

УДК 685.5

## **Разработка алгоритмов и программного обеспечения для моделирования динамики объектов манипулирования космических роботов в наземных условиях**

*Феоктистова Е.В., студент*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Специальная робототехника и мехатроника»*

*Баженова К.В., студент*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Специальная робототехника и мехатроника»*

*Научный руководитель: Лесков А.Г., д.т.н., профессор*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана*

[kafsm7@sm.bmstu.ru](mailto:kafsm7@sm.bmstu.ru)

### **Актуальность задачи**

Космические манипуляционные роботы (КМР) – одно из важных направлений развития современной космонавтики. Среди операций, выполняемых КМР, – сборка и обслуживание объектов, разнообразные монтажные и сервисные операции. Примерами могут служить КМР международной космической станции - SRMS, SSRMS, JEMRMS, ERA. Сложность и дороговизна КМР, а также объектов манипулирования, обуславливают необходимость предварительной тщательной отработки операций КМР в наземных условиях. Наиболее эффективный метод решения этой задачи, особенно при отработке контактных операций, – полунатурное моделирование с использованием макетов КМР и объектов манипулирования (ОМ). Метод полунатурного моделирования позволяет воспроизводить динамику процессов на физическом уровне, что дает возможность максимально приблизить условия моделирования к реальным.

### **Метод решения**

Один из способов реализации полунатурных моделей - в виде стендов [1, 2], в составе которых представлены компьютерные модели КМР и ОМ, промышленные роботы, силомоментные датчики (СМД) и другие средства управления и очувствления, имеющиеся в составе реальных КМР.

Схема стенда для моделирования динамики ОМ представлена на рис.1. На рисунке 1 обозначено:

ПР – промышленный робот,

<http://sntbul.bmstu.ru/doc/596104.html>

СМД – 6-ти компонентный силомоментный датчик,

ОМ – объект манипулирования.

СУ ПР – система управления ПР.

Пунктирные стрелки обозначают направление передачи данных.

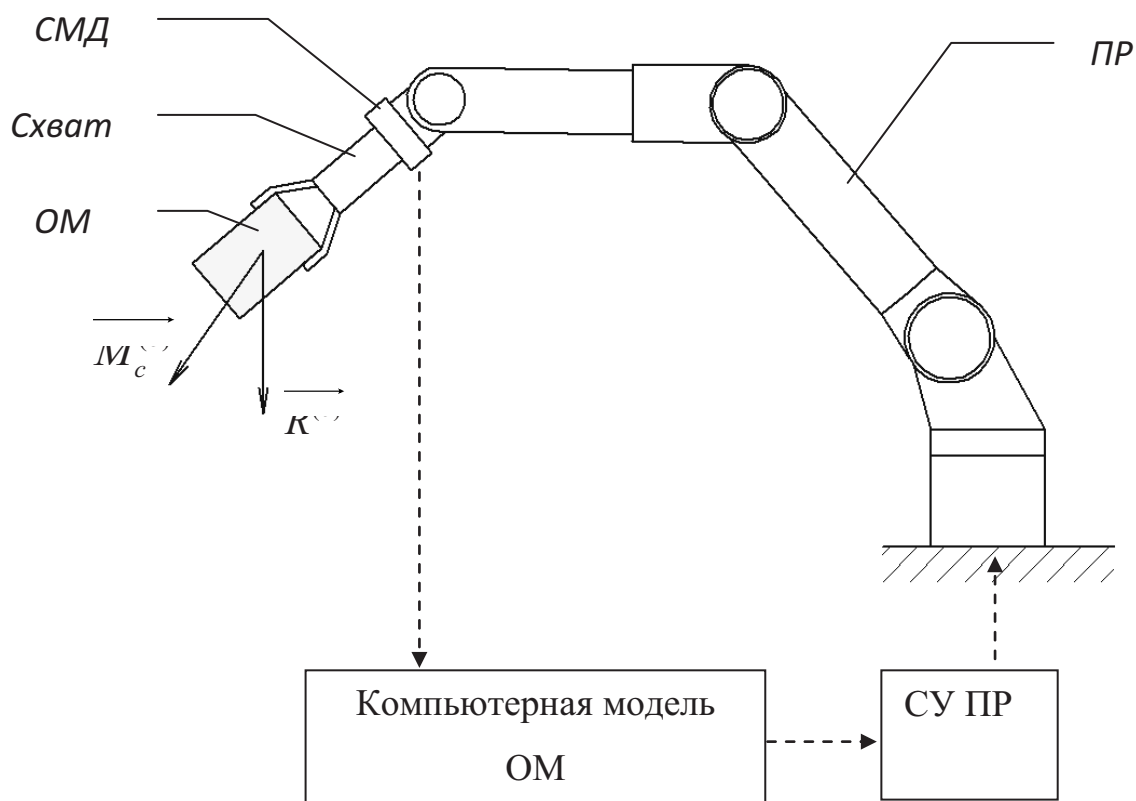


Рис. 1. Схема стенда для полунатурного моделирования КМР

Компьютерная модель ОМ представляет собой реализованную на отдельном компьютере модель динамики свободного движения ОМ

$$M \frac{d\vec{v}_c}{dt} = \vec{K}, \quad (1)$$

$$\frac{d\vec{\Pi}_c}{dt} = \vec{M}_c, \quad (2)$$

где  $M$  – масса объекта;

$V_c$  – линейная скорость движения центра масс;

$R^{(6)}$  – главный вектор внешних сил, приложенный к объекту;

$M_c^{(6)}$  – главный момент внешних сил;

$K_c$  – кинетический момент тела относительно центра масс, причем

$\vec{K}_c = I\vec{\omega}$ , где  $I$  – тензор инерции, а  $\vec{\omega}$  – угловая скорость тела.

Принцип работы стенда состоит в следующем.

На запястье промышленного робота закреплен шестикомпонентный силомоментный датчик. Датчик измеряет действующие на ОМ силы и моменты, которые соответствуют векторам  $R^{(6)}$  и  $M_c^{(6)}$  в уравнениях (1) и (2). Эти силы и моменты по каналам связи передаются в компьютерную модель ОМ.

Уравнения (1), (2) разрешаются относительно векторов линейных и угловых координат ОМ относительно выбранной базовой системы координат (СК). Вычисленные координаты ОМ по каналам связи передаются на вход СУ ПР. В результате схват ПР совершает пространственные перемещения относительно базовой СК, соответствующие перемещениям ОМ.

Недостатком такой схемы является то, что при моделировании в наземных условиях на ОМ помимо реальных действуют силы и моменты, обусловленные гравитацией.

Этот недостаток можно компенсировать путем соответствующей коррекции сигналов СМД.

Для этого вектор  $R^{(6)}$  представим в виде

$$\vec{K}^{(6)} = \vec{F}_\partial + \vec{F}_T \quad (3)$$

Где  $F_\partial$  – вектор внешних сил, действующих на объект; этот вектор включает силы контактного взаимодействия с внешней средой,

$F_T$  – вектор сил тяжести, действующих на объект при манипулировании в условиях земной гравитации.

Вектор  $M_c^{(6)}$  – представим в виде

$$\vec{M}_c^{(6)} = \vec{M}_\partial + \vec{M}_T \quad (4)$$

где  $M_\partial$  – вектор моментов от действия внешних сил,

$M_T$  – вектор моментов от действия сил тяжести.

При этом будем иметь в виду, что в качестве ОМ нужно рассматривать также захватные устройства и другое оборудование КМР, размещенное на ЗУМ.

В полунатурной модели СМД формирует векторы  $R^{(e)}$  и  $M_c^{(e)}$ , включающие как представляющие интерес компоненты  $F_\partial$  и  $M_\partial$ , так и компоненты  $F_T$ ,  $M_T$ , обусловленные действием сил тяжести. Эти компоненты отсутствуют в условиях невесомости и поэтому должны быть исключены при моделировании.

Для решения этой задачи в уравнения (3) и (4) добавим компоненты  $F_k$  и  $M_k$ , равные и противоположные по знаку векторам  $F_T$  и  $M_T$  соответственно.

Обозначим

$m_c$  - массу ОМ,

$\vec{l}_{CGFTS}$  - вектор, связывающий начало системы координат СМД и центр масс ОМ,

$\tau_{FTS,G}$  - матрицу поворота от базовой СК к СК датчика.

Полагая эти параметры известными, вычислим векторы

$$\vec{I}'_K = -\tau_{FTS,G} \cdot m_c \cdot \vec{g}$$

и

$$\vec{M}I_K = \vec{I}'_K \cdot \vec{l}_{CGFTS}$$

В приведенных выше выражениях обозначено  $g$  – ускорение свободного падения.

Прибавив эти векторы в уравнения (3), (4), то есть представив векторы измерений СМД в виде

$$\vec{K}'' = \vec{I}'_\partial + \vec{I}'_T + \vec{I}'_K = \vec{I}'_\partial + \vec{I}'_T - \tau_{FTS,G} \cdot m_c \cdot \vec{g}$$

$$\vec{M}c'' = \vec{M}_\partial + \vec{M}_T + \vec{M}I_K = \vec{M}_\partial + \vec{M}_T - \tau_{FTS,G} \cdot m_c \cdot \vec{g} \cdot \vec{l}_{CGFTS}$$

получим решение поставленной задачи.

Решение поставленной задачи выполнено на программном уровне в виде «модуля обезвешивания» двумя способами:

- с использованием в операционной системе Windows (на языке программирования C#),
- с использованием ОС Linux (язык C++).

## **Реализация «модуля обезвешивания» в операционной системе Windows (на языке программирования C#)**

Реализация решения на C# представляет собой метод, интегрированный в существующие программы управления движением манипуляционных роботов Kawasaki FS020N. Входными переменными модуля являются угловые координаты положения схвата в базовой системе координат манипулятора и данные, приходящие с СМД.

В теле происходит расчет матрицы поворота системы координат ОМ относительно базовой СК и ее транспонирование. С использованием этой матрицы осуществляется расчет векторов сил и моментов, вызванных весом ОМ, в системе координат СМД. После этого, из данных, полученных СМД, вычитаются пересчитанные значения силы тяжести ОМ и моментов, обусловленных ее действием.

Программа предусматривает устранение погрешностей определения сил и моментов, обусловленных свойствами матрицы калибровки СМД и особенностями установки СМД.

В процессе решения задачи была выявлена погрешность установки ПР относительно горизонтальной плоскости. Погрешность установки приводит к наклону базовой системы координат манипулятора относительно вертикали, что влечет появление постоянных паразитных составляющих сил и моментов на СМД. Для устранения этой погрешности были экспериментально определены углы отклонения поверхности пола относительно горизонтальной плоскости, эти углы учитываются в алгоритме вычисления матрицы поворота в виде констант.

Выходным параметром модуля является вектор сил и моментов, полученный от СМД, за вычетом составляющих, вызванных весом ОМ, с учетом погрешности установки манипулятора и начальных статических составляющих показаний датчика.

Модуль вызывается в основном теле программы имитации невесомости перед расчетом скорости и направления движения манипуляционного робота.

## **Реализация «модуля обезвешивания» в ОС Linux (язык C++)**

Решение задачи обезвешивания ОМ для операционной системы Linux реализовано на языке программирования C++ с использованием системы Robot Operating System (ROS) [4]. Целью ROS является объединение готовых решений и наработок в единую среду. Для ROS опубликованы драйверы, позволяющие работать со многими устройствами, также ROS содержит вспомогательные библиотеки и приложения для роботов.

Таким образом, для программ взаимодействия и управления роботом, ROS играет роль операционной системы, предоставляя программам управления свои интерфейсы, библиотеки и готовые приложения.

<http://sntbul.bmstu.ru/doc/596104.html>

Технически решение поставленной задачи оформлено в виде отдельного узла, осуществляющего не только необходимые вычисления, но и обмен с другими узлами сообщениями заданного типа (данными ROS, используемыми при подписке, или публикациями на тему).

Данный узел «подписывается» на темы для приема сообщений об угловых координатах положения ОМ в базовой системе координат манипулятора и сообщений о силах и моментах, приходящих с СМД. В теле программы выполняется расчет, аналогичный описанному выше для программы, реализованной на языке программирования С#. Узел создает тему для обмена сообщениями о величине сил и моментов с учетом компенсации влияния веса схвата.

Узел можно использовать в качестве готового решения для объединения с другими узлами в единую систему управления манипуляционным роботом.

С целью исследования свойств разработанного алгоритма был проведен эксперимент. Базу исследований составил полунатурный функционально-моделирующий стенд (ФМС) [1]. Внешний вид экспериментального стенда представлен на рисунках 2, 3. На запястье 6-степенного промышленного робота Kawasaki FS20N установлен шестикомпонентный силомоментный датчик фирмы Schunk. Робот оснащен собственной стойкой управления (D-контроллер), в которой реализованы функции тактической системы управления (ТСУ). Для управления ПР от ЭВМ используется шлюз: сервер, размещенный в памяти контроллера, и клиент на ЭВМ, которые обмениваются данными по сети Ethernet по протоколу TCP/IP. На СМД робота установлен электрический центрирующий трехпальцевый захват EZN-64.



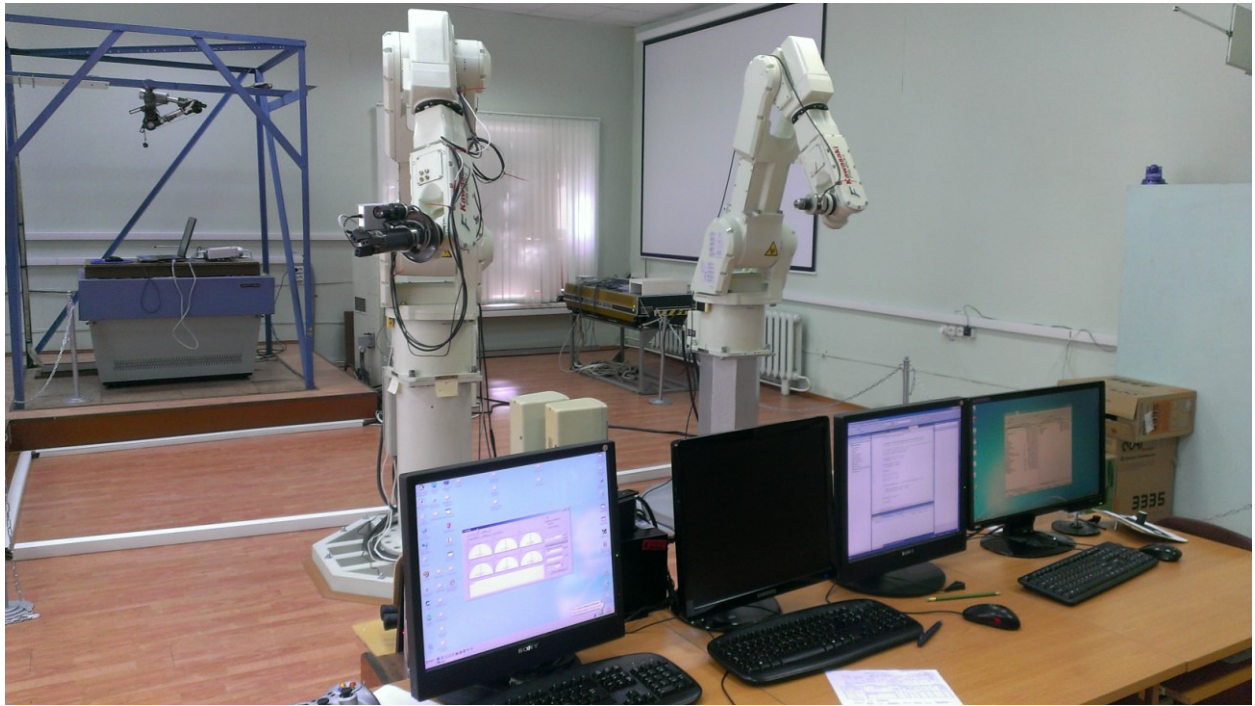


Рис. 2. Внешний вид станда для полунатурного моделирования КМР

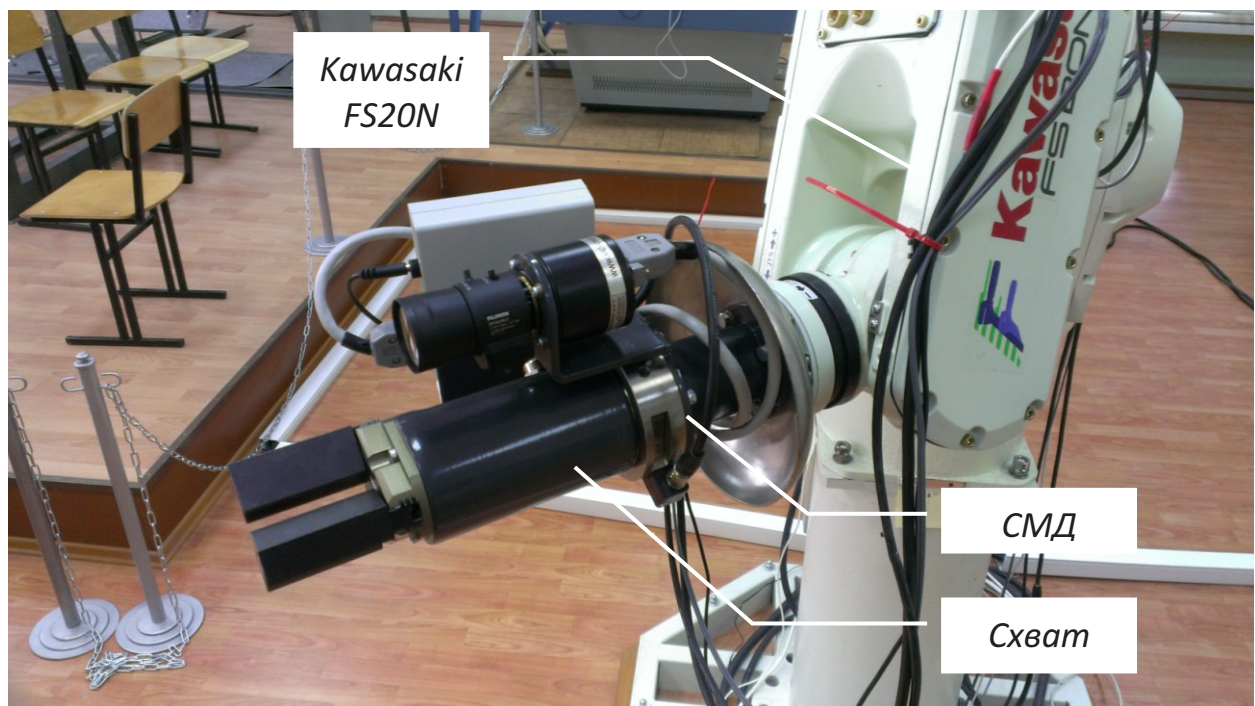


Рис. 3. Оснастка станда для эксперимента с имитацией движения в невесомости

На рис. 4 представлены результаты эксперимента с имитацией движения в невесомости. На графике кривая 1 отражает реальные силы, регистрируемые СМД,

<http://sntbul.bmstu.ru/doc/596104.html>

установленным на МР, по оси x, кривая 2 – y, кривая 3 – z. Скорректированные силы обозначены кривыми 4 – по оси x, 5 – по оси y, 6 – по оси z.

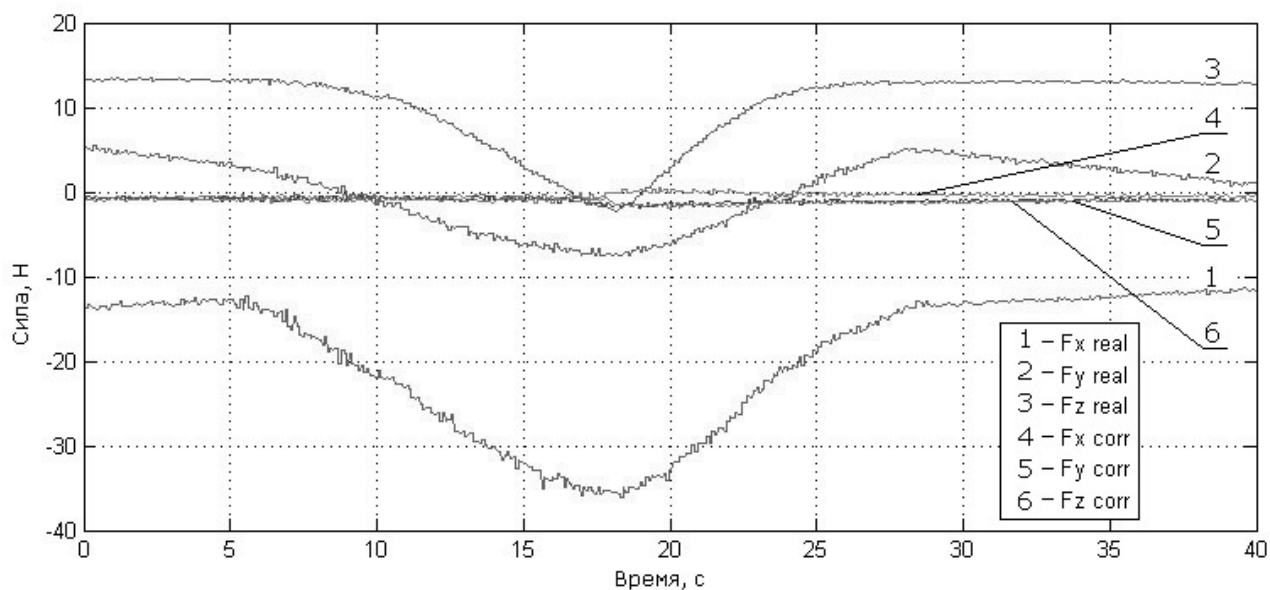


Рис. 4. Силы при имитации движения МР в невесомости

По графикам можно судить, что реализованный «модуль обезвешивания» осуществляет компенсацию сил и моментов, возникающих в результате влияния на СМД сил тяжести объектов манипулирования.

### Заключение

В статье представлены результаты разработки и исследования алгоритмов и программного обеспечения, позволяющих проводить полунатурное моделирование операций космических манипуляционных роботов в наземных условиях с компенсацией сил и моментов, обусловленных действием сил гравитации.

Программное обеспечение представляет собой исполняемые модули для компьютеров, работающих под управлением ОС Windows и ОС ROS. Программное обеспечение реализовано таким образом, что позволяет компоновать полученные программы-модули в различные программные системы без изменения их кода.

### Список литературы

1. Лесков А.Г., Илларионов В.В., Лескова С.М., Полухин В.И. Полунатурный функционально-моделирующий стенд в задачах исследования и подготовки операторов космических манипуляционных роботов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение, 2011. № спецвыпуск : Экспериментальные исследования перспективных материалов, конструкций и систем. - С. 100-118.



2. Лесков А. Г. Теоретические основы моделирования и анализа динамики манипуляционных роботов, их приложение к задачам проектирования и подготовки операторов : дис... дтн. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. - 329 л.
3. Медведев В.С., Лесков А.Г., Ющенко А.С. Системы управления манипуляционных роботов. М.:Наука, 1978. 416 с.
4. Robot Operating System / Introduction [Электронный ресурс]. 2012. URL: <http://www.ros.org/wiki/ROS/Introduction> (дата обращения: 13.04.2013г.).