

Полунатурное моделирование операций космических манипуляционных роботов.

ДФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, st3-4@rambler.ru, 2012

Космические манипуляционные роботы (КМР) позволяют реализовать новые технологии на борту и вне космических аппаратов (КА), сократить затраты на ремонт и обслуживание КА, повысить эффективность и безопасность работ в открытом космосе.

Высокая стоимость разработки КМР и риски, связанные с эксплуатацией КМР, требуют тщательной наземной отработки лежащих в основе построения КМР технических решений. Операции КМР должны быть тщательно отработаны в наземных условиях. Не менее важной является задача подготовки экипажей к управлению КМР.

Полунатурные функционально-моделирующие стенды (ФМС) – эффективные инструменты решения этих задач. В статье представлено описание созданного в МГТУ им. Н.Э.Баумана ФМС, а также приведены результаты выполненных на его базе исследований в области подготовки операторов КМР, управления двурукими манипуляторами и системам управления с активным отображением сил и моментов.

Обращение к полунатурной модели не является случайным. Известны достоинства современных систем машинной графики. Однако эти возможности не беспредельны. Особенно это касается случаев моделирования контактных операций, операций в ближней зоне, случаев, когда включены датчики внешней среды, при использовании интерактивных средств человеко-машинного интерфейса и др. Полунатурное моделирование позволяет воспроизводить операции в рабочей зоне КМР на физическом уровне. На базе полунатурных моделей удобно вести отработку подсистем и элементов КМР. Чрезвычайно полезным для практики является то, что предоставляется возможность отрабатывать в лабораторных условиях операции, технические подсистемы и элементы КМР, в том числе - до момента изготовления их опытных образцов. Это позволяет существенно экономить ресурсы. Важное приложение моделирующих систем – тренажеры.

Вопросы полунатурного моделирования манипуляционных систем нашли отражение во многих работах. Так, например в рамках программы Robonaut Американским Космическим Агентством был создан полунатурный стенд Cooperative Manipulation Testbed (CMT) [1], а для моделирования роботов Special Purpose Dexterous Manipulator (SPDM) Канадского космического Агентства был создан стенд SPDM Task Verification Facility (STVF) [2] состоящий из высокоточной математической модели SPDM, гидравлического манипулятора-макета (симулятора динамики SPDM) и средств визуализации.

Вопросы создания ФМС, проведения на их основе исследований и подготовки российских экипажей рассматривались в ряде работ, выполненных МГТУ им. Н.Э.Баумана [3]. ФМС МГТУ имеют модульную структуру. В основу программного обеспечения модели КМР положены оригинальные эффективные вычислительные алгоритмы, обеспечивающие автоматическое формирование и решение уравнений динамики КМР в реальном масштабе времени. Особенностью ФМС является использование в качестве макетов КМР серийных промышленных роботов (ПР). Это существенно снижает стоимость модели. Взаимодействие с ПР осуществляется по стандартному протоколу, что позволяет использовать ПР с разным объемом рабочей зоны и в широком диапазоне грузоподъемности. Развитый пользовательский интерфейс позволяет строить имитационные модели КМР различной структуры и назначения. В их числе – манипуляторы орбитальных станций, используемые для работы с объектами больших размеров и массы, манипуляторы для выполнения тонких операций, двурукие КМР, интеллектуальные манипуляторы с развитыми системами осязательства. В статье приведены примеры, демонстрирующие эти возможности ФМС.

1. Структура ФМС

ФМС [4, 5, 6] представляет собой комплекс аппаратно-программных средств. Структура ФМС представлена на рисунке 1, на рисунке 2 – фотография ФМС.

ФМС имеет модульную структуру и состоит из следующих частей:

- моделирующая система реального времени (МСПВ) – программный комплекс моделирования кинематики, динамики, систем управления движением и действиями КМР;
- средства человеко-машинного интерфейса;
- ЭВМ для управления оборудованием;
- промышленные роботы (ПР).

Организация сетевого взаимодействия распределенного программного обеспечения (ПО) ФМС осуществляется посредством транспортного протокола TCP и сетевого протокола IP.

Управление комплексом оборудования осуществляется robot operating system (ROS).

В составе ФМС – сервер удаленного доступа, благодаря которому предоставляется возможность удаленного доступа к процессам управления и моделирования КМР по сети Интернет [7].

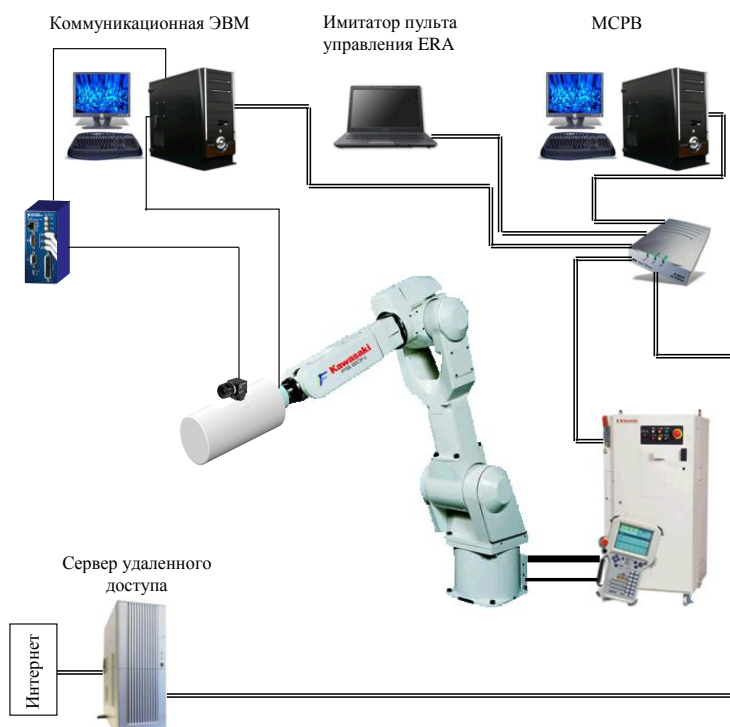


Рисунок 1 – Структура ФМС

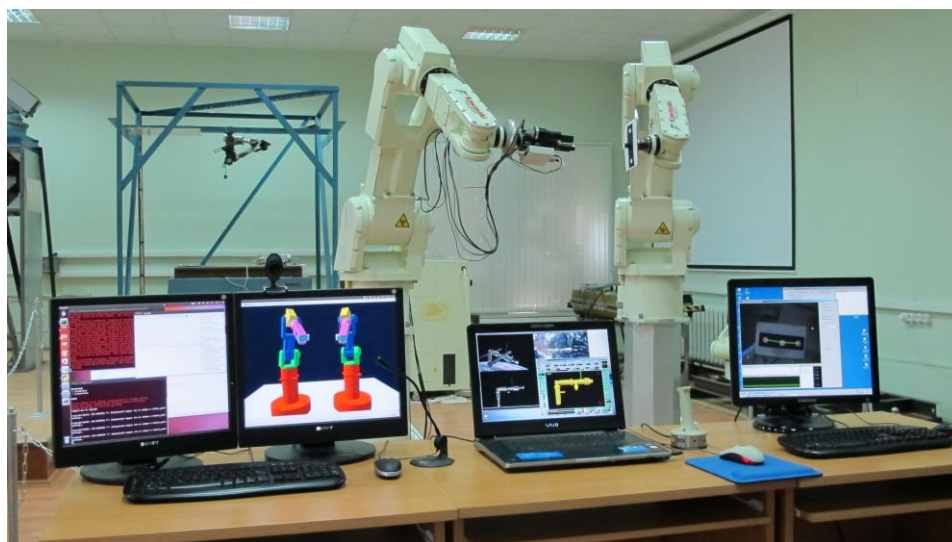


Рисунок 2 – Мониторы ЭВМ и манипулятор ПР ФМС

2. Промышленные роботы

ПР предназначены для воспроизведения динамики механического контакта КМР с объектами внешней среды и перемещения полезных грузов и аппаратных средств систем оучувствления. В качестве ПР в ФМС используются роботы Kawasaki FS 020N и FS 003N. Рабочий орган (РО) ПР оснащен комплектом специального оборудования (рисунок 3):

- камеры моно- и стереосистемы технического зрения (СТЗ);
- силомоментные датчики (СМД) системы измерения сил и моментов;
- захватные устройства с позиционно-силовым управлением и тактильным оучувствлением;
- система сканирования пространства Microsoft Xbox Kinect, позволяющая строить карты глубин рабочей зоны станда.



Рисунок 3а



Рисунок 3б



Рисунок 3с



Рисунок 3д

Рисунок 3 – Инструменты ПР (а: рабочий орган ПР: видеокамера СТЗ, СМД, захватное устройство; б: стереокамера; с: оучувствленная кисть; d: Kinect – «голова» ПР)

3. Математическое обеспечение ФМС

КМР представляется в виде системы, включающей:

- n-звенный исполнительный механизм (ИМ), звенья которого – упругие тела;
- комплекс из n следящих приводов сочленений;
- систему управления движением;
- систему управления действиями (миссии КМР);
- систему безопасности.

Основу модели динамики ИМ составляют уравнения в форме блочных матриц [8].

Эти уравнения имеют вид

$$A\ddot{q} + b = \mu d + C^T M v + D^T F_v,$$

где

q – n-мерный вектор координат сочленений ИМ,

b – n-мерный вектор центробежных и кориолисовых сил,

$M v$ – 3n-мерный блочный вектор внешних моментов, действующих на звенья,

F_v – 3n-мерный блочный вектор приложенных к звеньям внешних сил,

C, D – 3nxn-мерные блочные матрицы, связывающие блочные векторы угловых и линейных скоростей звеньев в декартовом пространстве и вектор производных координат сочленений,

A – nxn – матрица инерционных коэффициентов,

$$A = c^T J c + D^T M D,$$

J – 3nx3n – блочная матрица, составленная из тензоров инерции в системах координат звеньев,

M – 3nx3n – блочная матрица, составленная из масс звеньев.

Преимущество блочных матриц – компактность уравнений. При моделировании уравнения ИМ представляются в рекуррентной форме – в виде так называемых «прямых» и «обратных» соотношений [9] и в виде «косых сумм» (алгоритм «косынка») [10]. Упругие деформации описываются модальным методом [11].

В ФМС принято укрупненное описание приводов в виде функциональных блоков, в качестве которых рассматриваются двигатели, редукторы, тормозные муфты, контроллеры. При моделировании в памяти ЭВМ создается база данных, в которой представлены уравнения всех модулей в нормальной форме Коши. Отдельно указываются связи между входными и выходными координатами модулей. «Сборка» уравнений приводов из уравнений входящих в их состав модулей производится автоматически. Процедура сборки алгоритмически совмещена с процедурой численного интегрирования. В общем виде этот метод был реализован в программных комплексах [12,13].

Динамика системы приводов КМР многомерна. Эффекты взаимовлияния повышают колебательные свойства системы управления (СУ) и в ряде случаев приводят к возникновению вибраций. Для оценки устойчивости и определения рациональных значений параметров приводов разработаны методы расчета динамики систем следящих приводов как многомерных динамических систем [8].

Движение КМР происходит под управлением системы планирования траекторий в декартовом пространстве или в пространстве координат сочленений. Планирование включает два этапа:

а) расчет точек вдоль линий между точкой исходного положения и целевой точкой. Расчет точек производится с привязкой к реальному времени с частотой, соответствующей частоте квантования сигналов управляющей ЭВМ моделируемого КМР.

б) решение обратной кинематической задачи в каждой из запланированных точек.

Решение обратной кинематической задачи выполняется с учетом кинематической избыточности ИМ.

В качестве декартовых систем координат рассматриваются системы, связанные в КМР («внутренние системы координат») и с внешними объектами («внешние системы координат»).

Моделирование миссий предусматривает подготовку и реализацию программ-автосеквенций, состоящих из элементарных фрагментов типовых манипуляционных операций.

В ФМС на этапе подготовки пользователь разрабатывает свою программу действий КМР и кодирует ее на специальном роботоориентированном языке – Языке подготовки действий (ЯПД) [14]. Программа действий, написанная на ЯПД, подвергается трансляции во внутренний (рабочий) код..

4. Программное обеспечение

4.1 Моделирующая система реального времени

МСПВ формирует уравнения движения КМР, выполняет решение этих уравнений численными методами и осуществляет обмен данными с другими программными частями ФМС.

В МСПВ применена многопоточная (параллельная) технология вычислений на однопроцессорных системах: один из потоков вычислительного процесса выполняет построение модели КМ («алгоритмическая» часть), другой выполняет интегрирование полученных уравнений. Третий поток (коммуникационный) осуществляет взаимодействие с внешними объектами, функционируя параллельно с интегрирующим и алгоритмическим потоками. Для корректной организации многопоточных вычислений ПО использует стандартные средства Borland Builder C++.

ПО МСПВ состоит из следующих частей:

- ПО модели динамики исполнительного механизма (ИМ);
- ПО кинематики ИМ, внешних объектов и навесного оборудования;
- ПО модели приводов;
- ПО алгоритмов управления;
- ПО поддержки интерфейса ввода исходных данных;
- ПО интерфейса выбора закона и параметров управления движением КМР;
- ПО поддержки интерфейса связи с внешними устройствами (имитатор пульта человеко-машинного интерфейса, промышленный робот, СТЗ, СМД);
- ПО поддержки интерфейса предъявления оперативных данных;
- ПО обеспечения связи с дистанционно удаленным пользователем;
- ПО системы информационного обеспечения.

4.2 ПО рабочего органа промышленного робота

ПО РО решает следующие задачи:

- расчет координат камеры СТЗ относительно мишени;

- определение сил реакции, возникающих при воздействии на рабочий орган манипулятора;
- видеofиксация изображений при моделировании операций визуализации (например, осмотра внешней поверхности станции);
- формирование сигналов управления КМР при исполнении команд управления по данным от системы технического зрения (в КМР ERA – юстировка, приближение и отход);
- формирование сигналов управления КМР при управлении по данным от СМД.

5. Применение ФМС

ФМС предоставляет возможности проведения исследований динамики и процессов управления МР с различной структурой и параметрами, при выполнении ими операций как в свободном пространстве, так и разнообразных контактных операций.

На базе ФМС выполнена разработка и исследование алгоритмов управления при перемещении КМР в свободной зоне, приближении и отходе (с использованием СТЗ [15]), при контактных операциях установки и снятия объектов.

На рисунках 4-5 приведены примеры записи процессов выполнения на ФМС операции, включающей фазы ручного управления перемещением КМР в свободном пространстве, и автоматических операций юстировки и приближения к базовой точке. Ручные операции выполняются по командам, подаваемым оператором с пульта ИММІ. Автоматические операции – с использованием информации телекамеры СТЗ рабочего органа.

На рисунке 4 - линейные координаты рабочего органа относительно базовой системы координат и системы координат базовой точки.

На рисунке 5 – угловые координаты рабочего органа относительно базовой системы координат и системы координат базовой точки.

На рисунке 6 приведены примеры записи процессов выполнения на ФМС контактной операции, заключающейся в перемещении схвата КМР по конической поверхности, соответствующей поверхности интерфейса стыковочных агрегатов. Операция выполняется в автоматическом режиме с использованием информации СМД, установленном на схвате ПР. На рисунке 6а - координаты Z и Y ЗУМ КМР при выполнении контактной операции, 6б – фрагмент записи зарегистрированных СМД сил контактного взаимодействия.

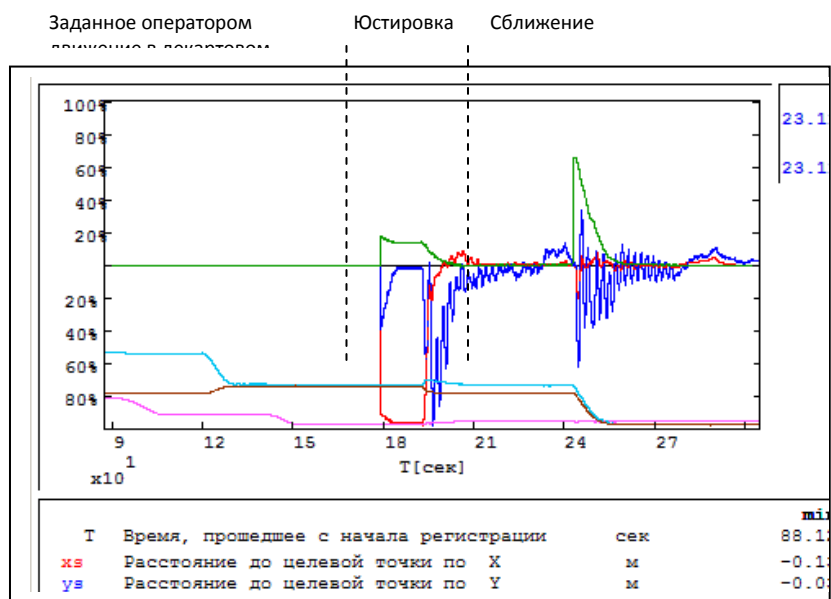


Рисунок 5 – Линейные координаты РО относительно базовой системы координат и системы координат базовой точки

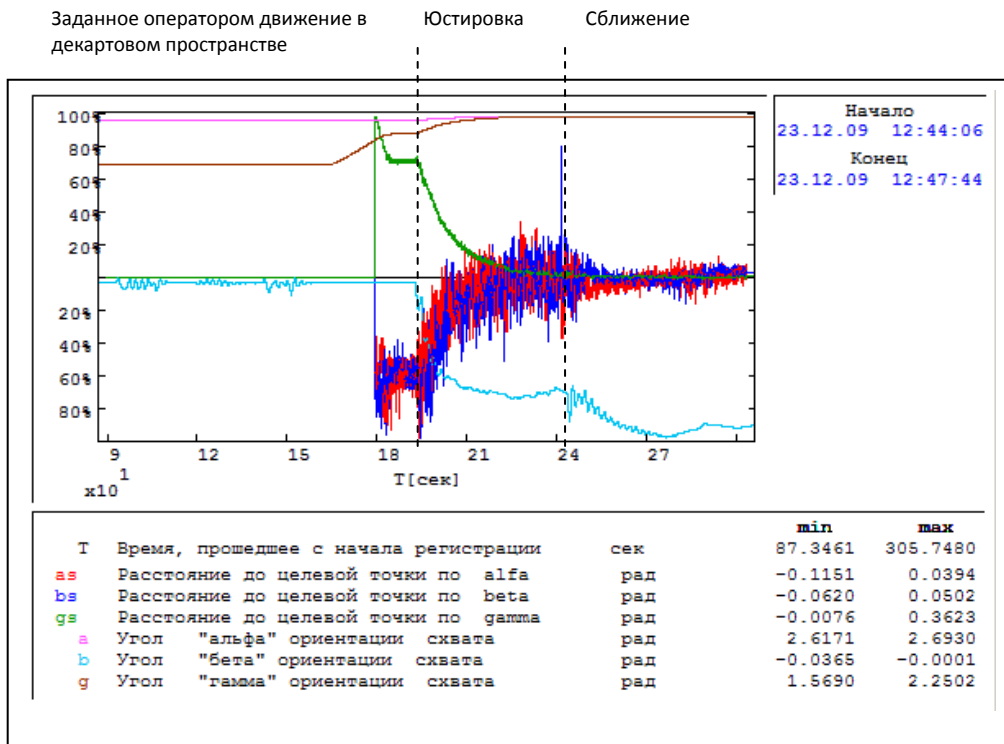


Рисунок 6 – Угловые координаты РО относительно базовой системы координат и системы координат базовой точки

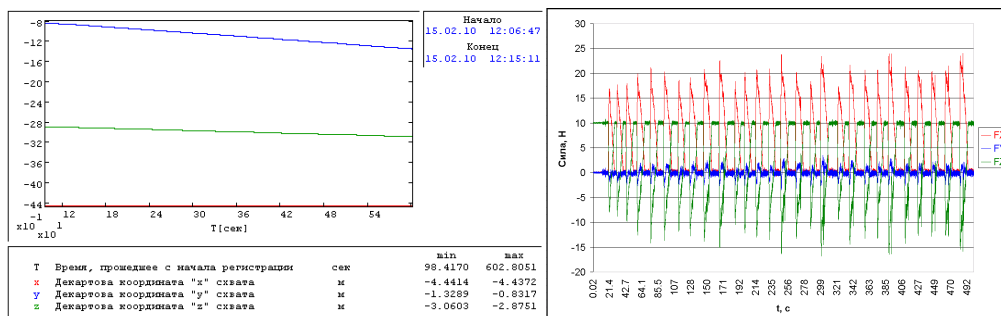


Рисунок 7а

Рисунок 7б

Рисунок 7 – Динамические процессы при выполнении контактной операции

1. NASA Robonaut – Cooperative Manipulation Testbed: A Facility for Space Robot Control System Development, Canadian Space Agency, St-Hubert, Quebec, Canada, June 18-22, 2001.
2. Piedboeuf J.-C., De Carufel J., Aghili F., Dupuis E. Task verification facility for the Canadian special purpose dextrous manipulator. Proc IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Detroit -1999, Vol. 3, pp. 1077–1083.
3. Лесков А.Г., Илларионов В.В., Лескова С.М., Полухин В.И. Разработка функционально-моделирующих стендов для подготовки операторов космических манипуляционных роботов. Звездный городок, тез. докл. 6-й МНТК «Пилотируемые полеты в космос», 2005, С.179-180.
4. Универсальный функционально-моделирующий стенд космических манипуляционных роботов в системе подготовки космонавтов / В.И. Полухин, В.П. Вересов, И.В. Воронец, А.Г. Лесков // Авиакосмическая техника и технология. Научно-технический журнал. – 2000. – №3. – С.53-61.

5. Integrated Laboratory Instruction in Robotics / V.V. Illarionov, A.G. Leskov, S.M. Leskova, A.V. Shumov and A.M. Zimin, // Engineering Education: Proc. of International Conference ICEE-2008. – Pecs - Budapest, Hungary, 2008. - Paper No 83.
6. Remote Access Computer-Aided Laboratories and Practical Training of XXI Century Engineers / I.B. Fedorov, A.M. Zimin, S.V. Korshunov, A.G. Leskov, G.N. Solovyev, B.V. Buketkin and A.V. Shumov // Innovations 2008: World Innovations in Engineering Education and Research / Ed. W. Aung. - INEER, USA, Arlington, VA, 2008. – Chap. 37, pp. 415 – 423.
7. Система удаленного доступа к учебно-научному экспериментальному робототехническому комплексу / А.М. Зимин, В.В. Илларионов, А.Г. Лесков, С.М. Лескова, А.В. Шумов // Научный сервис в сети Интернет: решение больших задач: Труды Всероссийской научной конференции. – М. - 2008. - С. 437 - 439.
8. Медведев В.С., Лесков А.Г., Ющенко А.С. Системы управления манипуляционных роботов. – М.:Наука, 1978. – 416 с.
9. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. – М.:Мир, 1989. – 624 с.
10. Лесков А.Г., Ющенко А.С. Моделирование и анализ робототехнических систем. – М.:Машиностроение, 1992. – 80 с.
11. Лесков А.Г., Илларионов В.В., Лескова С.М. Методы и алгоритмы моделирования динамики манипуляционных роботов // Оборонная техника. Научно-технический журнал. – 2001. – № 8-9. – С.50-57.
12. Комплекс программ автоматизации моделирования следящих приводов. / А.Г.Лесков, Ю.Х.Аминев., С.М.Лескова, Л.П.Шигорин //Алгоритмы и программы: Сб. ГосФАП СССР. – М., 1985. – №2. – С.70.
13. Комплекс программ автоматизации проектирования следящих приводов. / А.Г.Лесков, Ю.Х.Аминев, С.М.Лескова, Л.П.Шигорин //Алгоритмы и программы: Сб. ГосФАП СССР. –М., 1985. – №2. – С.58.
14. Лесков А.Г., Илларионов В.В. Моделирование программ действий космических манипуляционных роботов. Звездный городок, тез. докл. 5-й МНТК «Пилотируемые полеты в космос», 2003, С.40-41.
15. Вудс Р, Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений. М.:Техносфера, 2005. 1072 с.