

Моделирование режимов управления бортовыми космическими летающими роботами в системах виртуального окружения

Е.В. Страшнов¹✉, Д.А. Кононов²

¹ НИЦ «Курчатовский институт» – НИИСИ, г. Москва, 117218, Россия

² Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, 117997, Россия

Ссылка для цитирования

Страшнов Е.В., Кононов Д.А. Моделирование режимов управления бортовыми космическими летающими роботами в системах виртуального окружения // Программные продукты и системы. 2025. Т. 38. № 4. С. 608–616. doi: 10.15827/0236-235X.152.608-616

Информация о статье

Группа специальностей ВАК: 2.3.7

Поступила в редакцию: 09.06.2025

После доработки: 01.07.2025

Принята к публикации: 23.07.2025

Аннотация. В работе рассматривается задача управления моделями бортовых космических летающих роботов в виртуальной среде. Для ее решения предлагаются методы, основанные на командном, полуавтоматическом и супервизорном режимах управления роботом. Эти режимы характеризуют степень участия человека-оператора в процессе управления. При командном режиме оператор воздействует на органы управления для выполнения команд, каждая из которых отвечает за движение соответствующей части робота. Полуавтоматический способ предполагает участие оператора в управлении только рабочим органом манипулятора. В супервизорном режиме оператор задает команды, по каждой из которых робот совершает некую последовательность действий, и контролирует ход их выполнения. Предлагаемые подходы управления реализованы в рамках решения задач навигации внутри виртуального пространства, захвата поручня манипулятором робота внутри космической станции и стыковки с док-станцией. Были задействованы решения, включающие построение пути движения робота, расчет инверсной кинематики, обеспечение обратной связи по показаниям виртуальных датчиков и вычисление магнитной силы для его удержания во время стыковки с док-станцией. Апробация разработанных подходов проводилась в программном комплексе виртуального окружения VirSim на примере управления виртуальной моделью летающего космического робота с применением реального джойстика. Результаты моделирования показали, что наиболее подходящим решением для космической отрасли является супервизорный режим, в то время как командный и полуавтоматический применимы для решения нетиповых задач под полным контролем человека. Проведен анализ движения летающих роботов при их моделировании в виртуальном окружении. Практическая значимость полученных в статье результатов заключается в возможности сформировать экспертное мнение о применении роботов и методов управления ими для решения различных задач внутри космических модулей.

Ключевые слова: моделирование, манипулятор робота, системы виртуального окружения, бортовой космический летающий робот, режимы управления

Благодарности. Публикация выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» – НИИСИ по теме № FNEF-2024-0002 «Математическое моделирование многомасштабных динамических процессов и системы виртуального окружения»

Введение. В настоящее время космонавты выполняют ряд работ, связанных с обслуживанием модулей МКС, разгрузкой доставляемых на станцию грузов, проведением научных экспериментов и т.д. Некоторые задачи являются рутинными и занимают существенное время. Для помощи космонавтам активно разрабатываются летающие роботы, способные функционировать внутри модулей МКС, например, Astrobee, оснащенный камерами различного типа и содержащий манипулятор для его фиксации посредством захвата специального поручня внутри станции [1]. Он работает внутри МКС, но в будущем планируется его применение на борту лунной орбитальной станции Lunar Gateway для ее обслуживания в отсутствие экипажа. Для выполнения практических задач внутри космических модулей необходима разработка

системы управления данным роботом. Однако тестирование разрабатываемых решений в земных условиях осложняется необходимостью реализовать невесомость. Альтернативный подход состоит в применении систем виртуального окружения – апробация систем управления осуществляется в виртуальной среде. Данная статья посвящена разработке методов управления виртуальными моделями бортовых космических летающих роботов, что является важной и актуальной задачей.

Существующие решения для управления роботами различаются в зависимости от степени участия человека. Один из вариантов – категория биотехнических систем управления: оператор находится на Земле или в другом безопасном месте и осуществляет дистанционное управление с помощью специального пульта

на основе визуальной информации, получаемой с камер робота. В космической отрасли активно применяются манипуляционные роботы, в которых необходимо обеспечить управление манипулятором, захват объектов [2, 3] и т.п. Частным случаем являются антропоморфные роботы, подобные по своему строению человеку (полностью или частично), для них возможно управление в копирующем режиме [4] с помощью экзоскелета, надеваемого на человека. Другой способ управления манипуляционными роботами использует перчаточный интерфейс [5, 6] с реализацией кинестетического взаимодействия руки человека с объектами внешней среды посредством обратной связи, передаваемой на органы управления роботом. Одна из проблем рассматриваемой задачи – при нахождении оператора на Земле получение изображений с камер робота и передача управляющих воздействий может происходить с задержкой. Альтернативой является супервизорный режим управления [7], в котором робот получает команду и самостоятельно производит необходимые действия для ее выполнения. Команду можно подавать нажатием одной кнопки пульта управления, голосом, жестом и т.п. При этом оператор следит за ходом выполнения действий и в случае необходимости вмешивается в процесс, передавая дополнительные команды. В настоящее время рассматривается ограниченный класс задач, которые робот выполняет в автоматическом режиме на основе заранее подготовленных программ [8, 9].

В данной работе предлагаются методы реализации командного, полуавтоматического и супервизорного режимов управления бортовыми космическими летающими роботами в системах виртуального окружения. При этом предполагается, что оператор осуществляет управление роботом на основе изображений виртуальных камер, установленных как на самом роботе, так и внутри виртуальной сцены. Предлагаемые решения включают управление движением основной части (корпуса) робота, а также его манипулятором и захватным устройством. Обратная связь в системе управления роботом реализована на основе показаний виртуальных датчиков, измеряющих положение и ориентацию составных частей робота в рабочем пространстве. Апробация разработанного авторами комплекса виртуального окружения VirSim проводилась с применением реального джойстика на примере перемещения робота в виртуальной среде, захвата поручня манипулятором и стыковки с док-станцией.

Задача управления бортовым космическим летающим роботом

Рассмотрим бортовой космический летающий робот (рис. 1), состоящий из базового звена (БЗв), N -звенного манипулятора и рабочего органа (РО) манипулятора (захватного устройства). Для описания его движения введем мировую систему координат $OXYZ$, а также локальные системы координат $O_b x_b y_b z_b$ БЗв и $O_e x_e y_e z_e$ РО. Тогда положение БЗв робота относительно мировой системы координат задается радиус-вектором $\mathbf{r}_b = (x_b, y_b, z_b)^T$, а ориентация – тремя углами Эйлера $\mathbf{a}_b = (\varphi_b, \theta_b, \psi_b)^T$ поворотов вокруг осей x_b, y_b и z_b соответственно. В свою очередь, движение манипулятора робота определяется углами поворотов $q_i, i = \overline{1, N}$ в его сочленениях. На основе координат робота и его манипулятора вычисляется положение $\mathbf{r}_e = (x_e, y_e, z_e)^T$ относительно мировой системы координат РО и его ориентация, задаваемая углами $\mathbf{a}_e = (\varphi_e, \theta_e, \psi_e)^T$ поворотов вокруг осей x_e, y_e и z_e соответственно. Кинематика БЗв и РО манипулятора робота определяется через линейные и угловые скорости, которые обозначим через $\mathbf{v}_b, \boldsymbol{\omega}_b, \mathbf{v}_e$ и $\boldsymbol{\omega}_e$. Рассматриваемый летающий робот содержит набор исполнительных устройств, среди которых M устройств позволяют управлять БЗв робота, а N – манипулятором робота. В качестве управляющих параметров используются переменные $\mathbf{u} = (\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2)^T$, где $\dim(\mathbf{u}_1) = M, \dim(\mathbf{u}_2) = N$.

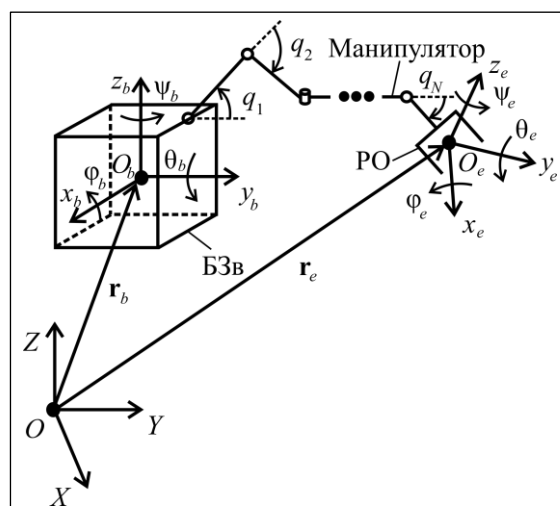


Рис. 1. Структура летающего робота с манипулятором

Fig. 1. Structure of flying robot with manipulator

Обратная связь в системе управления роботом реализуется с помощью показаний датчиков, на основе которых вычисляются значения координат $\mathbf{r}_b, \mathbf{a}_b, \mathbf{r}_e, \mathbf{a}_e$ и q_i , а также скорости $\mathbf{v}_b, \boldsymbol{\omega}_b, \mathbf{v}_e, \boldsymbol{\omega}_e$ и $\dot{q}_i, i = \overline{1, N}$.

Управление бортовым космическим летающим роботом включает управление движением БЗв робота, его манипулятора и РО. Для управления БЗв робота искомая задача заключается в том, чтобы обеспечить изменение координат БЗв по законам $\mathbf{r}_b^d = \mathbf{r}_b^d(t)$ и $\mathbf{a}_b^d = \mathbf{a}_b^d(t)$. Задача управления манипулятором робота формулируется в поддержании заданных углов поворотов в сочленениях: $q_i^d = q_i^d(t), i = \overline{1, N}$. При управлении РО манипулятора задача сводится к обеспечению его положения и ориентации по законам $\mathbf{r}_e^d = \mathbf{r}_e^d(t)$ и $\mathbf{a}_e^d = \mathbf{a}_e^d(t)$. В частном случае управление роботом осуществляется путем задания скоростей БЗв, манипулятора и РО в виде $\mathbf{v}_b^d = \mathbf{v}_b^d(t), \boldsymbol{\omega}_b^d = \boldsymbol{\omega}_b^d(t), \dot{q}_i^d = \dot{q}_i^d(t), \mathbf{v}_e^d = \mathbf{v}_e^d(t), \boldsymbol{\omega}_e^d = \boldsymbol{\omega}_e^d(t)$. Цель управления летающим роботом состоит в том, чтобы найти управляющие переменные \mathbf{u} , которые реализуют требуемое движение робота.

Командный, полуавтоматический и супервизорный режимы управления будут рассматриваться в контексте решения летающим роботом ряда задач, куда входит его навигация внутри космических модулей, захват поручня манипулятором, стыковка с док-станцией и т.п. Опишем подробнее предлагаемые решения для реализации этих режимов управления и проанализируем их преимущества и недостатки.

Командный режим управления роботом. Человек-оператор осуществляет управление каждой степенью свободы робота по отдельности. Предлагаемая схема для реализации такого режима показана на рисунке 2. В этом режиме

оператор определенным способом задает команды, число которых равно $K = 6 + N$, для управления перемещением и поворотами БЗв летающего робота (6 степеней свободы), а также углами в сочленениях его манипулятора. Команды поступают в систему управления, обрабатываются, и на их основе формируются целевые координаты БЗв и углы поворотов манипулятора. Регулятор обеспечивает синтез управляющих \mathbf{u} для достижения целевых координат робота. При этом используются только показания тех датчиков, которые измеряют координаты БЗв и углы поворотов манипулятора робота. Данная схема управления летающими роботами в командном режиме была применена в программном комплексе системы виртуального окружения.

Преимущество командного режима заключается в возможности управлять роботом в недетерминированных условиях, когда окружающая обстановка заранее неизвестна и задачи формируются в процессе управления. При этом успешность их выполнения непосредственно зависит от навыков и умений оператора, полученных во время его обучения. Однако такой подход в большинстве случаев непригоден для космической отрасли, так как из-за запаздываний в передаче управляющих команд оператор, находящийся на Земле, не может полноценно управлять роботом. С другой стороны, управление роботом на борту космической станции теряет смысл по причине необходимости освобождения космонавтов от рутинной работы. При этом командный режим важен в экстренных случаях при переходе на ручное управление.

Полуавтоматический режим управления роботом. Человек непосредственно управляет только РО манипулятора робота, а сами координаты составных частей вычисляются путем

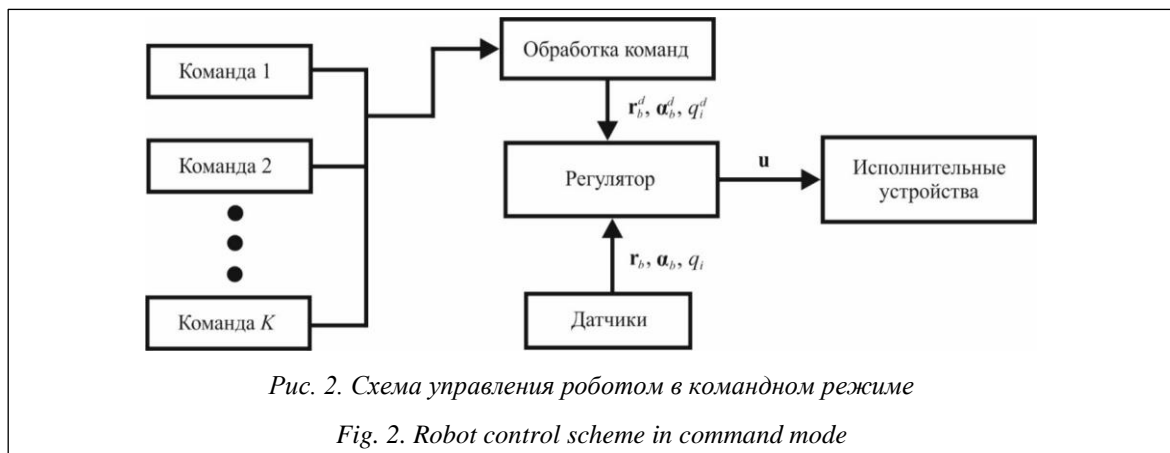


Рис. 2. Схема управления роботом в командном режиме

Fig. 2. Robot control scheme in command mode

решения задачи инверсной кинематики. Предлагаемая схема для реализации полуавтоматического режима показана на рисунке 3, в ней всего шесть команд управления по каждой степени свободы РО (перемещения вдоль осей и повороты вокруг осей). Эти команды поступают в систему управления для обработки, и на основе датчиков, установленных на РО робота, формируются целевые координаты РО r_e^d и α_e^d , исходя из которых решается задача инверсной кинематики для вычисления координат r_b^d , α_b^d и q_i^d , $i = \overline{1, N}$. Затем регулятор по целевым координатам БЗв робота и его манипулятора аналогично командному режиму формирует вектор управлений u . Данная схема управления летающими роботами в полуавтоматическом режиме была реализована в виде программных модулей для системы виртуального окружения.

Преимуществом полуавтоматического режима является возможность выполнения манипуляционных задач путем непосредственного воздействия на РО робота. При этом все равно требуется непрерывное участие человека в процессе управления роботом, что накладывает ограничения в случае, если оператор находится на Земле.

Супервизорный режим управления роботом. Человек-оператор задает команды, по которым робот автономно выполняет набор простых действий согласно заданной программе. При этом оператор следит за ходом выполнения действий на экране монитора и корректи-

рует их в зависимости от той или иной ситуации. Для реализации супервизорного режима предлагается схема на рисунке 4. В схеме каждая из S команд оператора имеет свой приоритет, в зависимости от которого задается специальная реакция при поступлении в систему управления роботом новой команды. В предлагаемой реализации наивысший приоритет имеет команда перехода на ручное управление, а также принудительной остановки, далее идет команда возврата в исходную (начальную) позицию. Остальные имеют одинаковый приоритет, и в этом случае следующая команда будет выполнена только после того, как закончится предыдущая. В представленной схеме приоритет задается и обрабатывается с помощью фильтра команд. Команда состоит из набора действий K_s , $s = \overline{1, S}$, которые выполняются последовательно с вычислением целевых координат БЗв робота, его манипулятора и РО. Они передаются в регулятор, осуществляющий синтез управления u роботом с применением показаний датчиков. По завершении всех действий в фильтр команд передается соответствующее сообщение. Данная схема управления космическими летающими роботами в супервизорном режиме была применена в программном комплексе виртуального окружения.

Основное преимущество супервизорного режима заключается в минимальном участии человека в процессе управления роботом, что крайне важно для космической отрасли. Сложность его реализации заключается в программировании автономных действий робота, где

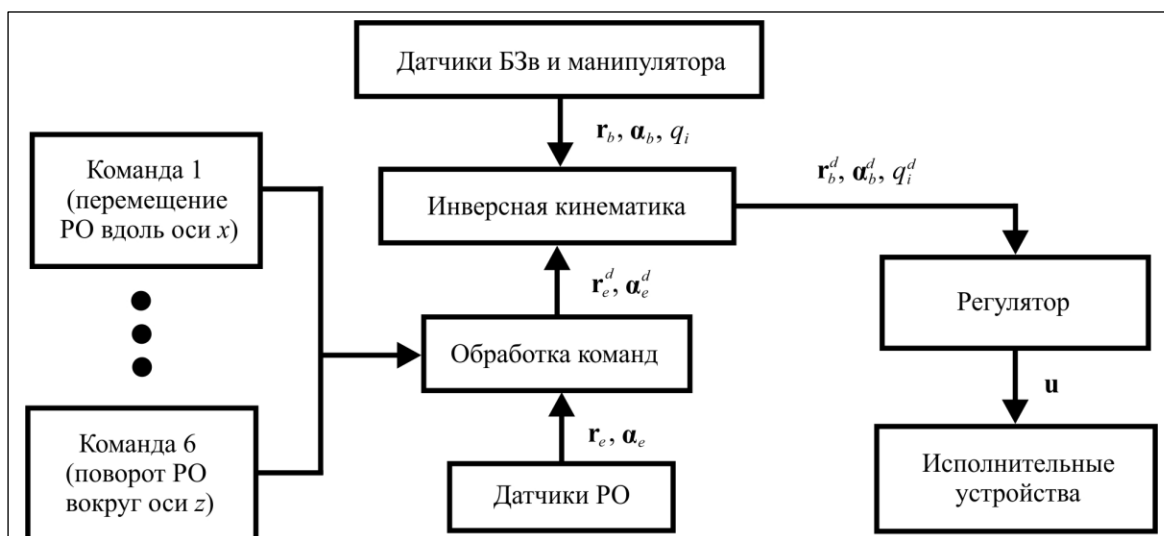
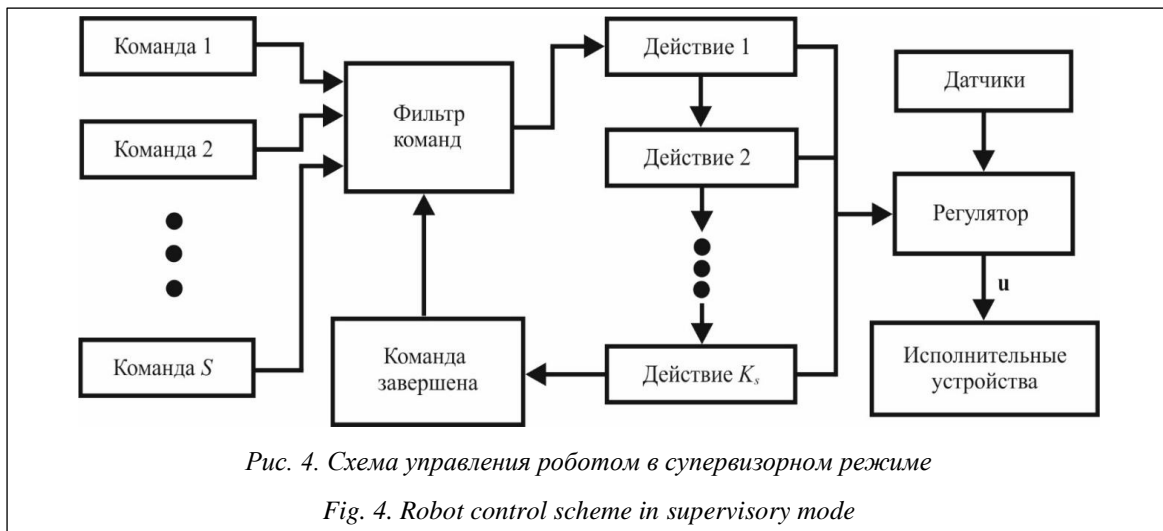


Рис. 3. Схема управления роботом в полуавтоматическом режиме

Fig. 3. Robot control scheme in semi-automatic mode



существенную роль играет точность показаний датчиков и другая информация об окружающей среде (например, форма и размеры препятствий). Поэтому супервизорный режим больше пригоден для детерминированной среды с заранее известным набором задач.

Результаты моделирования

Представленные в статье методы управления бортовыми космическими летающими роботами реализованы в программном комплексе виртуального окружения VirSim [10], состоящего из подсистем

- управления, где реализован расчет функциональных схем для синтеза управляющих воздействий, передаваемых на исполнительные устройства роботов и других управляемых объектов;
- динамики, где выполняется вычисление координат виртуальных объектов, согласно математическим моделям, базирующимся на законах физики;
- визуализации, которая осуществляет рендеринг виртуальной сцены в масштабе реального времени на основе новых координат объектов.

Для тестирования разрабатываемых решений создана виртуальная модель летающего робота (рис. 5). Его основная часть имеет форму куба, к которой крепится двухзвенный манипулятор с РО, представляющим собой захватное устройство. В качестве исполнительных устройств БЗв робота используются регулируемые реактивные сопла, через которые выбрасывается воздух, поступающий внутрь робота через два вентилятора. Манипулятор и его РО управляются посредством электро-

приводов, установленных в их сочленениях. Обратная связь для рассматриваемой модели реализуется с помощью виртуальных датчиков, измеряющих положение и ориентацию составных частей робота, а также дальномеров на каждой его стороне, определяющих расстояния до ближайших препятствий. Кроме того, для мониторинга выполнения задач робот оснащен набором виртуальных камер.

Апробация режимов управления летающим роботом проводилась с помощью реального джойстика Saitek Cyborg Evo на примере решения ряда задач. Во время тренировки на монитор оператора выводятся изображения виртуальных камер в многопортовом режиме (рис. 6). В командном режиме отклонения рукоятки и регулятора газа джойстика обеспечивают перемещение робота во всех направлениях и поворот вокруг оси по каналу рыскания (поворот вокруг оси z). Таким же способом осуществля-

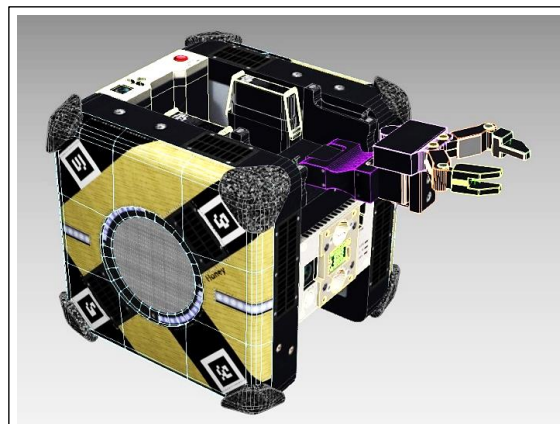


Рис. 5. Виртуальная модель летающего робота

Fig. 5. Virtual model of flying robot



Рис. 6. Стенд управления летающим роботом

Fig. 6. Flying robot control stand

ется управление манипулятором и РО робота. В полуавтоматическом режиме отклонения рукоятки джойстика задают перемещение и повороты РО робота относительно его текущего состояния. Супервизорный режим реализуется путем нажатия кнопок джойстика, их номера определяют приоритет команд. При этом повторное нажатие кнопки сбрасывает команду из списка поступивших в систему управления команд. Например, нажатие на курок джойстика соответствует команде перехода на ручное управление роботом, на кнопку 2 – возврату робота в исходное состояние, на кнопку 3 – захвату поручня манипулятором робота и т.д.

Управление движением летающего робота основано на применении теории скользящих режимов. Для этого закон управления роботом реализован с использованием непрерывной функции гиперболического тангенса [11], что позволяет обеспечить его движение, переориентацию и стабилизацию. Синтез управления манипулятором осуществляется с помощью ПД-регуляторов для поворотов на заданные углы в сочленениях его звеньев. При этом управление движением РО робота реализуется путем решения задачи инверсной кинематики итерационным методом покоординатного спуска [12]. Предлагаемые решения для управления движением робота используются для построения регулятора в командном, полуавтоматическом и супервизорном режимах (рис. 2–4).

В первой задаче была рассмотрена навигация летающего робота в виртуальном окружении без столкновений с другими объектами. Для этих целей в командном и полуавтоматическом режимах были использованы показания дальномеров, расположенных на гранях робота. Тогда, если один из дальномеров показывает, что расстояние до ближайшего виртуального объекта меньше порогового значения, то движение в направлении соответствующей грани становится недоступным. В супервизорном режиме для навигации задается набор точек, по которым робот должен двигаться в зависимости от выполняемой им задачи. Чтобы реализовать такой подход, виртуальная сцена была представлена в виде трехмерной карты, а кратчайший путь между двумя заданными точками вычислялся посредством модификации алгоритма A* [13] для трехмерного графа. Как показало моделирование, каждый из режимов управления позволяет адекватно решать данную задачу. Однако командный и полуавтоматический режимы требуют большего участия оператора в процессе управления, а супервизорный пригоден только для детерминированной окружающей обстановки, где набор целевых точек заранее известен.

Вторая решаемая задача состояла в захвате манипулятором робота поручня внутри космического модуля и была представлена в виде набора подзадач: полет робота и его разворот рядом с поручнем, раскладывание манипулятора, захват поручня и повороты манипулятора в состоянии захвата. Моделирование показало, что в командном режиме затруднительно обеспечить необходимую точность операций, так как оператор ориентируется только на изображения, получаемые с камер. При этом полуавтоматический режим облегчает процесс захвата, так как управление осуществляется непосредственно РО робота. Наиболее подходящим способом для решения этой задачи оказался супервизорный режим, в котором рассматриваемые подзадачи хорошо вписываются в его идеологию, а координаты и геометрические размеры поручня заранее известны.

В третьей задаче была рассмотрена стыковка летающего робота с док-станцией, которая находится внутри космического модуля. Для успешного выполнения этой задачи конусы док-станции должны попасть внутрь специальных гнезд робота с погрешностью, не превышающей 1 см. После того как стыковка состоялась, робот посылает команду на док-станцию для перемещения магнита внутри конусов, по-

сле чего отключаются его двигатели. В таком состоянии робот удерживается за счет магнитной силы, вычисленной на основе уравнения взаимодействия магнитных диполей [14]. Для этой задачи успешным оказался только супервизорный режим, так как в нем все действия робот выполняет автоматически с использованием показаний датчиков, обеспечивая необходимую точность стыковки (<http://www.swsys.ru/uploaded/image/2025-4/7.jpg>). Расстыковка с док-станцией выполняется в обратном порядке: магнит внутри конусов док-станции возвращается в исходное состояние, после чего включаются двигатели летающего робота.

Заключение

В данной работе представлены три режима управления бортовыми космическими летающими роботами в системах виртуального окружения. Командный режим предоставляет возможность перехода на ручное управление, но больше пригоден для тех случаев, когда оператор находится в непосредственной близости от

робота. Полуавтоматический режим, являющийся модификацией первого, показал свою эффективность в задаче захвата поручня манипулятором робота. Существенную роль в управлении играет супервизорный режим, так как не требует постоянного участия человека в процессе управления.

Апробация в программном комплексе системы виртуального окружения на примере управления моделью летающего робота с помощью реального джойстика показала адекватность и эффективность предложенных в статье решений. Полученные результаты могут быть использованы для обучения операторов навыкам управления бортовыми космическими летающими роботами. Одно из возможных направлений дальнейших исследований заключается в решении других практических задач, связанных с переносом грузов внутри виртуальных моделей космических модулей. В перспективе могут быть задействованы технологии виртуальной реальности для тренировки операторов, которыми могут выступать сами космонавты.

Список литературы

1. Bualat M.G., Smith T., Fong T.W. et al. Astrobees: A new tool for ISS operations. Proc. SpaceOps Conf., 2018, pp. 1–11. doi: 10.2514/6.2018-2517.
2. Papadopoulou E., Aghili F., Ma O., Lampariello R. Robotic manipulation and capture in space: A survey. Front. Robot. AI, 2021, vol. 8. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/robotics-and-ai/articles/10.3389/frobt.2021.686723/full> (дата обращения: 01.06.2025). doi: 10.3389/frobt.2021.686723.
3. Turchetti F., Ekal M., Lii N.Y., Roa M.A. Analysis of intra-vehicular robotic free-flyers and their manipulation capabilities. Proc. IAC, 2024, pp. 1–15.
4. Алексеев В.И. Робототехника в космосе: история и перспективы развития // Вестн. РосНОУ. Сер. Сложные системы модели, анализ и управление. 2021. № 3. С. 40–52.
5. Кулаков Ф.М. Методы супервизорного телеуправления космическими роботами // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2019. № 5. С. 147–166. doi: 10.31857/S000233880002854-8.
6. Caccavale R., Saveriano M., Finzi A. et al. Kinesthetic teaching and attentional supervision of structured tasks in human–robot interaction. Autonomous Robots, 2019, vol. 43, pp. 1291–1307. doi: 10.1007/s10514-018-9706-9.
7. Sheridan T.B. Human supervisory control of automation. Handbook of Human Factors and Ergonomics, 2021, no. 28, pp. 736–760. doi: 10.1002/9781119636113.ch28.
8. Kwok-Choon S.T., Romano M., Hudson J. Orbital hopping maneuvers with Astrobees onboard the International Space Station. Acta Astronautica, 2023, vol. 207, pp. 62–76. doi: 10.1016/j.actaastro.2023.02.034.
9. Specht C., Bishnoi A., Lampariello R. Autonomous spacecraft rendezvous using tube-based model predictive control: Design and application. J. of Guidance, Control, and Dynamics, 2023, vol. 46, no. 7. URL: <https://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/1.G007280> (дата обращения: 01.06.2025). doi: 10.2514/1.G007280.
10. Михайлюк М.В., Мальцев А.В., Тимохин П.Ю. и др. Система виртуального окружения VirSim для имитационно-тренажерных комплексов подготовки космонавтов // Пилотируемые полеты в космос. 2020. № 4. С. 72–95. doi: 10.34131/MSF.20.4.72-95.
11. Страшнов Е.В., Михайлюк М.В. Моделирование в виртуальной среде движения летающих роботов внутри орбитальных космических станций // Мехатроника, автоматизация, управление. 2025. Т. 26. № 5. С. 260–267. doi: 10.17587/mau.26.260-267.
12. Aristidou A., Lasenby J., Chrysanthou Y., Shamir A. Inverse kinematics techniques in computer graphics: A survey. Computer Graphics Forum, 2018, vol. 37, no. 6, pp. 35–58. doi: 10.1111/cgf.13310.
13. Zhang H.Y., Lin W.M., Chen A.X. Path planning for the mobile robot: A review. Symmetry, 2018, vol. 10, no. 10, art. 450. doi: 10.3390/sym10100450.
14. Kim S.-W., Young P.S., Han J. Magnetization dynamics for magnetic object interactions. ACM TOG, 2018, vol. 37, no. 4, art. 121. doi: 10.1145/3197517.3201402.

Simulation of control modes for onboard space flying robots in virtual environment systemsEvgeniy V. Strashnov ^{1✉}, Dmitriy A. Kononov ²¹ National Research Centre “Kurchatov Institute”, SRISA,
Moscow, 117218, Russian Federation² V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS,
Moscow, 117997, Russian Federation**For citation**Strashnov, E.V., Kononov, D.A. (2025) ‘Simulation of control modes for onboard space flying robots in virtual environment systems’, *Software & Systems*, 38(4), pp. 608–616 (in Russ.). doi: 10.15827/0236-235X.152.608-616**Article info**

Received: 09.06.2025

After revision: 01.07.2025

Accepted: 23.07.2025

Abstract. This paper considers the task of onboard space flying virtual model robot control in a virtual environment. To solve this task, the authors propose methods based on command, semi-automatic, and supervisory control modes for the robot. These modes characterize the degree of human operator participation in the robot control process. In command mode, the operator affects the controls (buttons, switches or levers) to execute commands, each of which is responsible for the motion of corresponding robot link. The semi-automatic mode assumes the operator's participation only in end effector control of the robot's manipulator. In supervisory mode, the operator sends commands, in response to which the robot automatically performs a certain sequence of actions, while the human monitors the progress of their execution. The proposed control approaches are implemented for solving navigation tasks within virtual space, capturing handrails with the robot's manipulator inside the space station, and docking with the docking station. Implementation of robot control modes includes constructing the robot's motion path, solving inverse kinematics, providing feedback based on virtual sensor readings, and computing the magnetic force to hold the robot during docking with the docking station. The authors test the developed approaches in the VirSim virtual environment software complex, demonstrating control of a virtual space flying robot model using a physical joystick. The simulation results showed that the supervisory mode is the most suitable solution for the space industry, while the command and semi-automatic modes are applicable for solving non-standard tasks under full human control. The authors conducted an analysis of flying robot motion during their simulation in a virtual environment. The practical significance of the paper's results lies in their ability to form expert opinions on using robots and their control methods for various tasks inside space modules.

Keywords: simulation, robot's manipulator, virtual environment systems, onboard space flying robot, control modes

Acknowledgements. The publication is made within the state task of Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre “Kurchatov Institute” on topic no. FNEF-2024-0002 “Mathematical modeling of multiscale dynamic processes and virtual environment systems”

References

1. Bualat, M.G., Smith, T., Fong, T.W. et al. (2018) ‘Astrobee: A new tool for ISS operations’, *Proc. SpaceOps Conf.*, pp. 1–11. doi: 10.2514/6.2018-2517.
2. Papadopoulos, E., Aghili, F., Ma, O., Lampariello, R. (2021) ‘Robotic manipulation and capture in space: A survey’, *Front. Robot. AI*, 8, available at: <https://www.frontiersin.org/journals/robotics-and-ai/articles/10.3389/frobt.2021.686723/full> (accessed June 01, 2025). doi: 10.3389/frobt.2021.686723.
3. Turchetti, F., Ekal, M., Lii, N.Y., Roa, M.A. (2024) ‘Analysis of Intra-Vehicular robotic Free-Flyers and their manipulation capabilities’, *Proc. IAC*, pp. 1–15.
4. Alekseev, V.I. (2021) ‘Robotics in space: History and prospects of development’, *Bull. of RosNOU. Ser.: Complex Systems Models, Analysis and Control*, (3), pp. 40–52 (in Russ.).
5. Kulakov, F.M. (2019) ‘Supervisory telecontrol methods of space robots’, *Bull. of RAS. Theory and Control Systems*, (5), pp. 147–166 (in Russ.). doi: 10.31857/S000233880002854-8.
6. Caccavale, R., Saveriano, M., Finzi, A. et al. (2019) ‘Kinesthetic teaching and attentional supervision of structured tasks in human–robot interaction’, *Autonomous Robots*, 43, pp. 1291–1307. doi: 10.1007/s10514-018-9706-9.
7. Sheridan, T.B. (2021) ‘Human supervisory control of automation’, *Handbook of Human Factors and Ergonomics*, (28), pp. 736–760. doi: 10.1002/9781119636113.ch28.
8. Kwok-Choon, S.T., Romano, M., Hudson, J. (2023) ‘Orbital hopping maneuvers with Astrobee onboard the International Space Station’, *Acta Astronautica*, 207, pp. 62–76. doi: 10.1016/j.actaastro.2023.02.034.
9. Specht, C., Bishnoi, A., Lampariello, R. (2023) ‘Autonomous spacecraft rendezvous using tube-based model predictive control: Design and application’, *J. of Guidance, Control, and Dynamics*, 46(7), available at: <https://arc.aiaa.org/doi/epdf/10.2514/1.G007280> (accessed June 01, 2025). doi: 10.2514/1.G007280.
10. Mikhaylyuk, M.V., Maltsev, A.V., Timokhin, P.Yu. et al. (2020) ‘The VirSim virtual environment system for the simulation complexes of cosmonaut training’, *Manned Space Flights*, (4), pp. 72–95 (in Russ.). doi: 10.34131/MSF.20.4.72-95.
11. Strashnov, E.V., Mikhaylyuk, M.V. (2025) ‘Motion simulation in virtual environment of flying robots inside orbital space stations’, *Mechatronics, Automation, Management*, 26(5), pp. 260–267 (in Russ.). doi: 10.17587/mau.26.260-267.

12. Aristidou, A., Lasenby, J., Chrysanthou, Y., Shamir, A. (2018) 'Inverse kinematics techniques in computer graphics: A survey', *Computer Graphics Forum*, 37(6), pp. 35–58. doi: 10.1111/cgf.13310.

13. Zhang, H.Y., Lin, W.M., Chen, A.X. (2018) 'Path planning for the mobile robot: A review', *Symmetry*, 10(10), art. 450. doi: 10.3390/sym10100450.

14. Kim, S.-W., Young, P.S., Han, J. (2018) 'Magnetization dynamics for magnetic object interactions', *ACM TOG*, 37(4), art. 121. doi: 10.1145/3197517.3201402.

Авторы

Страшнов Евгений Владимирович¹,
старший научный сотрудник, strashnov_evg@mail.ru
Кононов Дмитрий Александрович²,
д.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник,
dmitrykon52@gmail.com

¹ НИЦ «Курчатовский институт» – НИИСИ,
г. Москва, 117218, Россия

² Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН,
г. Москва, 117997, Россия

Authors

Evgeniy V. Strashnov¹, Senior Researcher,
strashnov_evg@mail.ru
Dmitriy A. Kononov², Dr.Sci. (Engineering),
Associate Professor, Leading Researcher,
dmitrykon52@gmail.com

¹ National Research Centre “Kurchatov Institute”,
SRISA, Moscow, 117218, Russian Federation

² V.A. Trapeznikov Institute
of Control Sciences of RAS,
Moscow, 117997, Russian Federation