

УДК 621.865.8:519.673

Полунатурное моделирование операций космических манипуляционных роботов

© | Лесков Алексей Григорьевич¹ | leskov@bmstu.ru
Илларионов Владимир Владимирович² | c8.df.mgtu@gmail.com

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

² Дмитровский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, пос. Орево, 141801, Россия

Приведено описание функционально-моделирующего стенда (ФМС) — комплекса, предназначенного для наземной отработки миссий космических манипуляционных

роботов (КМР) и наземной подготовки операторов таких роботов. Созданию подобных ФМС в мире уделяется значительное внимание. Необходимость предварительной тщательной подготовки и отработки операций в наземных условиях обусловлена сложностью и дороговизной космических аппаратов (КА), значительными рисками, которым подвергаются космонавты при работе в открытом космосе. Эффективный метод решения этих задач — полунатурное моделирование процессов функционирования КМР с использованием физических макетов элементов КА и КМР и средств человеко-машинного интерфейса. При этом моделирование кинематики и динамики протекающих процессов осуществляется посредством персональных компьютеров. Главная особенность описываемого ФМС — воспроизведение операций КМР на физическом уровне осуществляется с использованием серийных промышленных роботов.

Ключевые слова: космический робот, полунатурное моделирование, система технического зрения, силомоментный датчик, захватное устройство манипулятора

Введение. В настоящее время проблемы создания и практического применения космических манипуляционных роботов (КМР) находятся в центре внимания космических агентств многих держав мира. Список задач, решаемых с использованием современных КМР, весьма обширен и включает транспортные, сборочные операции, операции обслуживания космических аппаратов (КА) и другие. Применение КМР позволяет снизить затраты на создание и эксплуатацию КА, повысить уровень автоматизации ремонтных и сборочных работ, высвободить космонавтов от выполнения опасных и рутинных операций, а также расширить функциональные возможности КА.

Обязательным компонентом процесса проектирования КМР является компьютерное моделирование, которое позволяет создать эффективные виртуальные модели кинематики, динамики, процессов управления и логики функционирования КМР, и выполнить отрисовку рабочих сцен с высоким уровнем детализации. Недостатком компьютерного моделирования является отсутствие взаимодействия тел на физическом уровне, что затрудняет моделирование таких операций как сборка и обслуживание КА. Этот недостаток преодолевается при полунатурном моделировании, когда кинематика, динамика и процессы управления моделируются виртуально, а взаимодействие объектов при контактных операциях происходит на физическом уровне.

Полунатурную систему моделирования можно представить состоящей из трех основных частей [1]. Первая часть — компьютерная модель реального времени кинематики, динамики и процессов управления, собственно, КМР и объекта манипулирования (ОМ), выполняется на базе цифровой ЭВМ или нескольких ЭВМ, связанных по сети. Вторая часть — это средства человеко-машинного интерфейса (Man-Machine Interface — MMI) — рукоятки и пульта управления, индикаторы и так далее. Третья часть — физические макеты КМР, системы и средства технического зрения (СТЗ), силомоментные датчики (СМД), захватные устройства манипуляторов (ЗУМ) и другие. Все компоненты системы связаны между собой. Вычисленные в модели координаты траектории перемещения ЗУМ КМР по каналам связи передаются в систему управления макета КМР, что обеспечивает пространственное перемещение ЗУМ макета КМР, аналогично траектории ЗУМ КМР. Сигналы от MMI и макетов КМР через контроллеры передаются на компьютерную модель.

В общем случае полунатурное моделирование не позволяет перемещать реальные ОМ в условиях земной гравитации по всей рабочей зоне. Однако большинство

контактных операций КМР требует перемещения ОМ только в ограниченной части рабочей зоны. Поэтому в состав стенда вместо реального КМР вводят его макет в виде промышленного робота (ПР) с отличающейся от КМР кинематической схемой, обеспечивая при этом перемещение ЗУМ ПР, полностью соответствующее перемещению ЗУМ реального КМР.

Примеры полунатурных моделирующих стендов КМР. В полунатурном стенде Shenzhen Space Technology Center [2] (рис. 1) задействованы два промышленных робота Motoman K10 — один моделирует движение схвата КМР (на рисунке слева), другой моделирует движущуюся цель (справа), которую схват КМР должен зафиксировать с помощью СТЗ, а затем захватить ее, реализовав контактную операцию.

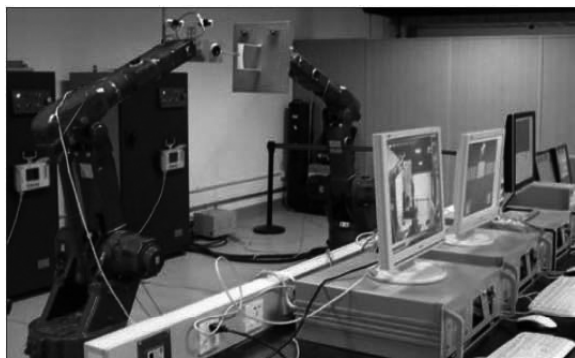


Рис. 1. Полунатурный стенд Shenzhen Space Technology Center (KHP)

Канадским Космическим Агентством CSA разработан наземный моделирующий стенд космических роботов STVF (рис. 2) для верификации операций SPDM, включающий физические макеты [3]. Стенд предназначен для проверки показателей динамики контакта при выполнении роботом SPDM различных операций обслуживания МКС.

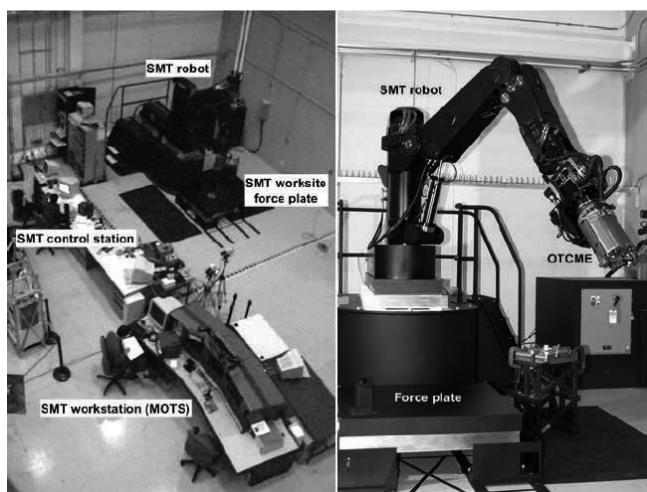


Рис. 2. Стенд верификации задач SPDM (STVF)

В CSA создан испытательный стенд, основным компонентом которого является симулятор эксплуатации и обучения MSS (MOTS — MSS Operation and Training Simulator). В настоящее время MOTS используется для обучения операторов MSS и планирования операций [4] (рис. 3).

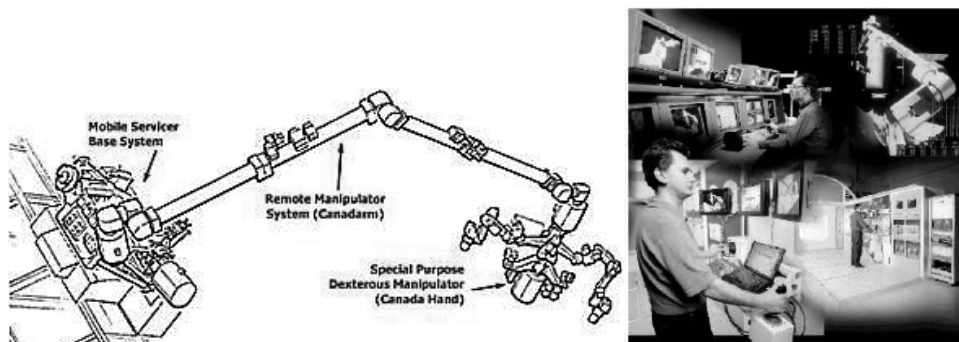


Рис. 3. Симулятор мобильной обслуживающей системы МКС (MOTS)

В DLR разработаны концепции для миссии обслуживания на орбите [5]. В рамках подготовки к этим миссиям в DLR разработан симулятор на-орбитного обслуживания OOS-SIM (On-Orbit Servicing simulator) (рис. 4), который воспроизводит условия операций в условиях микрогравитации.

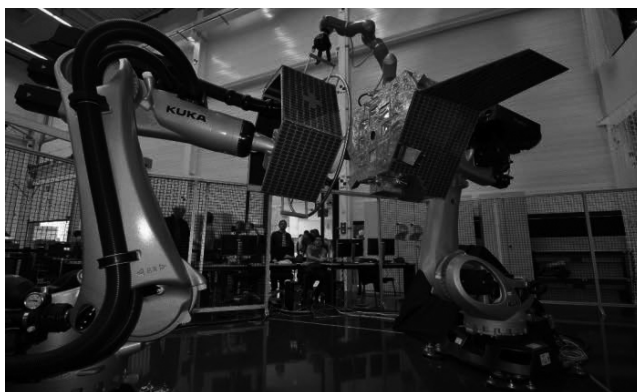


Рис. 4. OOS-SIM, тренажер для на-орбитного обслуживания

Функционально-моделирующий стенд МГТУ им. Н.Э. Баумана. В МГТУ им. Н.Э. Баумана первый полунатурный стенд (ФМС), моделирующий КМР, был создан в 1991 г. и передан в эксплуатацию в РГНИИ ЦПК им. Ю.А.Гагарина. Стенд (рис. 5) предназначался для подготовки экипажей к работе с бортовым манипулятором многогоразового космического корабля «Буран» и позволял выполнить моделирование в реальном времени широкого круга операций КМР, включая фрагменты миссий типа захвата, переноса и укладки полезного груза.

В составе ФМС — средства MMI реального бортового манипулятора (рукоятки, клавиши, мониторы и так далее), СТЗ, СМД. Недостаток вычислительных мощностей

того времени компенсировался за счет применения аналого-цифровой технологии моделирования (на заднем плане рис. 5 — аналоговая ЭВМ АБК-32). Перемещения ЗУМ КМР имитировал промышленный робот РМ-01.

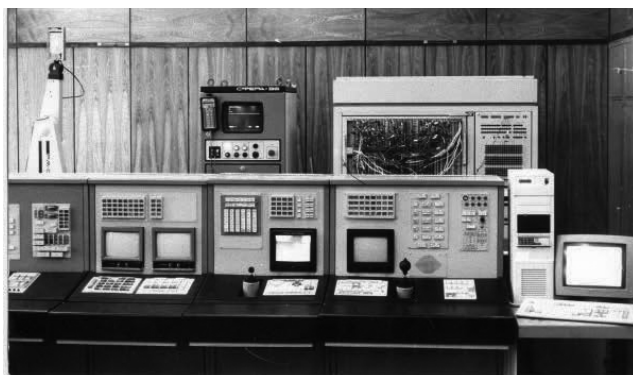


Рис. 5. Первая версия ФМС в РГНИИ ЦПК им. Ю.А.Гагарина

В то время проблемой являлась реализация моделирования в реальном масштабе времени кинематики и динамики многозвенных исполнительных механизмов КМР. Уравнения КМР в развернутом виде чрезвычайно громоздки; их составление занимало достаточно много времени. Эти проблемы были решены за счет применения оригинальных авторских алгоритмов записи уравнений (блочные матрицы) и быстродействующих итерационных алгоритмов (алгоритм «косынка») [6].

Аппаратную основу современной версии ФМС МГТУ им. Н.Э. Баумана (рис. 6) составляют три промышленных робота: два ПР KAWASAKI FS-020N грузоподъемностью 20 кг и один ПР KAWASAKI FS-003N грузоподъемностью 3 кг. Инструментальные фланцы ПР оснащены шестикомпонентными силомоментными датчиками. На СМД установлены захватные устройства двух типов: трехпальцевый центрирующий электрический ЗУМ для силового захвата объектов цилиндрической формы и трехпалая кисть с тактильным очувствлением для деликатного захвата объектов сложной формы. В составе ФМС несколько СТЗ: моноскопическая СТЗ, установленная в рабочий орган одного из ПР FS020N, стереоскопическая съемная СТЗ и система построения карты глубин сцены.

В качестве средств управления станда используются программные пульта управления, геймпады, джойстики, голосовое управление.

Моделирующие и управляющие работой оборудования компьютеры станда связаны локальной сетью с сервером удаленного доступа, предоставляющим доступ по сети Интернет [7]. Во время сеанса управления и после его завершения экспериментатору предоставляются результаты в графическом и табличном видах, а также сетевые инструменты для их обработки.

Модульная структура ФМС позволяет легко перепрофилировать его для решения различных задач как моделирования, например, моделирование стыковки шлюзовой камеры к МКС с помощью манипулятора ERA в составе автоматизированной системы моделирования «Стыковка-ERA» РКК «Энергия» (рис. 7), так и подготовки операторов КМР (например, техническое средство подготовки кандидатов в космонавты — стенд «ФМС ERA» НИИЦПК им. Ю.А.Гагарина) и других операций.

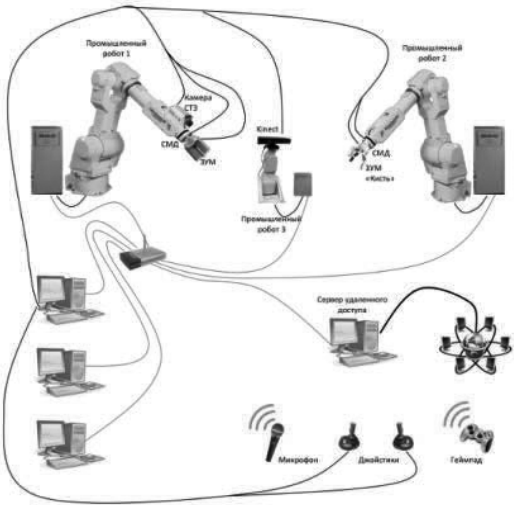


Рис. 6. ФМС, размещенный в ДФ МГТУ им. Н.Э. Баумана



Рис. 7. Автоматизированная система моделирования «Стыковка-ERA»

Заключение. В докладе представлено обоснование эффективности методов и средств полунатурного моделирования при проектировании и исследовании КМР. Приведенные примеры специализированных полунатурных моделирующих стендов, созданных в ведущих космических агентствах мира, свидетельствуют о большом интересе к этой проблеме и подтверждают актуальность и востребованность представленных в докладе разработок МГТУ им. Н.Э.Баумана.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Лесков А.Г. Математическое и полунатурное моделирование космических манипуляционных роботов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, спецвыпуск: Специальная робототехника и мехатроника*, 2011, с. 109–115.
- [2] Xu W., Liang B., Xu Y., Li C., Qiang W. Ground Experiment System of Free-floating Robot For Capturing SpaceTarget. *Journal of Intelligent Robotics Systems*, 2007, vol. 48, pp.187–208.
- [3] Piedboeuf J.C., de Carufel J., Aghili F. Task verification facility for the Canadian special purpose dexterous manipulator. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Detroit, Michigan, 1999, pp. 1077–1083.
- [4] Jaar G., Bélanger F., HarvieD. and Lord K. Advanced Robotics Simulations in the MOTS. *Proceedings of the 31st International Symposium on Robotics*, May14–17, 2000, Montréal, Québec, Canada, pp. 504–509.
- [5] Sellmaier F., Boge T., Spurmann J., Gully S., Rupp T., Huber F. On-Orbit Servicing Missions: Challenges and solutions for Spacecraft Operations. *AIAA Space Ops 2010 Conference*, Huntsville, Alabama, USA, 2010, p. 2159.
- [6] Лесков А.Г., Бажинова К.В., Морoshкин С.Д., Феоктистова Е.В. Построение моделей кинематики исполнительных механизмов манипуляционных роботов с использованием блочных матриц. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 9, с. 58.
- [7] Лесков А.Г., Бажинова К.В., Илларионов В.В., Калеватых И.А., Морoshкин С.Д. Опыт создания и применения функционально-моделирующих стендов манипуляционных роботов. *Пилотируемые полеты в космос: матер. 11-й междунар. науч.-практ. конф., ФГБУ НИИ ЦПК. — Звездный городок, ноябрь 2015*, с. 91–93.

Hybrid Modeling of Operations of Space Manipulation Robots

© | Leskov A.G.¹
Illarionov V.V.²

leskov@bmstu.ru
c8.df.mgtu@gmail.com

¹ BMSTU, Moscow, 105005, Russia

² Dmitrov branch of the Bauman Moscow State Technical University,
village Orevo, 141801, Russia

Abstract the article describes the structure of the Hybrid Simulating Testbed (HST) — a complex designed for ground-based testing of space robots (SR) missions and ground-based training of operators of such robots. Creation of such HST is a hot topic of interest all over the world. Thorough preliminary preparation and testing of operations in ground conditions are necessary because of the complexity and high cost of spacecraft, and significant risks for astronauts when working in outer space. An effective method for solving these problems is hybrid modeling of the processes of robot operations using physical models of spacecraft elements and SR and operator interfaces. In this case, the kinematics and dynamics of the ongoing processes are simulated by personal computers. The main feature of

the described testbed is the reproduction of SR operations at the physical level using standard models of industrial robots.

Keywords: *space robot, gripper, hybrid simulation, computer vision, force-torque sensor*