

# ВОПРОСЫ ДОСТОВЕРНОГО ФИЗИЧЕСКОГО И ВИЗУАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ БЕСПИЛОТНОЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ НА БАЗЕ ТРАКТОРА БЕЛАРУС-3525

## ISSUES OF RELIABLE PHYSICAL AND VISUAL MODELING OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS OF UNMANNED AGRICULTURAL MACHINERY BASED ON THE TRACTOR BELARUS-3525

I. Galilulin  
B. Timershin

*Summary.* This paper is dedicated to the study of principles and possibilities for accurate physical and visual modeling of complex technical systems using modern software tools. It addresses the issues of modeling and emulating the operation of unmanned agricultural transport vehicles based on the Belarus-3525 tractor. The work covers methods for integrating these systems with the environment, which improves the development process and reduces operational risks.

*Keywords:* unmanned tractor, modeling, virtual simulation, Gazebo, modeling of complex technical systems, physics emulation, accurate physical modeling.

**Галиуллин Искандер Гаязович**

директор кадрово-ресурсного центра ИТ,  
Казанский федеральный университет  
isgaliullin@gmail.com

**Тимершин Булат Айратович**

аспирант, Институт вычислительной математики  
и информационных технологий;  
техник-программист, Научно-исследовательский  
центр «Центр превосходства»  
btimershin99@xmail.com

*Аннотация.* Эта статья посвящена исследованию способов и перспектив детализированного физического и графического моделирования комплексных инженерных систем с помощью современных программных инструментов. Особое внимание уделяется вопросам симуляции и имитации работы автономных сельскохозяйственных машин на основе трактора Беларусь-3525. Работа охватывает методы интеграции этих систем с окружающей средой, что позволяет улучшить процесс разработки и снизить риски при эксплуатации.

*Ключевые слова:* беспилотный трактор, моделирование, виртуальная симуляция, Gazebo, достоверное физическое моделирование.

### Введение

Современные системы требуют высокой точности в разработке и эксплуатации, что обусловлено их сложной структурой и необходимостью взаимодействия с физической средой [1]. Высокие требования к рентабельности разработки и производства таких систем подчеркивают важность минимизации потерь, возникающих из-за поломок и неудачных испытаний. В данном контексте виртуальное моделирование становится неотъемлемым инструментом для предварительной проверки и оптимизации работы технических систем.

Анализ существующих программных продуктов показывает, что при правильном применении они могут служить эффективными инструментами для точного физического моделирования сложных систем. В этой работе предлагается методология, направленная на создание комплекса программных средств, способного минимизировать риски некорректной разработки и повысить ее эффективность, а также оценить надежность системы.

Цель этого исследования — создать и внедрить новые алгоритмы и методы, которые позволят проводить точное физическое моделирование и испытания комплексных инженерных систем.

Для достижения этой цели авторы поставили перед собой следующие задачи:

1. Исследовать и оценить текущие программные инструменты для моделирования, включая доступные программы, плагины и библиотеки;
2. Гарантировать точность симулируемых физических явлений;
3. Разработать алгоритм, который позволит осуществлять точное физическое моделирование сложных инженерных систем;
4. Построение многофункциональной виртуальной платформы на основе разработанного алгоритма, предназначенной для моделирования и тестирования сложных технических систем.

### Основные результаты

Сравнительный анализ существующих программных средств показывает, что большинство из них решают уз-

Сравнение различных программных средств

Наименование	Язык	Операционная система, тип	Графическая визуализация	Физическое моделирование	Решения по кинематике	Примечание
MRPT	C++	Linux, Windows, среда разработки	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует	Применяется для алгоритмов SLAM и планирования движения.
MARIE	C++	Linux, среда разработки	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует	Позволяет интегрировать различные робототехнические инструменты
Player Project (former Player/Stage)	C++	Linux, среда разработки	Трёхмерная, с Gazebo	Присутствует, с Gazebo	Отсутствует	Поддерживает работу с конкретными моделями роботов. Интегрируется с другими инструментами.
YARP	C++	Windows, Linux, набор утилит	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует	Инструменты для различных задач в робототехнике.
UsarSim	C++	Linux, Windows, среда разработки	Трёхмерная	Присутствует	Отсутствует	Хорошо подходит для визуализации и физического моделирования колесных платформ.
JDE+	C	Linux, среда разработки	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует	Платформа для принятия роботами решений в условиях повышенной сложности
ORCA	C++	Linux, редактор	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует	Используется для создания моделей поведения роботов.
RoboFrame	C++	Windows, Linux, редактор	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует	Применяется для моделирования поведения робототехнических систем.
CARMEN	C Java	Linux, среда разработки	Двухмерная	Отсутствует	Отсутствует	Применяется для алгоритмов SLAM и планирования движения.
CLARAty	C++	Windows, Linux, редактор и среда разработки	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует	Разработан для проектирования космических и специализированных роботов.
Gazebo	C++, Python	Windows, Linux, редактор и среда разработки	Трёхмерная	Присутствует	Присутствует	Используется для симуляции и тестирования робототехнических платформ.

коспециализированные задачи, такие как навигация или когнитивное принятие решений, но не обеспечивают реалистичную физику. Таблица 1 представляет сравнительный обзор программного обеспечения, включая такие параметры, как язык программирования, платформа, поддержка 3D-симуляции и физического моделирования.

В результате тщательного изучения различного инструментария для моделирования инженерных систем было принято решение использовать фреймворк Gazebo (см. Рисунок 1).

Gazebo является высокоэффективным инструментом для достоверного моделирования, который обеспечивает точную настройку алгоритмов робототехнических систем и проведение надежного тестирования в разнообразных симулированных сценариях [2]. Кроме этого, фреймворк обладает качественной графикой и удобными инструментами для программирования и визуализации, а также позволяет создавать и анализировать различные модели. С помощью использования различных

физических модулей платформа способна обеспечить точную физическую симуляцию.

Фреймворк Gazebo поддерживает использование различных плагинов, которые расширяют функциональность симулятора. Эти плагины позволяют проводить операции с объектами и их компонентами, обеспечивая реалистичное моделирование процессов.

Gazebo способен обеспечивать функционал нескольких физических модулей: Dynamic Animation and Robotics Toolkit (DART), Open Dynamics Engine (ODE), Bullet Physics Library (Bullet), SimBody, [3-6]. Основные характеристики каждого из этих модулей указаны на рисунке 2.

По результатам анализа физических модулей, проведенного авторами, было определено, что движок DART обеспечивает наиболее точную физическую эмуляцию процессов, присущих симуляции трактора. Среди таких процессов: «движение трактора по пересеченной местности», «работа подвески и амортизаторов», «взаимодействие с грунтом», «повороты и маневры», «влияние

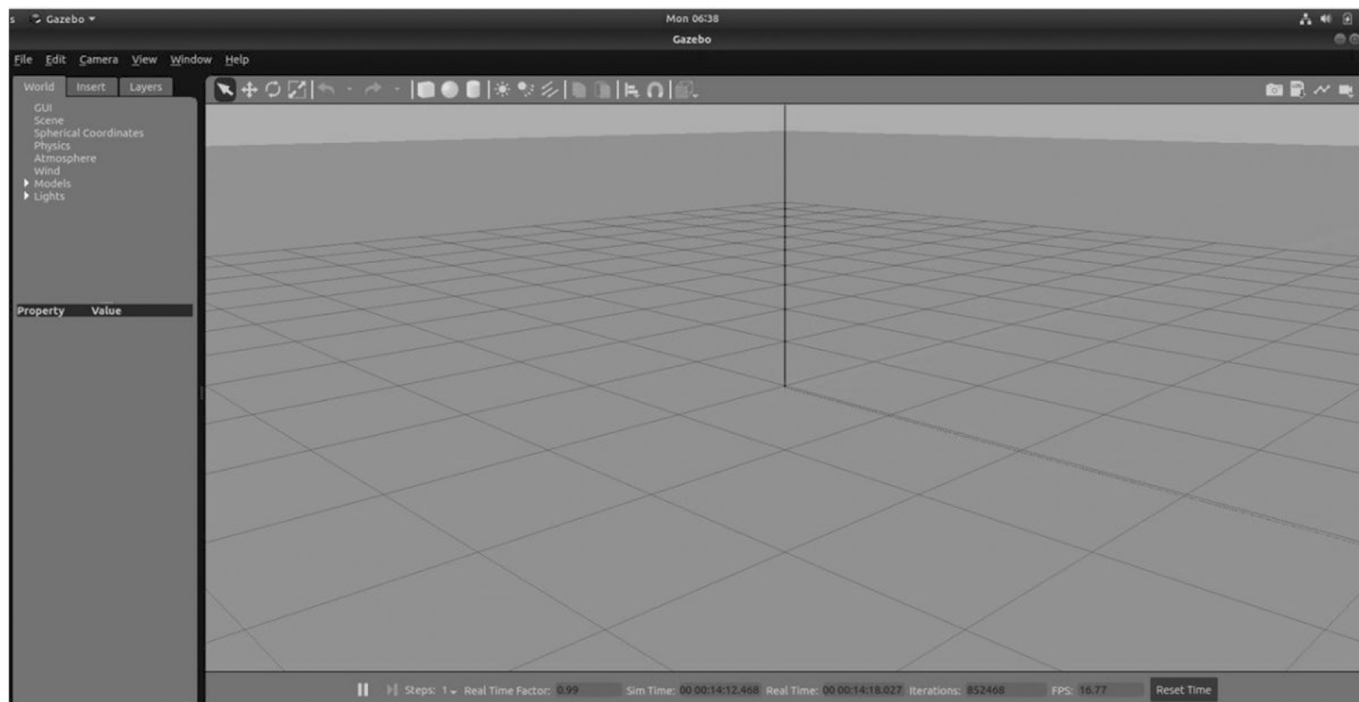


Рис. 1. Внешний вид фреймворка Gazebo

Свойства	ODE	Simbody	Bullet	DART
Соединение	Жесткое / Импульсное	Жесткое / Форсированное с переменным шагом	Жесткое / Импульсное	Жесткое / Импульсное
Амортизация джойнтов	Явная или неявная	Неявная	Явная	Неявная
Координаты	Максимизированные	Обобщенные	Максимизированные	Обобщенные

Рис. 2. Характеристики физических модулей

различных типов почвы на сцепление», и «взаимодействие навесного оборудования с землей» [7].

В результате проведенного анализа был сформулирован алгоритм для точного физического моделирования сложных технических систем на персональном компьютере:

1. Выбор платформы Gazebo версии 9 и выше в качестве среды моделирования.
2. Интеграция с модулем DART.
3. Создание графической модели трактора в редакторе.
4. Формирование конфигурации модели трактора с указанием всех физических параметров и материалов.
5. Установить все связи между визуальной и физической моделями с помощью конфигурационного файла.

6. Разработка плагина для реализации поведения модели трактора.
7. Формирование файла «world», в котором указываются подключаемые плагины и загружаемые объекты.
8. Запустить симуляцию с использованием созданного из предыдущего пункта файла «world».

Применение данного алгоритма позволяет наблюдать и анализировать поведение сложных технических систем, таких как тракторы, в различных условиях эксплуатации.

Этот программный комплекс для точного физического моделирования был использован при разработке беспилотного сельскохозяйственного транспортного средства (БТС). В результате были созданы точные физические модели интерактивных объектов для симулятора



Рис. 3. Полигон испытаний сложных технических систем

Gazebo и виртуальная испытательная площадка для последующего моделирования и тестирования 3D-модели БСТС, что существенно сократило затраты на разработку реального БСТС.

Общая модель полигона приведена на рисунке 3.

Интерактивные объекты подразделяются на 3 категории: статические объекты (стог сена, столбы, кустарники, деревья и др.), динамические (люди, скот, дикие животные), детальная модель БСТС.

Основными результатами являются математические и алгоритмические модели и методы перемещения реальной БСТС [8-10]. Результаты были достигнуты с помощью проведения испытаний БСТС на виртуальном полигоне с виртуальной моделью БСТС.

### Выводы

Исследование принципов точного физического и визуального моделирования сложных технических систем

с использованием современных программных средств подчеркивает значимость разработки методологии достоверного моделирования. Разработанная методология позволяет эффективно интегрировать и испытывать различные робототехнические платформы и технические системы без риска повреждения реальных объектов. Это существенно ускоряет процесс разработки новых технологий, сокращает финансовые затраты и время. Такой подход способствует прогрессу в области робототехники и создает основу для создания эффективных и устойчивых решений в различных отраслях промышленности, включая сельское хозяйство.

*Благодарность:* Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета («ПРИОРИТЕТ-2030»).

ЛИТЕРАТУРА

1. Egorchev A., Chickrin D. Methodology and model of unmanned vehicles virtual simulation. // Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems. 2020. Vol. 12. Iss. 6. 1316 pp. doi: 10.5373/JARDCS/V12I2/S20201324.
2. Gazebo Simulator [сайт]. Режим доступа: <http://gazebosim.org/>, свободный (дата обращения: 15.06.2024).
3. Физический движок DART [сайт]. Режим доступа: <https://github.com/dartsim/dart/>, свободный (дата обращения 15.06.2024).
4. Физический движок ODE [сайт]. Режим доступа: <https://ode.org/>, свободный (дата обращения 15.06.2024).
5. Физический движок Bullet [сайт]. Режим доступа: <https://code.google.com/archive/p/bullet/>, свободный (дата обращения 15.06.2024).
6. Физический движок Simbody [сайт]. Режим доступа: <https://simtk.org/projects/simbody/>, свободный (дата обращения 15.06.2024).
7. Математическая модель робота-автомобиля в симуляторе Gazebo / Е.В. Корягин, О.В. Толстель, Д.Н. Хуторной, А.Г. Челядинский // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Физико-математические и технические науки. — 2016. — № 1. — С. 5287579. — EDN VWPEEN.
8. Autonomous localized path planning algorithm for UAVs based on TD3 strategy / Zh. Feiyu, Li. Dayan, W. Zhengxu [et al.] // Scientific Reports. — 2024. — Vol. 14, No. 1. — P. 763. — DOI 10.1038/s41598-024-51349-4. — EDN DMELOW.
9. Multi-robot coalition formation for precision agriculture scenario based on gazebo simulator / N. Teslya, A. Smirnov, A. Ionov, A. Kudrov // Smart Innovation, Systems and Technologies. — 2021. — Vol. 187. — P. 329–341. — DOI 10.1007/978-981-15-5580-0\_27. — EDN RDIADH.
10. Simulation Components in Gazebo / I. Peake, J.La Delfa, R. Bejarano, J.O. Blech // Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology: 22, Valencia, 10–12 марта 2021 года. — Valencia, 2021. — P. 1169–1175. — DOI 10.1109/ICIT46573.2021.9453594. — EDN DJJZSN.

---

© Галиуллин Искандер Гаязович (isgaliullin@gmail.com); Тимершин Булат Айратович (btimershin99@xmail.com)  
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»