

ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

INFORMATION
TECHNOLOGIES
AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.021

DOI: 10.17212/2782-2001-2025-4-9-24

Разработка алгоритма интеграции URDF-модели в ROS при реализации цифрового двойника робототехнического комплекса*

П.А.В. АВАД^а, Т.Е. МАМОНОВА^б

РФ, 634030, г. Томск, пр. Ленина, 30, Национальный исследовательский Томский политехнический университет

^а *paal3@tpu.ru* ^б *stepte@tpu.ru*

Современные тенденции развития робототехники и автоматизации способствуют широкому внедрению цифровых двойников, которые обеспечивают моделирование, тестирование и оптимизацию робототехнических систем еще на стадии проектирования, до их физической реализации. Одним из ключевых инструментов для создания цифровых двойников являются URDF-модели (Unified Robot Description Format, Единый формат описания роботов), используемые в среде ROS (Robot Operating System, Операционная система роботов). Эти модели позволяют детально описывать кинематику и динамику робототехнических комплексов (РТК) и устройств, включая их геометрические параметры, массовые и инерционные характеристики, а также ограничения движения. Это дает возможность интегрировать их в виртуальные симуляционные среды и реальные системы управления. В статье рассматривается разработка алгоритма интеграции URDF-модели РТК в ROS. Особое внимание уделено вопросам формирования корректной кинематической цепи, учету физических ограничений движений звеньев, а также обеспечению взаимодействия модели с окружающей средой в симуляторе GAZEBO. Для проведения эксперимента применялся РТК с шестью степенями свободы. Для него создана URDF-модель, включающая точное описание структуры звеньев, их соединений и динамических свойств. Проверка работоспособности алгоритма проводилась в ROS и GAZEBO путем моделирования движения РТК по заданным траекториям, анализа его поведения при взаимодействии с виртуальными объектами и оценки точности воспроизведения кинематики. Результаты экспериментов подтвердили, что предложенный алгоритм успешно интегрирует URDF-модель в ROS, обеспечивая стабильное и адекватное функционирование цифрового двойника. Это позволяет использовать разработку для тестирования алгоритмов управления, оптимизации траекторий и прогнозирования поведения системы в различных сценариях. Полученные данные открывают перспективы для дальнейшего совершенствования методов моделирования, разработки РТК и применения цифровых двойников в задачах промышленной автоматизации, научных исследованиях и образовательных проектах.

* *Статья получена 06 ноября 2025 г.*

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 25-61-00017.

Ключевые слова: робототехнический комплекс, цифровой двойник, алгоритм интеграции, имитационное моделирование, симуляция, формат описания роботов, автоматизация, прогнозирование

ВВЕДЕНИЕ

Цифровые двойники играют важную роль в современной индустрии благодаря своей способности воспроизводить виртуальные копии реальных объектов и систем [1, 2]. Они оказывают значительное влияние на управление робототехническими комплексами (РТК) и их оптимизацию, позволяя прогнозировать износ деталей, контролировать состояние систем и повышать эффективность управления.

С развитием технологий и эволюцией производственных процессов мир вступил в эру индустрии 5.0, которая представляет собой новую парадигму человекоцентричного производства. В отличие от предыдущих этапов, где акцент был сделан на полной автоматизации, индустрия 5.0 стремится к интеллектуальному симбиозу человека и машины [3, 4].

Создание эргономичных рабочих мест с использованием коллаборативных роботов стало одним из ключевых направлений в индустрии 5.0. Коллаборативные роботы, такие как KUKA LBR iiwa [5], оснащенные усовершенствованными сенсорами, обеспечивают безопасное и продуктивное взаимодействие с человеком, что минимизирует риск производственного травматизма и способствует повышению общей производительности.

Современные разработки в области робототехники, такие как роботы Dobot, интегрированы с системами машинного зрения и искусственного интеллекта [6]. Определение взаимосвязей осей Robot Dobot CR3 также играет значительную роль в разработке производственных процессов.

Индустрия 5.0 предлагает социально-экономические и технологические преимущества. Благодаря новым подходам создаются высококвалифицированные рабочие места, повышается производительность труда на 30...40 % [7, 8] и снижается травматизм на 85 % [9, 10], тем самым улучшается безопасность и сокращаются затраты на медобслуживание.

Благодаря новым технологиям, таким как IoT и цифровые двойники, оптимизируются процессы, предсказываются и устраняются проблемы, повышается эффективность производства. Системы дополненной реальности улучшают обучение персонала, способствуя росту квалификации и взаимодействию с производственными системами.

Настоящая статья посвящена разработке и исследованию алгоритма интеграции модели Unified Robot Description Format (URDF-модели) РТК для реализации его цифрового двойника на базе Dobot CR3 в Robot Operating System (ROS).

Платформа ROS является стандартной для разработки систем управления роботами, предоставляет широкий спектр инструментов для симуляции, планирования движений и настройки контроллеров.

Модель URDF – универсальный язык для описания физических и кинематических характеристик роботов, что значительно упрощает создание и отладку алгоритмов управления [11, 12].

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ ОСЕЙ РТК DOBOT CR3

Для корректной работы цифрового двойника робототехнического комплекса Dobot CR3 необходимо точно определить взаимосвязи его кинематических осей. Этот процесс включает этапы, показанные на рис. 1.

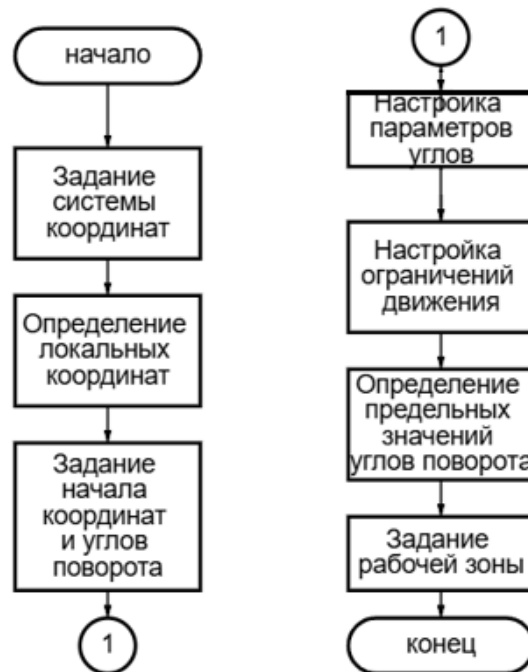


Рис. 1. Схема процесса настройки взаимосвязей осей робототехнического комплекса

Fig. 1. Diagram of the process of adjusting the robotic complex axes relationships

Указанные на рис. 1 этапы означают следующее.

1. Задание координатных систем: определение локальных координатных систем для каждого звена и оси манипулятора с указанием начала координат и ориентации.

2. Настройка углов поворота: задание углов поворота относительно осей X , Y , Z с установкой начальных (нулевых) значений для каждого сустава.

3. Установка ограничений движения: определение минимальных и максимальных углов поворота суставов с учетом физических ограничений манипулятора.

Указанные этапы обеспечивают точное описание кинематики, что критически важно для интеграции модели в ROS и ее дальнейшей симуляции.

Демонстрация работы алгоритма для определения взаимосвязи осей робота в среде ROS показана на рис. 2.

На основе полученных данных была создана трехмерная модель РТК с учетом его физических характеристик. Для каждого звена определены локальные координатные системы, начальные углы, ограничения движений и взаимное расположение звеньев. Модель экспортирована в формат URDF –

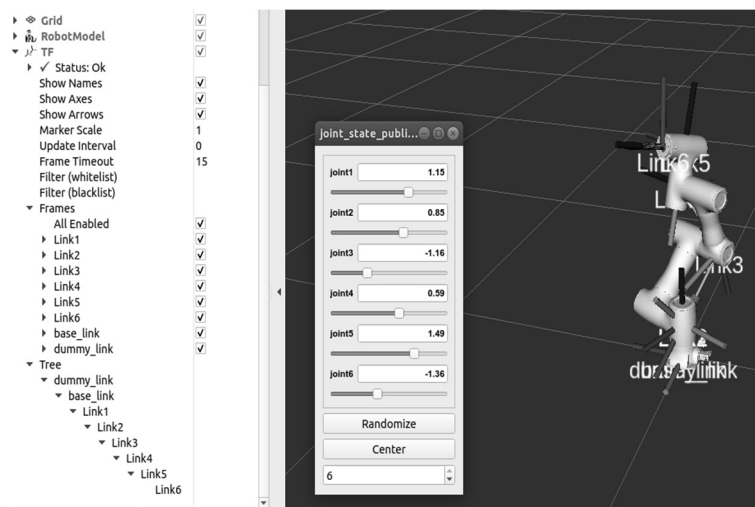


Рис. 2. Определение взаимосвязей осей робота

Fig. 2. Defining robot axis relationships

стандартный язык описания роботов в ROS (подробное описание формата представлено в разделе «Язык описания роботов для симуляции и управления»). Файлы геометрии в форматах STL и Collada использовались для визуализации в средах RViz и Gazebo. Корректная настройка осей и последующая генерация URDF-модели стали ключевыми шагами для обеспечения точности симуляции и управления цифровым двойником.

2. ГЕНЕРАЦИЯ URDF-МОДЕЛИ РТК

После создания 3D-модели манипулятора следующим этапом является генерация URDF-модели. Алгоритмы процессов создания модели РТК и его управления базируются на подходах, описанных в [13–15], и обобщенно представлены в виде блок-схем, указанных на рис. 3 и 4 соответственно.

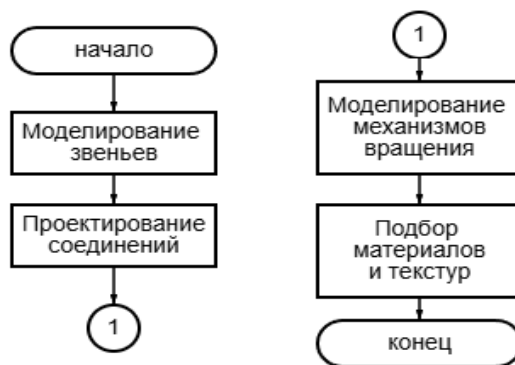


Рис. 3. Обобщенная блок-схема подхода для разработки модели робототехнического комплекса

Fig. 3. Flow diagram of the robotic system model development

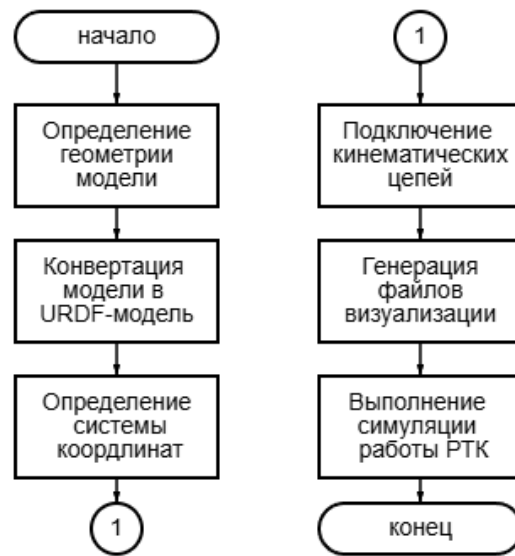


Рис. 4. Блок-схема процесса создания цифрового двойника для управления робототехническим комплексом

Fig. 4. Flowchart for creating a digital twin for controlling a robotic complex

Ниже представлено более подробное описание этапов, показанных на рис. 3.

1. Моделирование звеньев – создание основных элементов манипулятора из примитивных форм с последующей детализацией.

2. Проектирование соединений – шарниров и подшипников – с точным позиционированием для корректного движения.

3. Моделирование механизмов вращения – моторов и редукторов – с учетом размеров и характеристик.

4. Подбор материалов и текстур для реалистичного отображения модели.

URDF-модель является стандартом для описания структуры и характеристик робототехнических устройств и РТК, включая их звенья, суставы, ограничения движений и физические параметры.

В рамках разработки цифрового двойника Dobot CR3 была создана URDF-модель, которая включает звенья с их геометрией и массой, центры тяжести (для корректных динамических расчетов), ограничения движений суставов (для реалистичной симуляции).

Первоначально была создана геометрическая модель манипулятора, учитывающая его физические параметры.

3. ЯЗЫК ОПИСАНИЯ РОБОТОВ ДЛЯ СИМУЛЯЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ

Unified Robot Description Format (URDF) – это XML-формат, специально разработанный для представления роботов в виде древовидной структуры звеньев, соединенных суставами. URDF-модель обеспечивает основу для

моделирования, визуализации и управления роботами в различных симуляторах и платформах, таких как ROS, Gazebo, RViz и другие.

В основе модели URDF лежит концепция иерархической структуры, в которой робот представлен как совокупность взаимосвязанных звеньев. Каждое звено может быть соединено с другим посредством сустава, что позволяет моделировать сложные кинематические цепи.

Ключевые элементы URDF следующие:

- *Robot* – корневой элемент, определяющий имя робота и содержащий все остальные элементы;

- *Link* описывает отдельное звено робота, включая его геометрические, инерционные и визуальные свойства.

Элемент *Link* содержит:

- *Inertial*: определяет массу, центр масс и тензор инерции звена, необходимые для физически точного моделирования;

- *Visual*: описывает визуальное представление звена, используя геометрические примитивы (куб, цилиндр, сфера и т. д.) и материалы;

- *Collision*: определяет упрощенную геометрию звена, используемую для ускорения вычислений столкновений;

- *Joint*: описывает соединение между двумя звеньями, определяя тип соединения (вращательное, призматическое, фиксированное и т. д.), его оси и ограничения.

Элемент *joint* содержит:

- *Parent* и *child*: указывают звенья, которые соединяет сустав;

- *Origin*: определяет положение и ориентацию сустава относительно родительского звена;

- *Axis*: задает ось вращения или перемещения для подвижных суставов;

- *Limit*: устанавливает ограничения по перемещению/вращению, такие как максимальный угол или усилие;

- *Gazebo*: содержит специфичные для Gazebo инструкции (например, параметры трения или плавучести);

- *Transmission*: описывает передаточные механизмы, такие как редукторы.

В ходе выполнения работ были выявлены следующие преимущества использования URDF.

1. Стандартизация: URDF предоставляет унифицированный формат для описания роботов, способствуя совместимости между различными симуляторами и инструментами.

2. Модульность: иерархическая структура URDF позволяет легко создавать сложные модели роботов, комбинируя и модифицируя отдельные звенья и суставы.

3. Визуализация: URDF позволяет создавать реалистичные визуализации роботов, что полезно для отладки, презентаций и обучения.

4. Симуляция: URDF является основой для физически точного моделирования роботов, позволяя тестировать алгоритмы управления и планирования движения в виртуальной среде.

5. Интеграция с ROS: URDF тесно интегрирует с ROS, предоставляя механизм для описания роботов и их свойств в рамках ROS-системы.

4. ИНТЕГРАЦИЯ URDF-МОДЕЛИ В ROS

Для создания цифрового двойника РТК Dobot CR3 была разработана его URDF-модель, учитывающая физическую структуру устройства, включая геометрию звеньев, суставов и ограничения движений. Каждому звену присвоена локальная координатная система, что позволяет выполнять точные кинематические расчеты и моделирование. Модель была экспортирована в формате URDF, что обеспечило ее интеграцию в систему ROS. Этот подход позволяет эффективно проводить симуляции и тестирование РТК в виртуальной среде, а также взаимодействовать с реальным устройством через среду разработки ROS.

Разработанная URDF-модель РТК представлена на рис. 5.



Рис. 5. URDF-модель робототехнического комплекса

Fig. 5. URDF-model of the robotic complex

Была проведена интеграция модели с программным обеспечением MoveIt.

MoveIt – инструмент для планирования траекторий и симуляции работы РТК. Генерация конфигурационного пакета выполнялась через метод Setup Assistant, в котором были заданы параметры URDF-модели, рабочие зоны и ограничения движений. При планировании траекторий были использованы алгоритмы обратной кинематики и планирования движения для создания плавных и безопасных траекторий.

На рис. 6 представлена схема архитектуры системы в MoveIt, используемой для планирования движения и управления роботами.

Центральным элементом архитектуры, представленной на рис. 6, является компонент «Инициализация Move Group», который выполняет ключевые функции, такие как планирование траекторий, управление роботами и интеграция с внешними модулями.

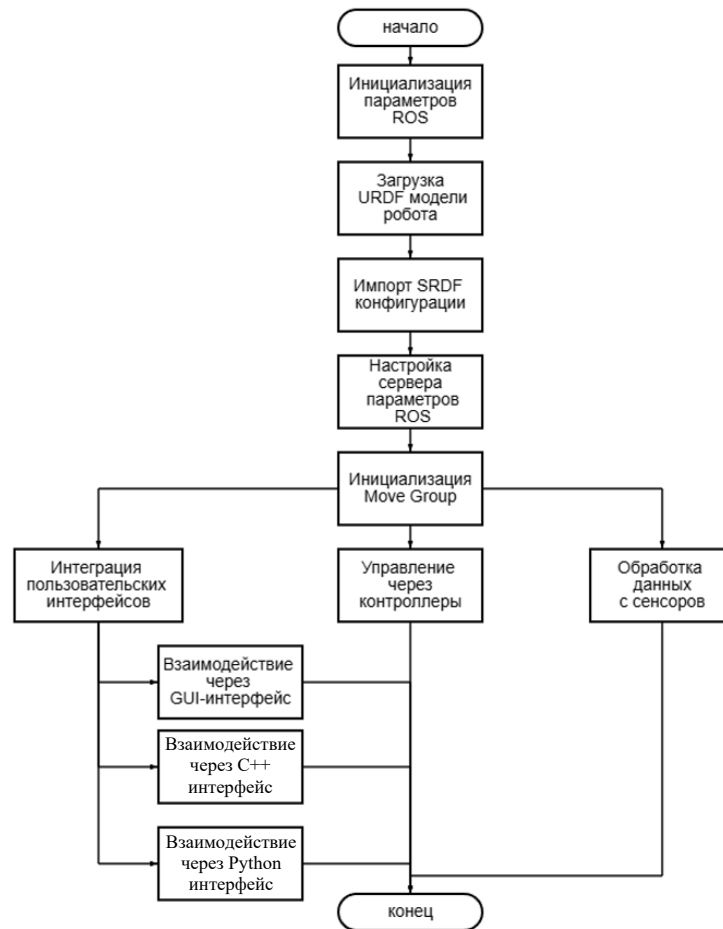


Рис. 6. Схема архитектуры системы MoveIt

Fig. 6. MoveIt system architecture diagram

Основными компонентами указанной архитектуры являются интерфейс пользователя, сервер параметров платформы ROS и элементы управления (контроллеры) и обратной связи (сенсоры).

При кодировании имеется возможность взаимодействия на языках программирования C++ и Python.

Графический интерфейс пользователя (GUI), такой как Rviz, позволяет визуализировать и управлять процессами планирования в интерактивном режиме.

Сервер предназначен для хранения основных конфигурационных файлов модели, которые включают описание структуры PTK (URDF-файл) и описание семантической информации PTK (SRDF-файл). К семантической информации относятся рабочие области и ограниченные зоны.

Сенсоры робота обеспечивают обратную связь и данные о текущем состоянии системы, необходимые для точного управления.

Разработанная архитектура обеспечивает гибкость и модульность, позволяя интегрировать различные компоненты для управления сложными робототехническими системами.

5. ИНТЕГРАЦИЯ В ROS И ЗАПУСК МОДЕЛИ

Полученный пакет, описание которого предоставлено в разделе 4, далее можно интегрировать в ROS и провести запуск цифровой модели в составе цифрового двойника системы. Для этого рекомендуется скопировать его в рабочую директорию Catkin Workspace и запустить симуляцию PTK, применив программные инструменты Rviz или GAZEBO.

Для полноценного управления объектом выполнена интеграция базовой версии цифрового двойника, описывающего PTK, с программой MoveIt для управления суставами и подачи команд с целью планирования траектории.

Окончательная версия цифрового двойника PTK может быть использована для анализа, тестирования и оптимизации алгоритмов управления.

На рис. 7 и 8 показана визуализация процесса управления PTK в GAZEBO и MoveIt.

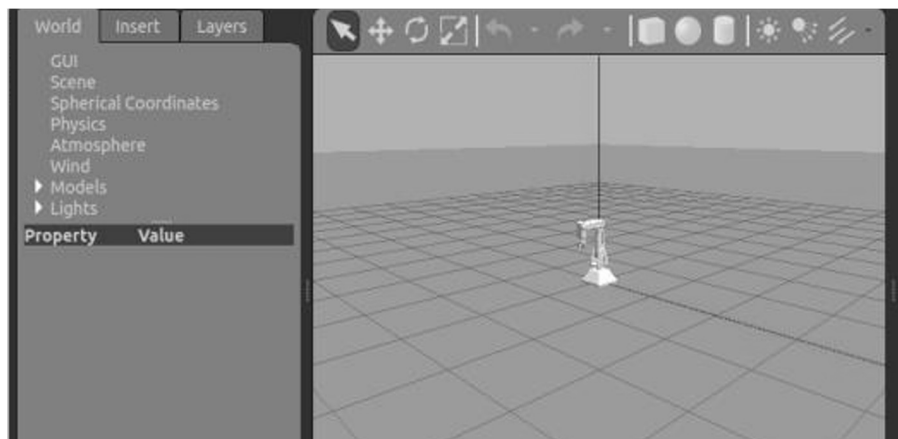


Рис. 7. Окно запуска робота в GAZEBO

Fig. 7. Launch window of the robot in GAZEBO

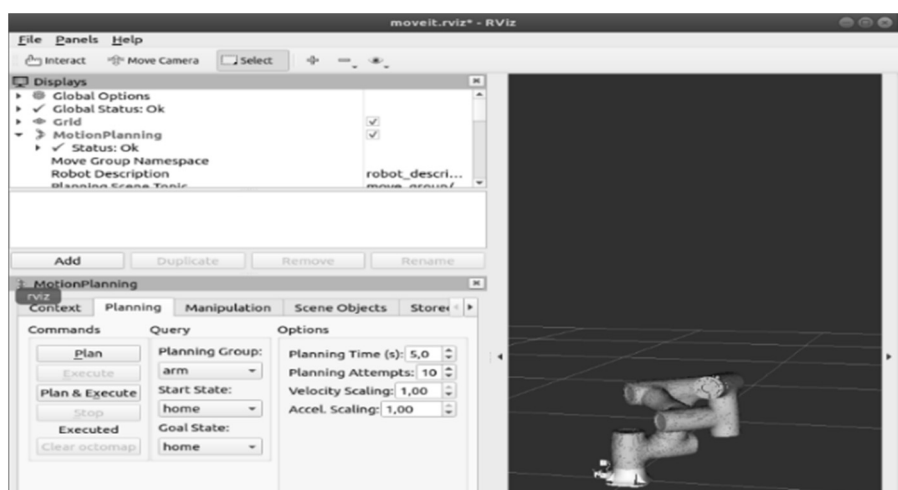


Рис. 8. Окно запуска работы PTK в MoveIt

Fig. 8. Launch window of the robot in MoveIt

Перед использованием разработанной цифровой модели в составе цифрового двойника РТК в реальной среде проводилось ее детальное тестирование. Для этого выполнялись следующие шаги:

- 1) проверка соответствия движений в симуляции и движений реального объекта;
- 2) отладка работы контроллеров для исключения рывков и несогласованности движений;
- 3) выявление ошибки в конфигурации, такой как некорректные направления соединений или несоответствие границ движений.

Отображение процесса тестирования и отладки представлены на рис. 9.

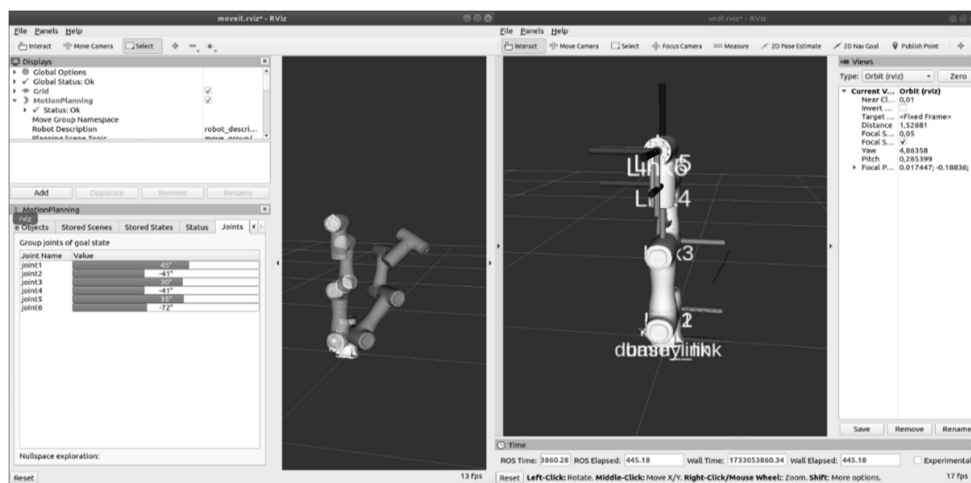


Рис. 9. Отображение процесса тестирования и отладки модели в Rviz

Fig. 9. Displaying model testing and debugging in Rviz

После успешного тестирования в симуляции цифровая модель РТК интегрируется с физическим устройством Dobot CR3 в цифровой двойник. Далее настраивается связь между ROS и аппаратными компонентами объекта через драйверы. Управление РТК осуществляется через такие алгоритмы, как обратная кинематика и траекторное планирование.

6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

Для количественной оценки эффективности разработанного цифрового двойника на базе ROS и URDF-модели манипулятора Dobot CR3 были проведены эксперименты по планированию траекторий с использованием пакета MoveIt. В рамках исследования сравнивались два алгоритма планирования движения: Probabilistic Roadmap (PRM) и Rapidly-exploring Random Tree (RRT). Оба алгоритма реализованы в MoveIt и широко применяются для решения задач кинематического планирования при наличии препятствий.

В качестве тестовых задач использовались переходы манипулятора между заданными конфигурациями суставов, например, из начальной позиции

(0, 0, 0, 0, 0, 0) в целевую (90, 90, -90, 90, 90, 90). Для каждой траектории фиксировалось время планирования и выполнения движения в симуляторе GAZEBO. Результаты сравнения представлены на рис. 10 и в таблице.

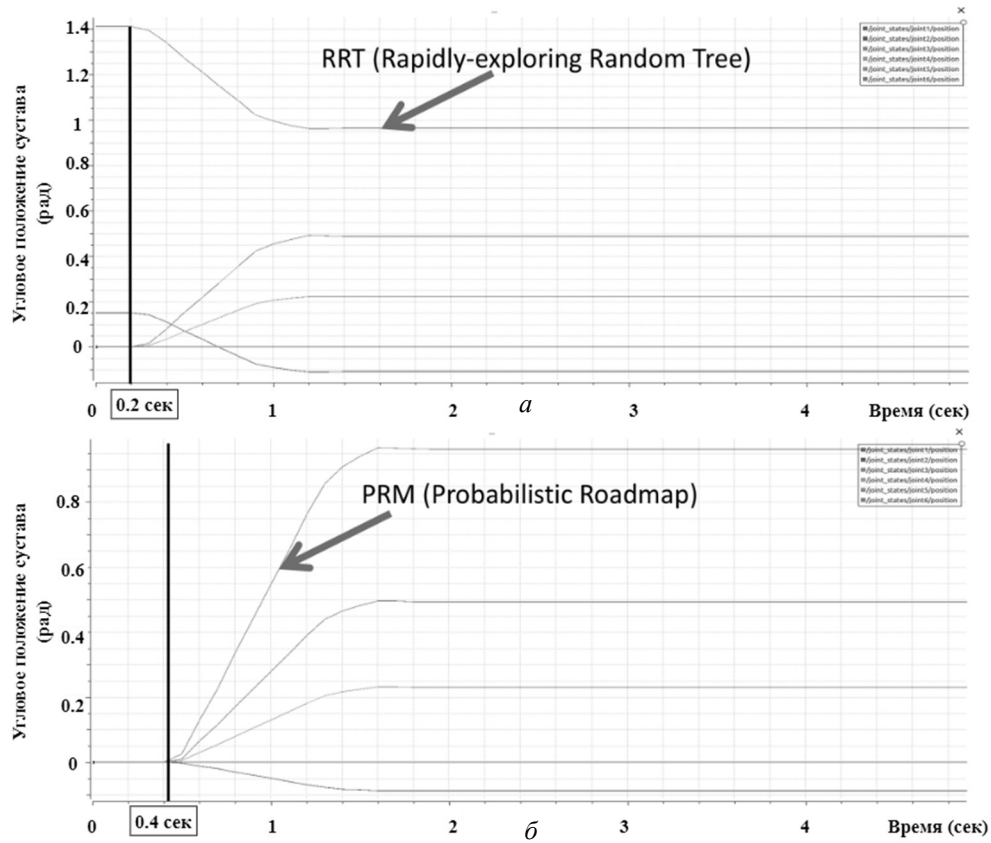


Рис. 10. Графики зависимости углового положения суставов РТК Dobot CR3 от времени при планировании траектории алгоритмами:
а – RRT (Rapidly-exploring Random Tree), б – PRM (Probabilistic Roadmap)

Fig. 10. Plots of a joint angular position versus time for the Dobot CR3 manipulator during trajectory planning using two algorithms:

a is RRT (Rapidly-exploring Random Tree), б is PRM (Probabilistic Roadmap)

Экспериментальные результаты демонстрируют, что собственное ПО Dobot Studio Pro выполняет задачи быстрее, чем системы на базе ROS. Среднее время выполнения было рассчитано по формуле

$$\tilde{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i,$$

где t_i – время выполнения i -й задачи, с; $n = 7$ – количество экспериментов.

**Время выполнения заданий для системы управления на базе ROS
и собственного программного обеспечения Dobot Studio Pro**

**Execution time of tasks for the ROS-based control system and the proprietary
software Dobot Studio Pro**

Углы движения (J1, J2, J3, J4, J5, J6)	Время на базе ROS (PRM) t_1 (с)	Время на базе ROS (RRT) t_2 (с)	Время на собственной программе t_3 (с)
(90, 90, -90, 90, 90, 90) до (0, 0, 0, 0, 0, 0)	23,65	22,41	20,31
(0, -90, 0, 0, 0, 0)	20,98	16,40	14,30
(0, -90, 90, 0, 0, 0)	22,80	21,80	19,79
(0, -90, 90, 90, 0, 0)	24,87	22,00	19,77
(0, -90, 90, 90, 90, 0)	24,98	22,89	19,69
(0, -90, 90, 90, 90, 90)	23,99	21,89	19,38
(90, 90, -90, 90, 90, 90)	24,65	23,00	19,98
Среднее время, t_{cp}	23,70	21,48	19,03

Анализ данных показал, что алгоритм RRT в среднем на 2,22 секунды быстрее находит допустимую траекторию по сравнению с PRM, особенно в сценариях с плотной конфигурацией препятствий. Это объясняется тем, что PRM требует предварительного построения вероятностной карты конфигурационного пространства, что увеличивает вычислительные затраты. В то же время RRT строит дерево поиска «на лету», что делает его более эффективным для задач с одним запросом (single-query planning).

Как видно из результатов, собственное программное обеспечение Dobot Studio Pro обеспечивает наименьшее время выполнения (в среднем 19,03 с), что связано с оптимизацией под конкретное оборудование и отсутствием расходов виртуальной среды при выполнении расчетов. Тем не менее система на базе ROS + RRT демонстрирует приемлемую производительность (21,48 с) при значительно большей гибкости: возможность интеграции с внешними сенсорами, системами искусственного интеллекта, модульной архитектурой и открытым исходным кодом.

Таким образом, разработанный цифровой двойник не только корректно описывает кинематику Dobot CR3, но и обеспечивает измеримую и воспроизводимую оценку эффективности различных алгоритмов управления. Полученные количественные значения при проведении эксперимента подтверждают пригодность предложенного подхода для задач промышленной автоматизации, исследований в области робототехники и образовательных проектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе разработан алгоритм интеграции URDF-модели робототехнического комплекса Dobot CR3 в среду ROS, который включает создание 3D-модели, настройку ROS-контроллеров, использование инстру-

ментов MoveIt для планирования траекторий и проведения тестирующей симуляции модели в Rviz и GAZEBO.

Важным результатом работы стало создание функционального цифрового двойника, который позволяет тестировать алгоритмы управления и оценивать поведение системы еще до ее физической реализации. Использование URDF в сочетании с инструментами ROS доказало свою эффективность в решении задач управления и симуляции робототехнических систем. Подход, представленный в статье, обеспечивает высокую точность моделирования и открывает возможности для дальнейшей оптимизации и внедрения сложных алгоритмов управления робототехническими устройствами и системами. Это делает его применимым для широкого спектра задач, включая промышленную автоматизацию, научные исследования и обучение. Предложенная технология может служить основой для разработки аналогичных проектов, что подчеркивает ее значимость для инженерного сообщества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mamonova T.E., Vasilyeva T.N. Artificial intelligence in problems of leak definition from the oil pipeline // Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2014. – IEEE, 2014. – P. 6986846. – DOI: 10.1109/MEACS.2014.6986846.
2. Awad P.A.V., Mamonova T.E. Control of a custom URDF robotic arm in ROS // Proceedings of 2024 IEEE 3rd International Conference on Problems of Informatics, Electronics and Radio Engineering (PIERE). – IEEE, 2024. – P. 600–603. – DOI: 10.1109/PIERE62470.2024.10805061.
3. European Commission. Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry. 2021. – URL: [https://ec.europa.eu/info/publications/industry-50_en_\(accessed: 27.11.2025\)](https://ec.europa.eu/info/publications/industry-50_en_(accessed: 27.11.2025)).
4. UNIDO. Industrial Development Report – Industry 5.0. 2023. – URL: <https://www.unido.org/sites/default/files/unido-publications/2025-11/UNIDO%20IDR26.pdf> (accessed: 28.11.2025).
5. KUKA AG. Collaborative Robots Market Analysis. 2024. – URL: <https://www.futuremarketinsights.com/reports/collaborative-robot-market> (accessed: 15.08.2025).
6. Dobot Technology. Growth Report. 2023. – URL: <https://www.dobot.cc/products/industry-robots> (accessed: 25.08.2025).
7. International Federation of Robotics (IFR). World Robotics 2023. – URL: https://ifr.org/img/worldrobotics/2023_WR_extended_version.pdf (accessed: 28.11.2025).
8. McKinsey & Company. The Future of Manufacturing. 2023. – URL: <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/the-future-of-manufacturing> (accessed: 09.09.2025).
9. Nahavandi S. Industry 5.0 – A Human-Centric Solution // Sustainability. – 2019. – Vol. 11 (16). – P. 4371. – DOI: 10.3390/su11164371.
10. Di Nardo M., Yu H. Special issue “Industry 5.0: The prelude to the sixth industrial revolution” // Applied System Innovation. – 2021. – Vol. 4 (3). – P. 45. – DOI: 10.3390/asi4030045.
11. Авад А.В.П., Мамонова Т.Е. Цифровые двойники в управлении и оптимизации манипуляторов // Интеллектуальная энергетика: сборник трудов II Всероссийской научно-практической конференции, 12–14 ноября 2024 г. – Томск, 2024. – С. 179–182.
12. Авад А.В.П., Мамонова Т.Е. Разработка ПИД-контроллера для роботизированного манипулятора // Современные проблемы машиностроения: сборник статей XVII Международной научно-технической конференции, Томск, 25–29 ноября 2024 г. – Томск, 2024. – С. 165–168.
13. Siciliano B., Khatib O. Springer Handbook of Robotics. – Springer, 2008. – ISBN 978-3-540-23957S.
14. Modular self-reconfigurable robot systems [Grand challenges of robotics] / M. Yim, W. Shen, B. Salemi, D. Rus, M. Moll, H. Lipson, E. Klavins, G.S. Chirikjian // IEEE Robotics & Automation Magazine. – 2007. – Vol. 14 (1). – P. 43–52. – DOI: 10.1109/MRA.2007.339623.
15. Move It. Documentation. Move It User Guide, 2024.

16. Chitta S., Cohen B., Likhachev M. Planning for autonomous door opening with a mobile manipulator // Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. – IEEE, 2010. – P. 1799–1806. – DOI: 10.1109/ROBOT.2010.5509475.
17. Reducing the barrier to entry of complex robotic software: a MoveIt! Case study / D. Coleman, I.A. Sucan, S. Chitta, N. Correll // Journal of Software Engineering for Robotics. – 2013. – Vol. 1 (1). – P. 1–10.
18. Kuffner J.J., LaValle S.M. RRT-connect: An efficient approach to single-query path planning // Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. – IEEE, 2000. – P. 995–1001. – DOI: 10.1109/ROBOT.2000.844730.

Авад Петер Адел Вахим, магистрант инженерной школы «Интеллектуальные энергетические системы» Национального исследовательского Томского политехнического университета. Область научных интересов – создание цифрового двойника для сложных объектов, таких как робототехнические манипуляторы. E-mail: paa13@tpu.ru

Мамонова Татьяна Егоровна, кандидат технических наук, доцент отделения интеллектуальных систем Национального исследовательского Томского политехнического университета. Автор более 100 научных работ, в том числе учебных пособий и статей в изданиях, индексируемых в РИНЦ, Scopus и ВАК. Область научных интересов: разработка цифровых двойников процессов и систем, моделирование гидродинамических процессов, искусственный интеллект и его применение в промышленности, системы технического зрения. E-mail: stepte@tpu.ru

Awad Peter Adel Wakim, Master's student at the School of Intelligent Energy Systems, National Research Tomsk Polytechnic University. His research interests include development of digital twins for robotic manipulators. E-mail: paa13@tpu.ru

Mamonova Tatiana E., PhD in engineering, associate professor at the Department of Intelligent Systems, School of Intelligent Energy Systems. She is the author of over 100 scientific papers. Her research interests cover digital twins, hydrodynamic process modeling and artificial intelligence in industry. E-mail: stepte@tpu.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2025-4-9-24

Development of an algorithm for integrating a URDF model into ROS for implementing a digital twin of a robotic complex*

P.A.V. AWAD^a, T.E. MAMONOVA^b

National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

^a paa13@tpu.ru ^b stepte@tpu.ru

Abstract

Current trends in robotics and automation are driving the widespread adoption of digital twins, which enable the modeling, testing, and optimization of robotic systems at the design stage, prior to their physical implementation. A key tool for creating digital twins is the use of URDF models (Unified Robot Description Format), employed within the ROS environment (Robot Operating System). These models provide a detailed description of the kinematics and dynamics of robotic manipulators, including their geometric parameters, mass-inertia characteristics, and motion constraints, making them essential for integration into virtual simulation environments and real control systems. This study focuses on developing an algorithm for integrating a URDF model of a robotic manipulator into ROS. Particular attention is paid to the

* Received 06 November 2025.

The research was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 25-61-00017.

accurate formation of the kinematic chain, consideration of physical motion constraints of the links, and ensuring the model's interaction with the environment in the GAZEBO simulator. The experimental platform chosen was the six-degree-of-freedom Dobot CR3 manipulator, for which a URDF model was developed, incorporating a precise description of link structures, joints, and dynamic properties. The algorithm's performance was validated in ROS and GAZEBO through simulations of the manipulator motion along predefined trajectories, analysis of its behavior during interaction with virtual objects, and assessment of kinematic accuracy. The experimental results confirmed that the proposed algorithm successfully integrates the URDF model into ROS, ensuring stable and adequate operation of the digital twin. This enables the use of the developed solution for testing control algorithms, optimizing trajectories, and predicting a system behavior across various scenarios. The findings offer prospects for advancing modeling techniques, developing collaborative robots, and applying digital twins in industrial automation, scientific research, and educational projects.

Keywords: URDF (Unified Robot Description Format), ROS (Robot Operating System), digital twin, robotic manipulator, integration algorithm, modeling, simulation, GAZEBO, MoveIt, automation

REFERENCES

1. Mamonova T.E., Vasilyeva T.N. Artificial intelligence in problems of leak definition from the oil pipeline. *Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2014*. IEEE, 2014, p. 6986846. DOI: 10.1109/MEACS.2014.6986846.
2. Awad P.A.V., Mamonova T.E. Control of a custom URDF robotic arm in ROS. *Proceedings of 2024 IEEE 3rd International Conference on Problems of Informatics, Electronics and Radio Engineering (PIERE)*. IEEE, 2024, pp. 600–603. DOI: 10.1109/PIERE62470.2024.10805061.
3. European Commission. *Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry*. 2021. Available at: [https://ec.europa.eu/info/publications/industry-50_en_\(accessed 27.11.2025\)](https://ec.europa.eu/info/publications/industry-50_en_(accessed 27.11.2025)).
4. UNIDO. *Industrial Development Report – Industry 5.0*. 2023. Available at: [https://www.unido.org/sites/default/files/unido-publications/2025-11/UNIDO%20IDR26.pdf \(accessed 28.11.2025\)](https://www.unido.org/sites/default/files/unido-publications/2025-11/UNIDO%20IDR26.pdf (accessed 28.11.2025)).
5. KUKA AG. *Collaborative Robots Market Analysis*. 2024. Available at: [https://www.future-marketinsights.com/reports/collaborative-robot-market \(accessed 15.08.2025\)](https://www.future-marketinsights.com/reports/collaborative-robot-market (accessed 15.08.2025)).
6. Dobot Technology. *Growth Report*. 2023. Available at: [https://www.dobot.cc/products/industry-robots_\(accessed 25.08.2025\)](https://www.dobot.cc/products/industry-robots_(accessed 25.08.2025)).
7. International Federation of Robotics (IFR). *World Robotics 2023*. Available at: [https://ifr.org/img/worldrobotics/2023_WR_extended_version.pdf \(accessed 28.11.2025\)](https://ifr.org/img/worldrobotics/2023_WR_extended_version.pdf (accessed 28.11.2025)).
8. McKinsey & Company. *The Future of Manufacturing*. 2023. Available at: [https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/the-future-of-manufacturing \(accessed 09.09.2025\)](https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/the-future-of-manufacturing (accessed 09.09.2025)).
9. Nahavandi S. Industry 5.0 – A Human-Centric Solution. *Sustainability*, 2019, vol. 11 (16), p. 4371. DOI: 10.3390/su11164371.
10. Di Nardo M., Yu H. Special issue “Industry 5.0: The prelude to the sixth industrial revolution”. *Applied System Innovation*, 2021, vol. 4 (3), p. 45. DOI: 10.3390/asi4030045.
11. Avad A.V.P., Mamonova T.E. [Digital twins in manipulator control and optimization]. *Intellektual'naya energetika [Intelligent Energy]*. Proceedings of the II All-Russian Scientific and Practical Conference, Tomsk, 2024, pp. 179–182. (In Russian).
12. Avad A.V.P., Mamonova T.E. [Development of a PID controller for a robotic manipulator]. *Sovremennye problemy mashinostroeniya [Modern Problems of Mechanical Engineering]*. Proceedings of the XVII International Scientific and Technical Conference, Tomsk, 2024, pp. 165–168. (In Russian).
13. Siciliano B., Khatib O. *Springer Handbook of Robotics*. Springer, 2008. ISBN 978-3-540-23957S.
14. Yim M., Shen W., Salemi B., Rus D., Moll M., Lipson H., Klavins E., Chirikjian G.S. Modular self-reconfigurable robot systems [Grand challenges of robotics]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2007, vol. 14 (1), pp. 43–52. DOI: 10.1109/mra.2007.339623.
15. Move It. Documentation. Move It User Guide, 2024.

16. Chitta S., Cohen B., Likhachev M. Planning for autonomous door opening with a mobile manipulator. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2010, pp. 1799–1806. 10.1109/ROBOT.2010.5509475.
17. Coleman D., Sucan I.A., Chitta S., Correll N. Reducing the barrier to entry of complex robotic software: a MoveIt! Case study. *Journal of Software Engineering for Robotics*, 2013, vol. 1 (1), pp. 1–10.
18. Kuffner J.J., LaValle S.M. RRT-connect: An efficient approach to single-query path planning. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2000, pp. 995–1001. DOI: 10.1109/ROBOT.2000.844730.

Для цитирования:

Авад П.А.В., Мамонова Т.Е. Разработка алгоритма интеграции URDF-модели в ROS при реализации цифрового двойника робототехнического комплекса // Системы анализа и обработки данных. – 2025. – № 4 (100). – С. 9–24. – DOI: 10.17212/2782-2001-2025-4-9-24.

For citation:

Awad P.A.V., Mamonova T.E. Razrabotka algoritma integratsii URDF-modeli v ROS pri realizatsii tsifrovogo dvoynika robototekhnicheskogo kompleksa [Development of an algorithm for integrating a URDF model into ROS for implementing a digital twin of a robotic complex]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and data processing systems*, 2025, no. 4 (100), pp. 9–24. DOI: 10.17212/2782-2001-2025-4-9-24.