических моделей реакций нейтрального металлокомплексного катализа» (рисунок 5.2).

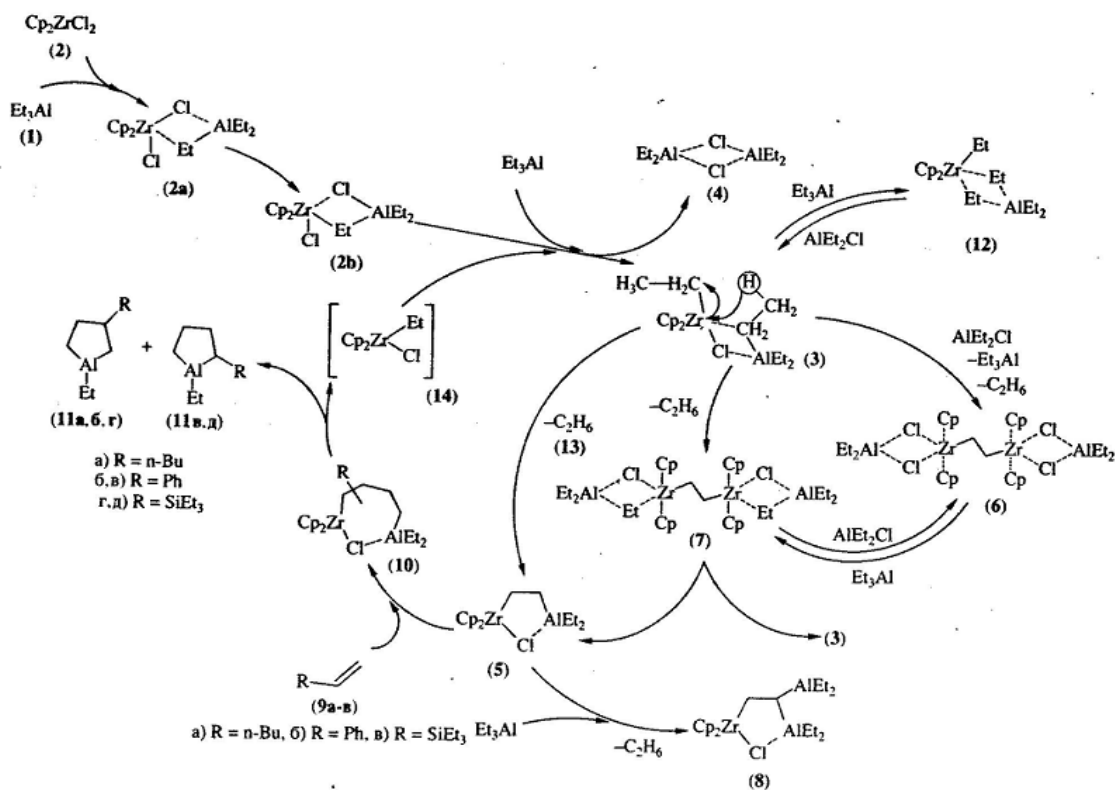


Рисунок 5.2 - Обобщенная схема подлежащей идентификации реакции циклоалюминирования олефинов в присутствии Cp_2ZrCl_2

3) Интеллектуальные методы поддержки принятия решений.

Другое направление интеллектуализации систем проектирования, развиваемое на кафедре группой профессора И.П. Норенкова, связано с исследованиями онтологического подхода к решению задач поддержки принятия решений. Рассматриваются приложения подхода к задачам синтеза многостадийных расписаний взаимосвязанных работ с альтернативными ресурсами и к задачам информационного поиска. Предполагается создание системы поддержки принятия решений на основе кластеризации предметных онтологий и ее применение для задач аннотирования, классификации и кластеризации документов в образовательной и проектной сферах.

В настоящее время данные исследования поддерживаются проектом РФФИ «Управление знаниями, извлекаемыми из текстовых документов, на основе кластеризации онтологий».

4) Многокритериальная оптимизация.

Разработка интерактивных методов многокритериальной оптимизации ведется кафедрой РК-6 совместно с университетом Тренто (Италия) под руководством профессоров А.П. Карпенко, Роберто Баттити (Roberto Battiti) и Андреа Пассерини (Andrea Passerini). Разрабатываемые методы и программное обеспечение использует нейросетевые, нечеткие и нейронечеткие технологии, аппарат машины опорных векторов, а также генетические и

эволюционные алгоритмы приближенного построения множества Парето в задаче многокритериальной оптимизации.

В качестве приложений рассматриваются задачи проектирования механических конструкций, задачи управления процессами медикаментозного воздействия в лечебных целях и т.д. (рисунок 5.3).

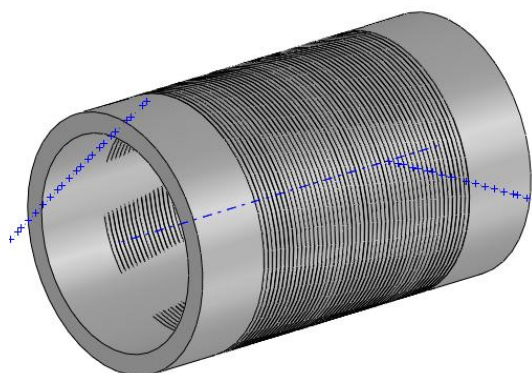


Рисунок 5.3 – К задаче трехкритериальной оптимизации геометрии щелевого фильтра (задача решается совместно с кафедрой МТ-2 МГТУ им. Н.Э. Баумана)

5) Компьютерная графика и 3D моделирование.

Математическое и программное обеспечение геометрического 3D моделирования является основой современных САПР в машиностроении.

На кафедре под руководством доцентов В.А. Мартынюка, Д.М. Жука и В.Б. Маничева разрабатываются методики применения 3D систем автоматизированного проектирования верхнего и среднего уровней для конструирования изделий, в том числе совместно с такими предприятиями авиапрома, как корпорация «Иркут».

Исследования доцента Д.М. Жука направлены на разработку математических моделей и методов 3D моделирования для ряда медицинских приложений, таких как проектирование имплантатов, визуализация и поддержка принятия решений в процессе хирургических операций (рисунок 5.4).

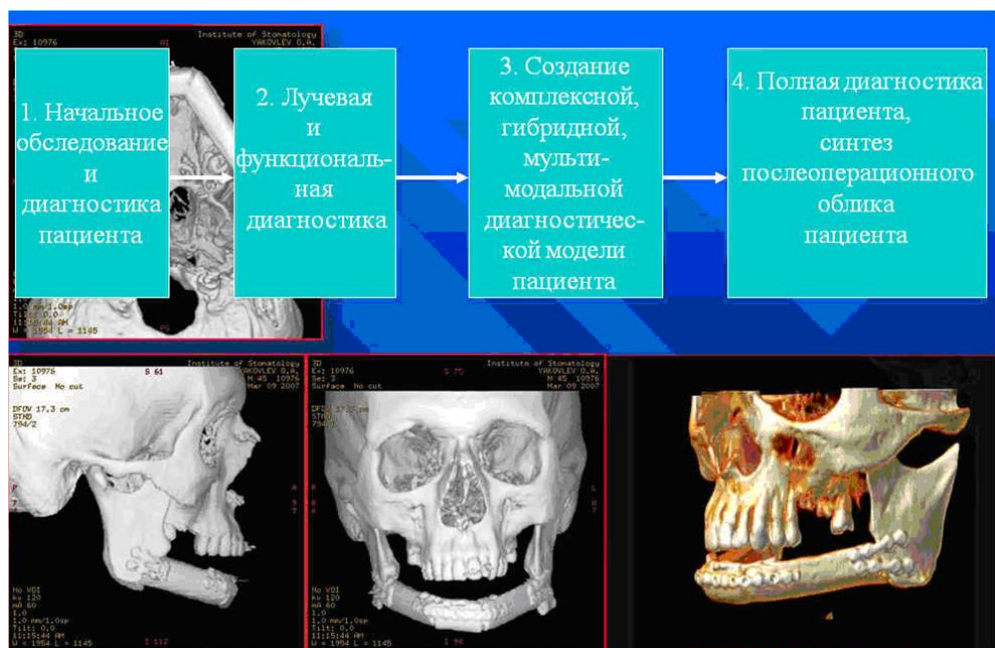


Рисунок 5 – К диагностике челюстно-лицевой патологии

б) Автоматизированные обучающие системы.

Под руководством профессора Норенкова И.П. на кафедре разработана оригинальная методология синтеза электронных учебных пособий ТРЕК. Эта методология, аналогично известной модели *SCORM*, основана на сборке учебных пособий из отдельных предварительно созданных фрагментов.

Однако, в отличие от *SCORM*, в ТРЕК, благодаря использованию предметных онтологий, возможны автоматическое формирование пособий и семантический поиск информации, допустима взаимосвязанность фрагментов.

Методология ТРЕК реализована в первой версии автоматизированной обучающей системы БиГОР (рисунок 5.5).

Предполагается развитие БиГОР в направлении совместимости с моделями, созданными в *SCORM*, реализации алгоритмов оптимального синтеза индивидуальных траекторий обучения, расширение базы знаний системы и исследование ее применимости к задачам синтеза технической документации типа пояснительных записок проектов, интерактивных электронных технических руководств и др.



Рисунок 5.5 - Программная система БиГОР (главная экранная форма)

7) Системы технического зрения.

Поскольку робот функционирует в изменяющейся среде, он должен постоянно получать информацию об этой среде. Поэтому в системе управления роботом можно выделить две подсистемы - сенсорная и управляющая подсистемы.

Важнейшей компонентой сенсорной подсистемы робота является система технического зрения (можно сказать, глаза робота). Основная задача этой системы состоит в том, чтобы получить изображения объектов окружающей среды (обычно, с помощью телевизионной камеры) и распознать эти изображения (принято говорить, распознать образы). Последняя проблема является центральной для создания систем технического зрения. Из многих объектов, присутствующих на изображении, робот должен выделить различные классы объектов: те, которые ему необходимы для выполнения каких-то действий; представляющие опасность; незнакомые объекты и т.д. Другими словами, система технического зрения робота должна уметь выделять признаки объектов и классифицировать объекты по этим признакам.

На кафедре РК-6 под руководством Т.М. Волосатовой в течение длительного времени проводятся работы в области технического зрения и, в частности, в области распознавания образов.

Важной составляющей процесса распознавания образов является предобработка изображений – восстановление дефокусированных изображений, устранение смаза, сегментация, дилатация и т.д. Качество разработанных на кафедре алгоритмов дефокусировки изображений иллюстрирует рисунок 5.6.



а)

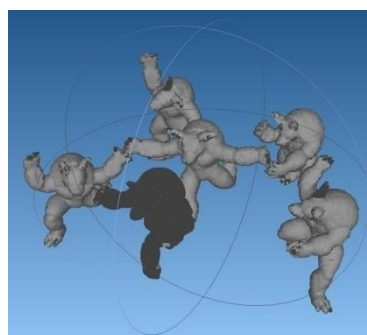
б)

Рисунок 5.6 – Пример восстановления дефокусированного изображения: а) восстановленное изображение; б) дефокусированное изображение

Пример распознавания объектов иллюстрирует рисунок 5.7.



а)



б)

Рисунок 5.7 – Пример распознавания: а) исходные изображения, подлежащие распознаванию; б) результат распознавания пяти схожих объектов

8) Построение множества достижимости манипуляционного робота.

Одной из основных задач, которые приходится решать в процессе синтеза манипулятора робота, является задача построения его области достижимости. Часто схват робота должен не только достичь заданной точки пространства, но достичь ее с заданными скоростью и ускорением. При решении этой задачи приходится использовать динамическую модель манипулятора, представляющую собой с математической точки зрения систему обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ). Таким образом, возникает задача построения области достижимости манипулятора в так называемом фазовом пространстве, то есть пространстве, которое определяется еще и осями координат, соответствующими скорости схвата и его ускорению.

На кафедре РК-6 развиваются методы построения множества достижимости динамического объекта, как в геометрическом пространстве, так и в расширенном фазовом пространстве. На рисунке 5.8 в качестве примера показана область достижимости одного из таких объектов в ситуации, когда в ней имеется два неподвижных сферических препятствия. Разными цветами на рисунке выделены дальняя (зеленый), ближняя (желтый) и боковая (красный) границы этой области.

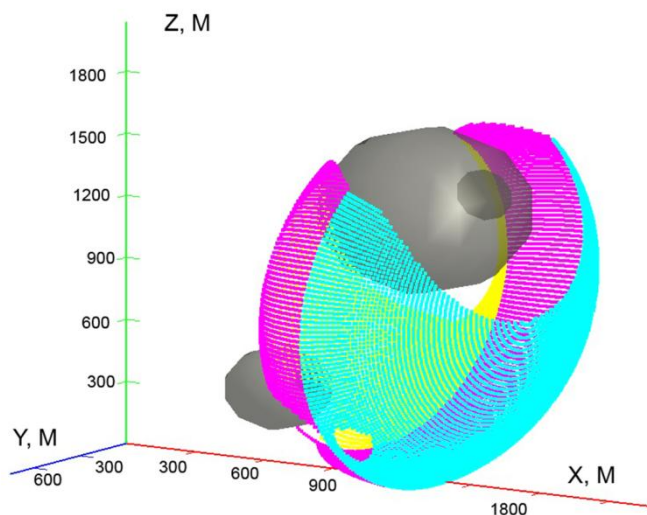


Рисунок 5.9 – Область достижимости динамического объекта: случай двух неподвижных сферических препятствий

При построении множества достижимости динамического объекта в фазовом пространстве становится острой проблема высокой вычислительной сложности модели этого объекта. С целью уменьшения этой сложности на кафедре РК-6 развивается подход на основе так называемых метамоделей, точнее говоря - подход на основе нейросетевой аппроксимации математической модели исследуемого динамического объекта.

Еще одним методом, который развивается на кафедре РК-6 с целью ускорения построения множества достижимости динамического объекта в фазовом пространстве, является метод на основе аппроксимации векторного поля системы ОДУ, описывающей этот объект.

Суть метода заключается в предварительной аппроксимации правых частей системы ОДУ, для чего используется локальная кусочно-постоянная и кусочно-линейная интерполяция, глобальная полиномиальная аппроксимация, а также аппроксимация с помощью искусственных нейронных сетей.

Ускорение вычислений при этом достигается за счет сокращения затрат на вычисление значений правых частей модельной системы ОДУ.

9) Планирование целевой конфигурации робота-манипулятора.

На кафедре РК-6 для планирования целевой конфигурации робота-манипулятора разработан алгоритм и соответствующее программное обеспечение, в которых данная задача сводится к многомерной задаче глобальной условной оптимизации.

На рисунке 5.10 показан результат использования этого алгоритма и программного обеспечения для планирования целевой конфигурации манипулятора, управляющего ориентацией антенны перспективной космической обсерватории «Миллимитрон».

Ставилась задача найти такую конфигурацию манипулятора, которая не меняет положение центра масс системы антенна – криоконтейнер (на рисунке выделен точкой).

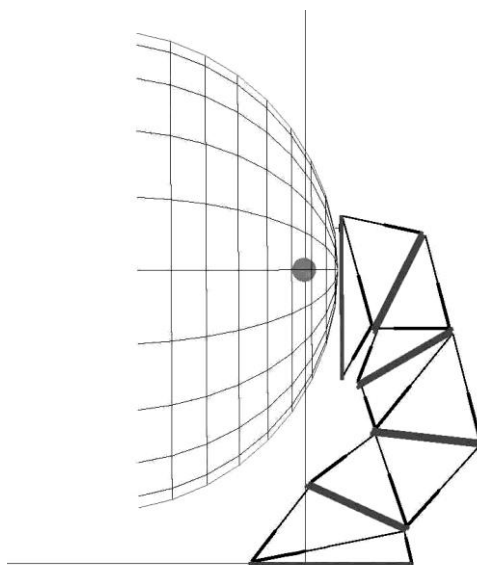


Рисунок 5.10 – Целевая конфигурация манипулятора, управляющего ориентацией антенны космической обсерватории «Миллимитрон»

Для решения задачи перевода манипулятора из его текущего в целевое положение на кафедре РК-6 выполнена модификация известного итерационного метода решения этой задачи, а также разработано соответствующее программное обеспечение.

Модификация заключается в том, что при таком переводе заданная точка схвата остается неподвижной. С помощью разработанных метода и программного обеспечения решена задача о переводе манипулятора, управляющего ориентацией антенны космической обсерватории «Миллимитрон», из текущего в целевое положение (рисунок 5.11).

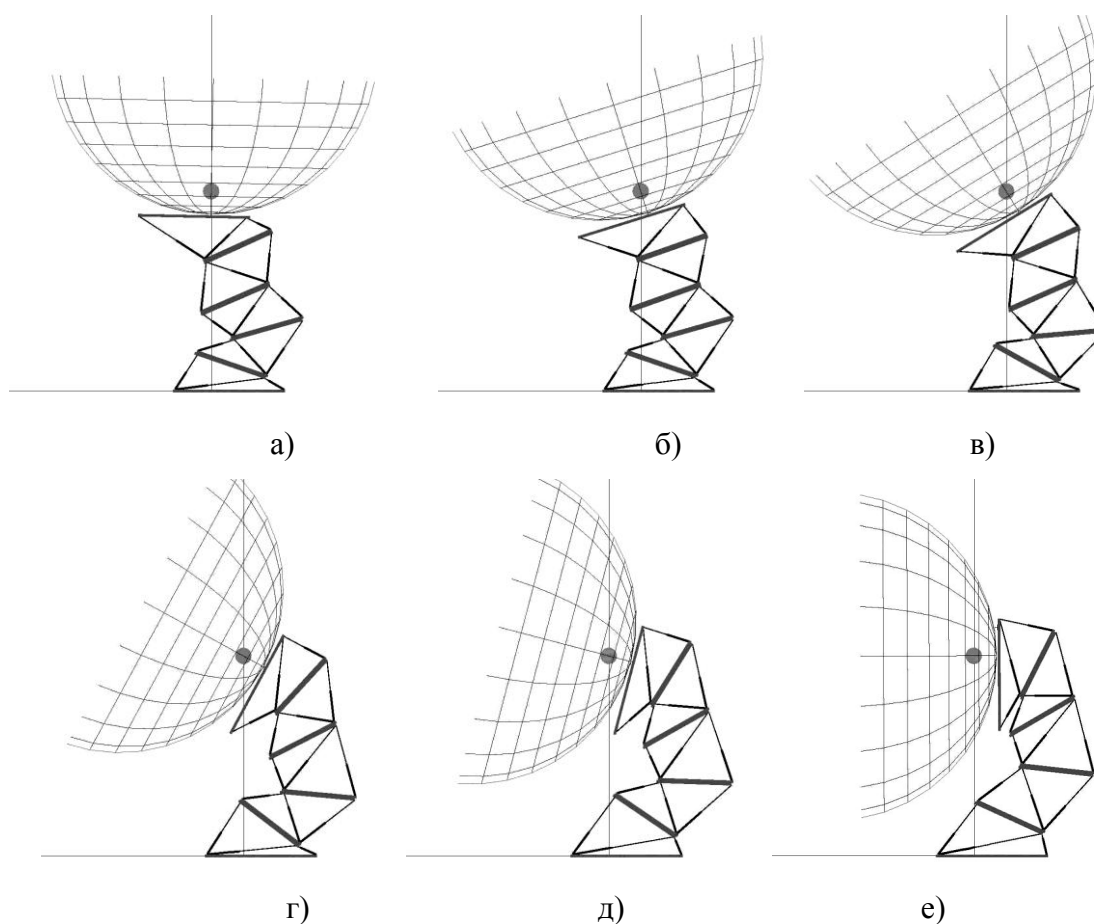


Рисунок 5.11 – Раскадровка процесса перевода манипулятора из его текущего положения (а) в целевое положение (е)

По результатам научно-исследовательских работ, проводимых на кафедре РК-6, защищены кандидатские диссертации Т.И. Булдаковой, С.Ф. Чермошенцевым, которые, как и С.Г. Мулярчик, впоследствии стали докторами технических наук, а также кандидатские диссертации А.Н. Божко, Ю.А. Евстифеева, П.А. Зиновьева, Д.Т. Мухлисуллиной, П.А. Сомова, В.Ю. Спицына, Н.Д. Регуша, В.Г. Федорука и других.

5.3. Примеры актуальных научно-исследовательских тем и практических разработок в области САПР

В п. 1.3 представлены некоторые актуальные задачи и проблемные ситуации в области разработки САПР. Эти задачи и проблемные ситуации порождают большое число актуальных научно-исследовательских тем и практических разработок в области САПР. Приведем несколько примеров.

1) Разработка «облачного» программного обеспечения САПР.

«Облачные» или рассеянные вычисления представляют собой технологию обработки данных, в которой компьютерные ресурсы и мощности предоставляются пользователю как Интернет-сервисы. Пользователь не должен заботиться об инфраструктуре, опе-

рационной системе и собственно программном обеспечении, к которому предоставляется доступ. «Облачная» обработка данных – это парадигма, в рамках которой информация постоянно хранится на серверах в Интернете и временно кэшируется на клиентской стороне.

Одной из основных проблем «облачных» вычислений является проблема неравномерности запросов ресурсов со стороны клиентов.

Следствием этого является неравномерность загрузки серверов, поддерживающих вычисления в облаках. Для решения этой проблемы используют серверную виртуализацию (часто, виртуализацию уровня операционной системы). При этом балансировка нагрузки осуществляется классическими программными средствами, но, главное - средствами распределения виртуальных серверов по реальным серверам.

Использование «облачных» вычислений в САПР требует решения следующих классов задач: адаптация известных методов автоматизированного проектирования для работы в «облаках»; разработка новых методов, ориентированных на «облачные» вычисления; отработка методики построения и развития достаточно мощных «облаков».

2) Переход на использование в САПР не традиционных операционных системы.

Эта задача требует разработки САПР-решений, функционирующих под управлением таких операционных систем, как *Linux*, *Google Chrome OS* и другие.

3) Параллельные вычисления в САПР.

Современные параллельные вычислительные системы характеризуются большим разнообразием архитектур – кластерные системы с распределенной памятью; мэйнфреймы, имеющие общую память; графические процессорные устройства и т.д.

Эффективное использование указанных вычислительных систем требует разработки методического, алгоритмического и программного обеспечения, обеспечивающего высокоэффективную реализацию типовых проектных процедур автоматизированного проектирования на этих системах.

4) Использование в САПР мобильных устройств.

Решение данной задачи требует разработки САПР-приложений, функционирующих на таких мобильных платформах, как *IOS Apple* и *Android Google*.

Заключение

Развитие робототехники требует решения широкого круга технических, технологических и научных проблем. В данной работе не затронуты многие из этих проблем. Так, практически за пределами обзора оказалась актуальная проблема разработки новых методов анализа и синтеза систем управления роями роботов, которые учитывали бы специфику этих объектов. Большие проблемы стоят на пути создания навигационно-

информационных систем роя роботов. Одной из наиболее острых проблем, которая возникает при проектировании мобильных роботов и их роев, является проблема сокращения затрат энергии на функционирование роботов. Другими словами, необходимо кардинально повысить к.п.д. основных их механизмов. К этой проблеме примыкает проблема разработки компактных и мощных источников энергии для роботов.

Прежде чем начать профессионально заниматься робототехникой вообще и роевой робототехникой, в частности, необходимо в пределах, по крайней мере, трех первых курсов ВУЗа освоить методы высшей математики, физики, электротехники, электроники, сопромата и кибернетики и так далее.

Литература

Научно-популярная

1. *Брага Н.С.* Робот – своими руками. М.: Издательство «НТ Пресс», 2007. 368 с.
2. *Предко М.* 123 эксперимента по робототехнике. М.: Издательство «НТ Пресс», 2007. 544 с.
3. *Предко М.* Создайте робота своими руками на PIC-микроконтроллере. Серия: В помощь радиолюбителю. М.: Издательство «ДМК Пресс», 2005. 401 с.
4. *Сворень Р.А.* Шаг за шагом. Электроника. Практическая энциклопедия юного радиолюбителя: Для старшего возраста. 3-е изд., доп. и испр. М.: Издательство «Детская литература», 1991. 461 с.
5. Каталог сайтов по робототехнике. URL: <http://robotics.ru/top20> (дата обращения: 20.11.2014 г.)

Специальная

1. *Белькович Е.С., Колесов Ю.Б., Сеническов Ю.Б.* Практическое моделирование динамических систем: Учеб. пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2002. 464 с.
2. *Берлинер Э.М., Таратынов О.В.* САПР в машиностроении. М.: ФОРУМ, 2012. 448 с.
3. *Булгаков А.Г., Воробьев В.А.* Промышленные роботы. Кинематика, динамика, контроль и управление. Серия: Библиотека инженера. М.: Издательство «Солон-Пресс», 2007. 488 с.
4. *Емельянов В.В., Курейчик В.В., Курейчик В.Н.* Теория и практика эволюционного моделирования. М: Физматлит, 2003. 432 с.
5. *Ли К.* Основы САПР (CAD/CAM/CAE). СПб.: Питер, 2004. 560 с.

6. *Лукинов А.П.* Проектирование мехатронных и робототехнических устройств. Серия: Учебники для вузов. Специальная литература. М.: Издательство «Лань», 2012. 607с.
7. *Норенков И.П.* Основы автоматизированного проектирования: Учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 336 с.
8. *Соболь И.М., Статников Р.Б.* Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Дрофа. 2006. 175 с.
9. *Ушаков Д.М.* Введение в математические основы САПР: курс лекций. М.: ДМК Пресс, 2011. 208 с.
10. *Черноруцкий И.Г.* Методы принятия решений. СПб.: БХВ-Петербург. 2005. 416с.
11. *Юревич Е.И.* Основы робототехники. 2-е изд. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 336 с.