

А. Г. Л е с к о в

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПОЛУНАТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ РОБОТОВ

Рассмотрены основные задачи космической робототехники, представлены результаты исследований и разработок в области моделирования и наземной отработки операций космических манипуляционных роботов.

E-mail: agleskov@rambler.ru

Ключевые слова: космический манипуляционный робот, моделирование, блочные матрицы, критерий Найквиста, подготовка космонавтов, функционально-моделирующий стенд.

Задачи космической робототехники. Космическая робототехника является одним из приоритетных направлений развития отечественной космонавтики. В “Концепции развития робототехнических систем на пилотируемых космических комплексах для решения задач в области обеспечения космической деятельности и исследования объектов Солнечной системы на период до 2040 года” отмечается, что “создание и использование робототехнических систем обеспечивает повышение безопасности деятельности экипажей космических кораблей, позволяет сократить сроки создания и отработки космической техники, увеличить сроки активного существования космических объектов, существенно расширить их функциональные возможности в процессе эксплуатации”.

Среди основных задач в области космической робототехники выделяют следующие:

- создание робототехнических комплексов для сборки и обслуживания крупногабаритных конструкций антенн, энергодвигательных установок и космических станций;
- создание аппаратов обслуживания космических объектов, оснащенных робототехническими средствами проведения ремонтно-восстановительных работ, дозаправки обслуживаемых объектов топливом и расходными компонентами;
- создание универсальных робототехнических систем для позиционирования аппаратуры наблюдения и контроля состояния космических объектов, а также для осуществления операций стыковки/расстыковки космических объектов;
- создание робототехнических средств утилизации или увода космических объектов с геостационарных орбит и орбит спутников координатно-временного обеспечения;

- создание робототехнических средств для проведения комплексных исследований и разработки ресурсов Луны и планет.

Особая роль в решении задач космической робототехники отводится космическим манипуляционным роботам (КМР). Их рассматривают в качестве основных средств при обслуживании и ремонте орбитальных станций, в операциях по обеспечению работы космонавтов во время внекорабельной деятельности, в космических экспериментах, при монтаже и обслуживании орбитальных станций и космических аппаратов (КА), при разгрузке/погрузке грузовых космических аппаратов, перемещении грузов внутри станции. Планируется использование КМР при монтаже межпланетных КА, при сооружении и обслуживании напланетных комплексов.

Особенности КМР. Высокая стоимость КМР и риски, связанные с их эксплуатацией в космосе, требуют тщательной отработки и верификации всех заданий на Земле. Учитывая существенное различие между функционированием КМР в условиях земной гравитации и в невесомости, основным методом решения этих задач считают математическое и полунатурное моделирование.

Главные проблемы с которыми приходится сталкиваться при моделировании КМР, заключаются в следующем:

- уравнения динамики исполнительных механизмов (ИМ) КМР в развернутой форме записи чрезвычайно громоздки; составление и решение таких уравнений аналитическими методами не представляется возможным;

- динамические процессы, протекающие при управлении манипуляционными роботами, описываются системами взаимосвязанных нелинейных дифференциальных уравнений высокого порядка.

Методы и алгоритмы моделирования. Разработка и применение эффективных методов и алгоритмов расчета динамики КМР, их практических приложений — одно из направлений НИОКР и учебных занятий, выполняемых на кафедре СМ-7 в течение длительного времени.

Моделирование КМР выполняют во временной и частотной областях. Основу алгоритмов моделирования КМР во временной области составляет *метод блочных матриц* [1]. Главная особенность этого метода состоит в том, что уравнения кинематики и динамики многозвенных ИМ КМР записывают не для отдельных звеньев (векторы 3×1), а для блочных векторов размером $(3n \times 1)$, компонентами которых являются трехмерные векторы. Это позволяет представить уравнения ИМ в компактной форме, удобной для использования при аналитических исследованиях. Уравнения в форме блочных матриц имеют вид

$$Aq'' + b = \mu + c^T M_B + D^T F_B,$$

где q — n -мерный вектор координат сочленений ИМ; b — n -мерный вектор центробежных и кориолисовых сил; μ — силы (моменты), развиваемые приводами; M_b — $3n$ -мерный блочный вектор внешних моментов, действующих на звенья; F_b — $3n$ -мерный блочный вектор внешних сил, приложенных к звеньям; c , D — $3n \times n$ -мерные блочные матрицы, связывающие блочные векторы угловых и линейных скоростей звеньев в декартовом пространстве и вектор производных координат сочленений; A — $n \times n$ — матрица инерционных коэффициентов:

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

(J — блочная матрица тензоров инерции звеньев; M — блочная матрица масс звеньев).

Важной особенностью метода блочных матриц является представление этих матриц в виде конечных сумм. Это позволяет записывать уравнения ИМ с использованием рекуррентных соотношений в виде прямых и обратных уравнений, а также “косых сумм” (алгоритм “Косынка” [2]). В этом алгоритме, например, блочная матрица c составлена из векторов c^{ej} ($j = 0, 1, \dots, n$). Эти векторы соответствуют поддиагонали матрицы c (поддиагональ с нулевым номером соответствует блочной диагонали матрицы c). Матрицы, имеющие в своем составе поддиагонали c^{ej} , связаны рекуррентным соотношением:

$$c^{ej+1} = Y c^{ej},$$

где Y — блочная матрица, у которой на месте первой блочной поддиагонали размещены матрицы перехода между системами координат смежных звеньев. Аналогично находят элементы матрицы D , а также элементы блочных векторов координат, скоростей и ускорений звеньев ИМ. Матрицы математической модели динамики ИМ также вычисляют “по слоям”. Так, алгоритм расчета j -го элемента k -го слоя матрицы A имеет вид

```

for(k=0; k<n ; k++)
  for(i=k; i<n; i++)
    for(j=0; j<n-i; j++) {
      l=i+j;
      A(k)(j) += D^T(i-k)(j+k) * M(l) * D(i)(j) +
      C^T(i-k)(j+k) * J(l) * C(i)(j);
    },

```

где $M(l)$ — масса l -го звена, $J(l)$ — тензор инерции l -го звена.

Метод моделирования ИМ с жесткими звеньями распространен также на ИМ, звенья которых являются упругими телами [3]. Упругие деформации звеньев описывают с использованием *модального метода*.

Отличительная особенность алгоритма “Косынка” — компактность кода и высокое быстродействие программ для ЭВМ. Например, один шаг вычислений при моделировании 7-звенного КМР на IBM PC среднего класса выполняется за менее чем 0,0001 с, что позволяет моделировать КМР в реальном масштабе времени.

Моделирование операций КМР в свободном пространстве выполняется с использованием компьютеров, объединенных в локальную сеть. Для моделирования операций КМР в ближней зоне и контактных операций компьютерные модели используются в составе полунатурных стендов.

При расчетах динамики системы управления (СУ) КМР применяют *частотные методы*, развитые в направлении многомерных систем [1, 2]. При этом СУ КМР рассматриваются как комплексы приводов, связанных между собой по каналам динамического взаимовлияния.

Уравнение возмущенного движения системы приводов КМР имеет вид

$$q(t) = W(p)q^*(t) - W_B(p)\mu_B(t),$$

где $q(t)$ — трехмерный вектор координат сочленений ИМ; $W(p)$ — матричная передаточная функция системы следящих приводов КМР по отношению к вектору управления; $W_B(p)$ — матричная передаточная функция приводов по отношению к вектору внешних сил и моментов, приведенных к выходным валам приводов; $q^*(t)$ — вектор управляющих воздействий; $\mu_B(t)$ — вектор внешних сил и моментов.

Как показали проведенные исследования, эффекты взаимовлияния существенно влияют на динамические свойства приводов. Особенно заметны искажения частотных характеристик приводов в области средних и высоких частот. Для исследования устойчивости в статье предложен критерий, основанный на функции Найквиста $Q(j\omega)$, который позволяет судить об устойчивости системы приводов с учетом их взаимовлияния. Эта функция представляет собой отношение характеристических определителей системы приводов с учетом и без учета динамического взаимовлияния. Расчет динамики приводов КМР выполняют также в частотной области методами, базирующимися на формализованных графоаналитических методах [4].

Практические приложения. Алгоритмы моделирования КМР легли в основу созданных по заказу РГНИИ ЦПК им. Ю.А. Гагарина функционально-моделирующих стендов (ФМС) для подготовки операторов манипуляционных систем многоцветового космического корабля “Буран” и Международной космической станции.

Первый ФМС КМР создан и установлен в РГНИИ ЦПК им. Ю.А. Гагарина в 1993 г. Он предназначен для подготовки космонавтов к управлению КМР многоцветовым космическим кораблем

“Буран”. Основу ФМС составляет аналого-цифровая модель КМР. В качестве макета КМР применялся промышленный робот РМ-01.

ФМС КМР постоянно модернизировался [5, 6]. Одно из направлений его использования — общекосмическая подготовка экипажей КА к управлению КМР МКС; другое — наземная отработка на базе ФМС операций стыковки модулей МКС.

ФМС оснащен программным обеспечением регистрации процессов управления и оценки деятельности космонавтов. Специально для целей общекосмической подготовки экипажей МКС разработаны компьютеризированные курсы по основам космической робототехники.

В настоящее время создана более совершенная версия ФМС, оснащенная современной аппаратурой осязательства и макетами КМР. Переоснащение ФМС выполнено в плане реализации программы развития МГТУ им. Н.Э. Баумана как национального исследовательского университета. В составе ФМС — двурукий ИМ на базе промышленных роботов Kawasaki FS020N, системы технического зрения на базе аппаратных средств “Видеоскан”, силомоментные датчики, трехпалый центрирующий хват и трехпалая кисть с тактильным осязательством разработки формы Schunk. ФМС представляет собой многофункциональный комплекс аппаратно-программных средств и используется для проведения исследований по широкому кругу проблем космической робототехники (подготовка операторов, человеко-машинный интерфейс, роботизированные технологии сборки и обслуживания, дистанционное управление), а также в учебном процессе.

Разработки в области многомерной динамики КМР использованы при создании программных комплексов для автоматизации проектирования следящих приводов манипуляционных роботов: ПСП — автоматизированное проектирование следящих приводов на основе асимптотических частотных характеристик; ПАМ — автоматизированное моделирование динамики и процессов управления в приводах систем вооружения.

На базе ФМС в настоящее время проводятся исследования и разработки в области динамики и управления полуавтономными космическими манипуляционными роботами с различной структурой — однорукие и двурукие роботы, роботы, исполнительные механизмы которых имеют змеевидную форму.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Медведев В. С., Лесков А. Г., Ющенко А. С. Системы управления манипуляционных роботов. – М.: Наука, 1978.
2. Лесков А. Г., Ющенко А. С. Моделирование и анализ робототехнических систем. – М.: Машиностроение, 1992.

3. 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.
4. Автоматизированное проектирование следящих приводов и их элементов / В.Ф. Казмиренко, Ю.В. Илюхин, А.Г. Лесков, А.С. Парфенов; под ред. В.Ф. Казмиренко. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
5. 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.
6. Remote access computer-aided laboratories and practical training of XXI century engineers / I.B. Fedorov, A.M. Zimin, S.V. Korshunov et al. // Innovations 2008: World Innovations in Engineering Education and Research / Ed. W. Aung. – INEER, USA, Arlington, VA, 2008. – Chap. 37. – P. 415–423.

Статья поступила в редакцию 09.10.2011