

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ КОЛЕСНЫХ И ГУСЕНИЧНЫХ РОБОТОВ
В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА
«УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ»**

*Брянский государственный технический университет,
г. Брянск, kovalev@umlab.ru*

Рассматриваются основные алгоритмы и методы, используемые в программном комплексе «Универсальный механизм» для моделирования динамики роботов. Обсуждаются алгоритмы расчета контактных сил, особенности эффективных численных методов решения систем дифференциально-алгебраических уравнений, специальные приемы для повышения быстродействия. Рассматривается использование разработанного математического аппарата и его программной реализации для создания программного комплекса для тренировок операторов мобильных роботов для отработки ими навыков управления роботами при ликвидации аварийных ситуаций.

Введение

Компьютерное моделирование является эффективным методом анализа динамики таких сложных технических систем как роботы. Наиболее распространенным подходом к построению динамических моделей роботов является представление их системой абсолютно твердых тел, связанных шарнирами и силовыми элементами [1]. Данный подход использован в программном комплексе «Универсальный механизм» (ПК УМ) для автоматизации процессов формирования и анализа уравнений движения механических систем. Применение ПК УМ к моделированию динамики роботов рассматривается в [2-5, 8, 9]. ПК УМ разрабатывается в лаборатории вычислительной механики Брянского государственного технического университета (ВМ БГТУ), [6]. Одним из основных направлений деятельности лаборатории в последнее время является разработка программного обеспечения и компьютерных моделей для исследований динамики колесных и гусеничных роботов.

Моделирование в реальном времени является одним из основных требований применительно к программному комплексу для тренировок операторов мобильных роботов. Это означает, что расчет динамики должен выполняться быстрее реального времени, чтобы дать возможность отработать остальным компонентам программы. Отметим, что предполагается моделирование ситуаций, при которых могут быть задействовано несколько роботов.

Движение робота должно моделироваться с учетом возможных контактных взаимодействий между элементами конструкции, а также взаимодействий робота с объектами сцены. Посредством контактных взаимодействий моделируются перемещения объектов манипулятором робота, столкновение робота с препятствиями на сцене, качение колес робота по сложной поверхности и другие. Это требование существенно затрудняет решение задачи в режиме реального времени, так как расчет контактных сил является затратной операцией с точки зрения вычислительных ресурсов. Типичная модель робота в сцене содержит более ста пар тел, между которыми возможен контакт.

Высокая скорость расчетов достигается в результате комплексной оптимизации всех компонентов, начиная с оптимизации расчетной схемы робота, применения эффективных, с точки зрения производительности, математических моделей контактных сил, и заканчивая эффективными численными методами интегрирования уравнений движения.

Трехмерный контакт

Контактные взаимодействия – одна из центральных проблем моделирования виртуальной реальности и различных тренажеров, для которых физическая достоверность моделируемых процессов является определяющим фактором.

В ПК УМ реализован метод моделирования контактного взаимодействия между двумя произвольными выпуклыми многогранниками. Метод базируется на использовании податливого контакта и оперирует недеформируемыми трехмерными объектами с малым, относительно линейных размеров тел, внедрением в зоне контакта. Алгоритм состоит из двух основных частей. Во-первых, это геометрическая задача определения факта пересечения выпуклых многогранников (проблема, называемая в литературе как collision detection) и геометрических характеристик взаимопроникающих элементов. Во-вторых, расчет контактных сил по ранее рассчитанной геометрии взаимопроникновения тел. Геометрическая задача о столкновении тел решается с помощью обобщенного алгоритма трехмерного отсечения Сайруса-Бека [11]. Контактные силы рассчитываются на основе модели контакта типа «точка-плоскость» как сумма нормальной упруго-диссипативной силы и касательной силы сухого трения [12].

Для ускорения расчетов задача определения факта пересечения обычно разбивается на так называемые задачи дальнего и ближнего контакта. Расчет дальнего контакта это быстрый алгоритм, который выделяет пары тел, которые возможно находятся в контакте, для последующего, обычно гораздо более затратного с точки зрения вычислительных ресурсов, расчета ближнего контакта.

Реализованный алгоритм включает двухступенчатый дальний контакт. На первом шаге дальнего контакта каждое тело окружается сферой и тривиально проверяется факт пересечения таких сфер, рис. 1а. Обзор алгоритмов определения координат центров и радиусов таких ограничивающих сфер, включая результаты численных экспериментов (вычислительные затраты и радиус сфер для различных тестовых объектов), приведен в [13]. На втором шаге дальнего контакта пары тел, который прошли первый тест, окружаются ориентированными ограничивающими параллелепипедами (ООП, oriented bounding box) и выполняется проверка пересечения таких параллелепипедов, рис. 1б. Оптимальный алгоритм расчета пересечения для ООП изложен во многих работах, в частности, в [14].

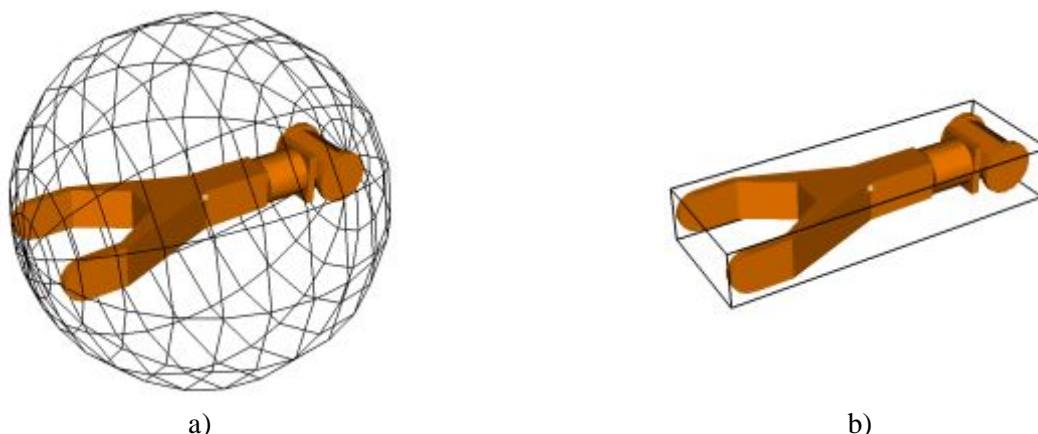


Рис 1. Ограничивающая сфера и параллелепипед

Пары тел, прошедшие оба теста дальнего контакта считаются потенциально входящими в контакт и подаются на вход процедуре расчета ближнего контакта.

Ближний контакт основан на использовании широко известного в компьютерной графике обобщенного алгоритма трехмерного отсечения Сайруса-Бека. Алгоритм оперирует с двумя выпуклыми многогранниками и как результат выдает ребра или отрезки ребер первого многогранника, которые находятся во втором и наоборот. Так, например, для случая, представленного на рис. 2а, алгоритм сформирует множество отрезков вершин $\{E_1, E_2, E_3\}$ Тела₁ и пустое множество вершин для Тела₂, а для случая рис. 2б множество $\{E_1\}$ для Тела₁ и $\{E_2\}$ для Тела₂.

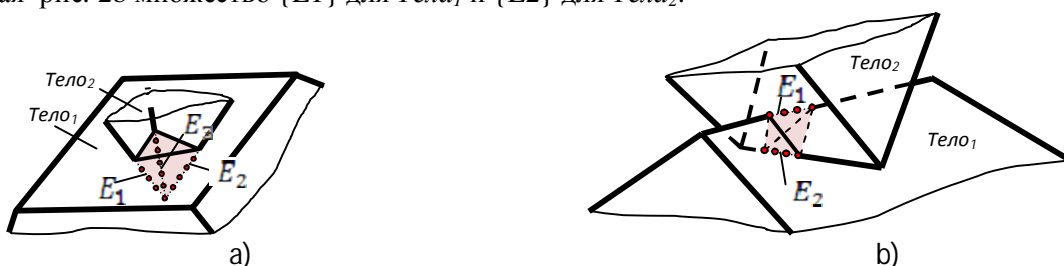


Рис 2. Контакт типа «вершина-грань» и «ребро-ребро»

После расчета дальнего и ближнего контакта необходимо рассчитать контактные силы между взаимодействующими телами. Рассмотрим пару многогранников. Алгоритм расставляет контактные точки на каждом ребре, которое проникает в соседний многогранник, см. рис. 3а. Шаг между соседними контактными точками является параметром рассматриваемой математической модели и может меняться в зависимости от линейных размеров многогранников.

Далее для каждой контактной точки определяется ближайшая грань на втором многограннике. В каждой точке контактная сила \vec{R} рассчитывается как суперпозиция упруго-диссипативной нормальной силы \vec{N} , зависящей от глубины и скорости внедрения, и силы сухого трения, лежащей в касательной плоскости, см. рис. 3б.

Представленный алгоритм хорошо справляется с двумя основными случаями контакта: «вершина-грань» и «ребро-ребро», см. рис. 2. Так как алгоритм Сайруса-Бека предназначен для работы с выпуклыми многогранниками, то и реализованный алгоритм расчета контактного взаимодействия применим

только для выпуклых многогранников. Однако известно, что любой невыпуклый многогранник может быть разбит на конечное число выпуклых. Такая операция называется выпуклой декомпозицией.

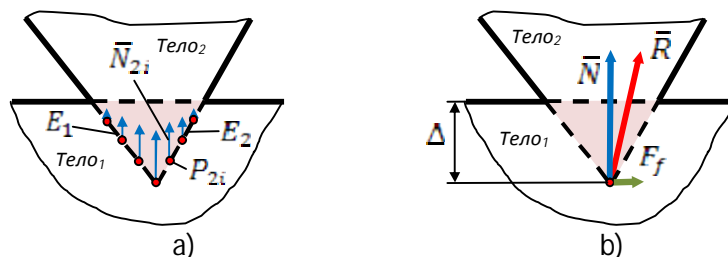


Рис 3. Контактные точки и контактные силы

На практике выпуклая декомпозиция и расчет контакта для невыпуклых тел хорошо работают только для умеренного количества полигонов и крайне замедляются для очень сложных невыпуклых многогранников или большого количества выпуклых.

Рассмотренный алгоритм представляется удачным компромиссом между точностью решения контактной задачи и требуемыми вычислительными ресурсами для ее решения. Вместе с тем алгоритм базируется на широко применяемой в динамике систем тел модели податливого контакта и обеспечивает необходимое быстродействие и хорошую реалистичность в задачах моделирования динамики роботов в реальном времени.

Моделирование систем управления

Важными компонентами робототехнических систем являются системы управления. Современные тенденции в робототехнике направлены на усложнение систем управления, разработку и внедрение все более и более сложных, в том числе адаптивных и интеллектуальных, систем управления.

Важным и полезным промежуточным этапом между разработкой такой системы управления и внедрением ее в реальную робототехническую систему может являться совместное компьютерное моделирование системы управления и механической части робота. Такие исследования, в частности, были проведены в работах [3-5]. У такого подхода есть важное преимущество – возможность (1) отказаться от допущений, использованных при разработке системы управления (например, об отсутствии проскальзывания колес робота относительно земли и т.д.), (2) отладить систему управления в условиях функционирования, близких к реальным и (3) рассмотреть как базовые сценарии функционирования робота, так и исключительные ситуации.

Кроме того, при проведении натурных экспериментов не всегда возможно измерение всех интересующих динамических показателей, приходится преодолевать проблемы, связанные с погрешностями измерительных приборов, повторяемостью и воспроизводимостью результатов. Испытания роботов на предельных или нештатных режимах, как правило, дороги в силу дороговизны образцов или оборудования, которые разрушаются. В сравнении с натурными экспериментами компьютерное моделирование очень полезный инструмент, который обеспечивает всесторонний, рентабельный и безопасный анализ динамики механических систем. Это дает возможность с минимальными затратами подвергать тщательному анализу в том числе совершенно новые идеи и решения.

В настоящее время de facto стандартом для моделирования систем управления является пакет Matlab/Simulink. ПК «Универсальный механизм» включает набор специализированных инструментов, которые позволяют объединять модели механических систем, описанных в УМ и модели систем управления, описанных в Matlab/Simulink, с возможностью моделирования получившейся комбинированной модели как на стороне УМ, так и на стороне Matlab/Simulink, рис. 4.

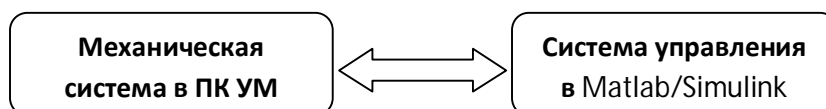


Рис 4. Взаимодействие ПК УМ и Matlab/Simulink

Модель механической системы из ПК УМ представляется в Matlab/Simulink в виде S-функции, что позволяет органично встраивать ее в модели систем управления. В качестве входных сигналов в механическую систему обычно передаются значения активных управляемых сил и моментов, а с вы-

хода забираются необходимые для работы системы управления кинематические характеристики (координаты, скорости, ускорения).

Численные методы

Вследствие высокой контактной жесткости и относительно небольшой массы контактирующих тел появляются процессы с весьма высокими парциальными частотами. В результате уравнения движения становятся жесткими, что приводит к уменьшению шага интегрирования для достижения необходимой точности решения, то есть, к потере быстродействия.

Для интегрирования жестких уравнений движения робота применяется неявная схема метода Парка с расчетом матриц Якоби, которые строятся на основе аналитических выражений для локальных матриц Якоби отдельных наиболее жестких сил. Как показал опыт, данный метод является наиболее эффективным.

Приложение

Разработанные алгоритмы эффективного моделирования динамики роботов нашли также применение в программном комплексе RobSim 5.0, который лаборатория вычислительной механики БГТУ разрабатывает совместно со специалистами инженерно-технического и учебного центра робототехники Московского филиала ФГУП "Аварийно-технический центр Минатома России" и научно-исследовательского института системных исследований РАН, [10]. Программа предназначена для тренировок операторов – отработки навыков управления роботами при ликвидации аварийных ситуаций, рис. 5.

Программный комплекс RobSim 5.0 содержит следующие подсистемы.

- Подсистема моделирования динамики роботов, включающая программу-конвертер для автоматического создания моделей в формате УМ и СОМ-сервер УМ, содержащий интерфейсы объектов, используемых для построения и анализа уравнений движения робота.
- Подсистема управления, включающая редактор пультов, процедуры моделирования структурной логики управления, визуализацию интерактивных пультов. Подсистема позволяет программно смоделировать работу пульта управления на экране, а также подключать к симулятору реальные аппаратные пульты управления для повышения практической ценности навыков операторов.
- Подсистема визуализации роботов и сцен, включающая широкие возможности создания реалистичных изображений объектов и функции управления камерами роботов с клавиатуры.



Рис 5. Программный комплекс RobSim 5.0. Общий вид окна симулятора.

Заключение

Рассмотренный комплекс алгоритмов и методов позволяет успешно моделировать динамику одного робота в реальном режиме времени. Однако в перспективе комплекс должен рассчитывать несколько роботов в сцене в реальном времени. Решение этой задачи с использованием существующих алгоритмов труднодостижимо и требует новых идей и их программной реализации.

Благодарности

Исследования поддержаны Российским фондом фундаментальных исследований, грант 08-01-00677-а.

Список литературы

- [1] Д.Ю. Погорелов. *Введение в моделирование динамики систем тел*. БГТУ, Брянск, 1997.
- [2] Ю. Ф. Голубев, Д. Ю. Погорелов. Компьютерное моделирование шагающих роботов. *Фундамент. и прикл. матем.*, 4:2 (1998), 525–534
- [3] Корянов В. В. Алгоритмы преодоления шагающим аппаратом высоких препятствий за счет сил кулоновского трения: дисс. ... канд. физ.-мат. наук : 01.02.01.- Москва, 2005.- 122 с.
- [4] Шишканов Д.В. Исследование движения адаптивных модульных колесных аппаратов. Дисс. на соиск. уч. ст. канд. физ.-мат. наук. ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, Москва, 2006.
- [5] Евграфов В.В. Динамика и управление движением колесных роботов. Дисс. на соиск. уч. ст. канд. физ.-мат. наук. МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, 2008.
- [6] www.umlab.ru
- [7] Г.В. Михеев, Р.В. Ковалев. Моделирование динамики роботов в программном комплексе RobSim 5.0 с использованием библиотеки «Универсальный механизм». // Матер. XX Межд. Науч.-техн. конф. «Экстремальная робототехника». - Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – 390 с.
- [8] В.Е. Павловский, В.В. Павловский, В.Н. Огольцов, Е.А. Морозова. Управление автономным андронидным роботом. // Матер. XX Межд. Науч.-техн. конф. «Экстремальная робототехника». - Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – 390 с.
- [9] С.В. Калиниченко, А.Ю. Малыхин, А.И. Шокин. Совершенствование вакуумных захватов для вертикально-перемещающихся робототехнических устройств. // Матер. XX Межд. Науч.-техн. конф. «Экстремальная робототехника». - Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – 390 с.
- [10] Сидоркин Н.А., Никитин В.Н. Программно-информационные средства разработки компьютерных тренажеров для обучения операторов экстремальной робототехники. // Матер. XX Межд. Науч.-техн. конф. «Экстремальная робототехника». - Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – 390 с.
- [11] M. Cyrus and J. Beck. Generalized Two- and Three-Dimensional Clipping. *Computers & Graphics*, Vol. 3, pp. 23-28, 1978.
- [12] Д.Ю. Погорелов, А.Э. Павлюков, Т.А. Юдакова, С.В. Котов. Моделирование контактных взаимодействий в задачах динамики систем тел. / *Динамика, прочность и надежность транспортных машин: Сб. науч. тр.* / Под ред. В.И. Сакало. Брянск: БГТУ, 2001. С. 11–23.
- [13] Thomas Larsson. Fast and Tight Fitting Bounding Spheres. // In Jää-Aro, Kai-Mikael and Kjelldahl, Lars (eds.) (2008). SIGRAD 2008. The Annual SIGRAD Conference Special Theme: Interaction, November 27–28, 2008 Stockholm, Sweden.
- [14] Christer Ericson. *Real-Time Collision Detection*. Elsevier Inc., 2005, 632 pages.