

## Система виртуального моделирования робототехнических систем сельскохозяйственного назначения

М. И. Анчёков, А. М. Лешкенов

Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук  
360010, Россия, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2

**Аннотация.** В данной работе предложена система виртуального моделирования сельскохозяйственных роботов. Проведен анализ существующих систем моделирования. Сформулированы требования к системе виртуального моделирования, которая позволит решать задачи коллективной роботизированной борьбы с сорняками и задачи высокопроизводительного фенотипирования.

**Ключевые слова:** системы виртуального моделирования, робототехника, борьба с сорняками, фенотипирование

Поступила 30.11.2023, одобрена после рецензирования 07.12.2023, принята к публикации 10.12.2023

**Для цитирования.** Анчёков М. И., Лешкенов А. М. Система виртуального моделирования робототехнических систем сельскохозяйственного назначения // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 125–131. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-125-131

MSC: 68T40

Original article

## System for virtual simulation of robotic systems for agricultural purposes

M.I. Anchekov, A.M. Leshkenov

Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences  
360010, Russia, Nalchik, 2 Balkarov street

**Abstract.** This paper proposes a system for virtual simulation of agricultural robots. An analysis of existing simulation systems was carried out. Requirements for a virtual simulation system are formulated, which will allow solving problems of collective robotic weed control and high-throughput phenotyping.

**Keywords:** virtual simulation systems, robotics, weed control, phenotyping

Submitted 30.11.2023, approved after reviewing 07.12.2023, accepted for publication 10.12.2023

**For citation.** Anchekov M.I., Leshkenov A.M. System for virtual simulation of robotic systems for agricultural purposes. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2023. No. 6(116). Pp. 125–131. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-125-131

### ВВЕДЕНИЕ

Виртуальное моделирование робототехнических систем является важным этапом их создания. Оно позволяет быстро проверять гипотезы, сравнивать разные подходы, рассчитывать экономическую эффективность и т.д. Отсутствие круглогодичной возможности натуральных экспериментов при разработке сельскохозяйственных роботов, предназначен-

ных для высокопроизводительного фенотипирования и борьбы с сорняками, актуализирует задачу разработки систем виртуального моделирования.

На данный момент существуют системы виртуального моделирования, которые можно условно разделить на два больших класса: специализированные системы и системы на основе графических (игровых) движков.

К специализированным можно отнести ROS/Gazebo, Isaac SDK, CoppeliaSim (бывшая V-REP). К системам, основанным на игровых движках, можно отнести системы на основе Unity3d, Unreal Engine.

ROS/Gazebo – программный комплекс, состоящий из взаимодействующих элементов, которые развиваются сообществом отдельно. ROS (Robot Operating System) предоставляет набор программ и библиотек, который позволяет решать широкий спектр задач (системы автоматического управления, алгоритмы поиска пути, реализация сенсорной и эффекторной системы роботов и т.д.). Gazebo – это 3D физический симулятор робототехнических систем, который основывается на физическом движке ODE [1, 2]. Моделирование на основе предложенного программного комплекса позволяет создавать симуляции с высокой степенью физической корректности, пользоваться большим количеством готовых решений и де-факто является стандартом в области моделирования роботов.

В случае, если есть необходимость решать высокопроизводительные задачи как на этапе моделирования, так и на этапе внедрения, можно воспользоваться дополнениями к ROS, реализованными компанией NVIDIA в программном комплексе NVIDIA Isaac ROS<sup>1</sup>. Данное решение можно назвать инфраструктурным, так как оно позволяет уже на этапе моделирования сориентироваться на высокопроизводительном вычислителе, который будет установлен на реальном роботе, и начать его использовать.

CoppeliaSim является программой, которую разрабатывает Coppelia Robotics AG. При установке CoppeliaSim [3] мы получаем готовую среду моделирования, в которой уже имеется некоторое количество готовых примеров, документация.

Виртуальное моделирование на основе игровых движков Unity3D [4, 5], Unreal Engine [6] позволяет создавать достаточно детализированные симуляции. Однако изначально они создавались для других целей, и процесс разработки виртуальной модели может занять много времени.

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На наш взгляд, все вышеуказанные системы обладают своими положительными характеристиками, однако у них есть один достаточно большой минус – высокий порог вхождения. Так, некоторые системы (ROS/Gazebo, Isaac SDK, CoppeliaSim) способны моделировать физическое взаимодействие между роботами и роботами и средой. Данная возможность очень полезна на том этапе разработки, когда уже есть чертежи и макеты проектируемого изделия, известные массогабаритные характеристики основных узлов, силовые характеристики приводов и т.д. Однако на этапе создания систем распознавания, принятия решений и управления решение этих проблем может занять достаточно много времени и, что еще хуже, потребовать постоянного пересмотра полученных решений в процессе дальнейших исследований.

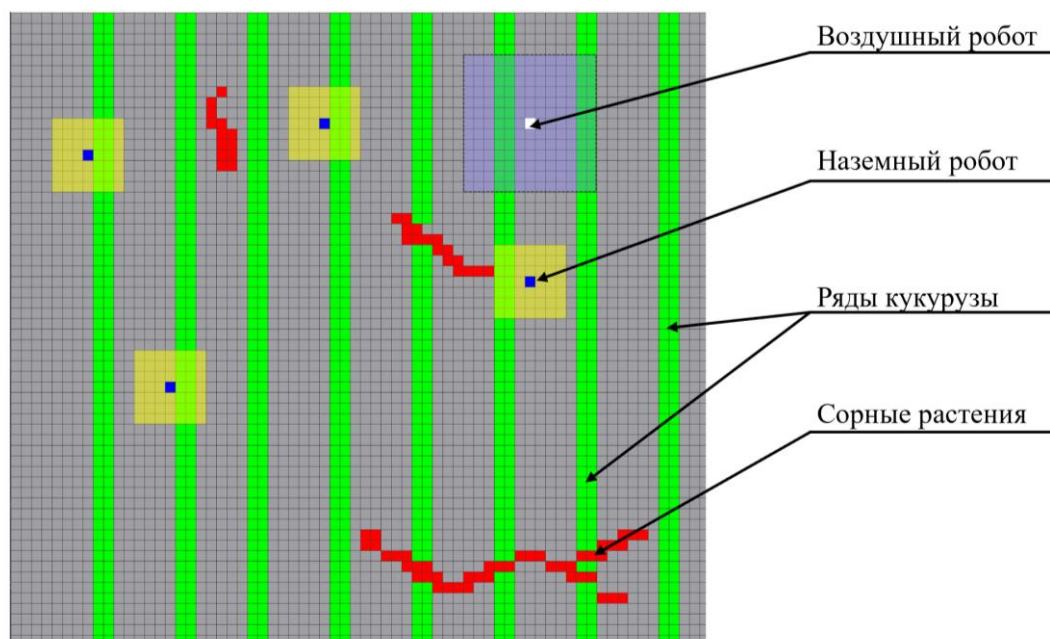
Другие системы (Unity3D, Unreal Engine) являются полноценными игровыми движками (game engine), которые открывают практически неограниченные возможности для визуализации и моделирования робототехнических систем, однако требуют значительного вклада труда программистов.

<sup>1</sup> <https://developer.nvidia.com/isaac-ros>

Таким образом, к основным требованиям разрабатываемой системы можно отнести: низкий порог вхождения, открытость системы для расширения, гибкую настройку функциональности, возможность сетевого взаимодействия, отсутствие привязки к конкретному языку программирования.

#### ОПИСАНИЕ СРЕДЫ

Основными структурными элементами разрабатываемой системы являются: виртуальное поле, роботы (летающие и наземные), растения (культурные и сорные). Виртуальное поле представляет собой клеточный мир. Каждая клетка поделена на ярусы (рис. 1).



*Рис. 1. Виртуальное поле*

*Fig. 1. Virtual field*

Каждый из ярусов содержит информацию, которая необходима для моделирования. Так, первый ярус содержит информацию о дронах, которые в данный момент времени находятся в воздухе. Второй ярус содержит информацию о культурных или сорных растениях. В общем случае информация представляет собой структурированное описание растений (биологические и/или хозяйственно полезные признаки) и графическое представление растений.

Третий ярус предназначен для хранения информации о роботах. В каждой клетке находится информация о роботе, который ее занимает.

Четвертый ярус отвечает за хранение информации о свойствах почвенного слоя. Данная информация нужна для последующего моделирования конкуренции растений и моделирования роботов для анализа почвы.

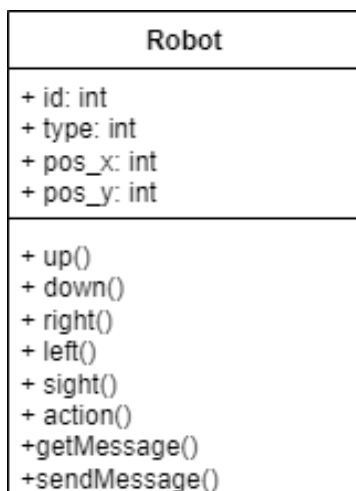
Для настройки виртуальной среды необходимо указать размеры виртуальной среды в клетках. Для начального этапа моделирования целесообразным является выбор масштаба 1 клетка = 1 м<sup>2</sup>. Для детального моделирования следует выбирать масштаб 1 клетка = 1/16 м<sup>2</sup>.

Вид и месторасположение культурных растений задаются файлом конфигурации, который описывает, какое культурное растение находится в конкретной клетке.

Расположение сорных растений может определяться как файлом конфигурации, в котором указано месторасположение, так и генерироваться на основе статистической информации, которая есть у пользователя.

## ОПИСАНИЕ РОБОТОВ

С точки зрения программирования роботы представляют собой класс (рис. 2), у которого обязательно должны быть определены сенсоры окружающей среды, сенсор сообщений от других роботов, эффекторы движения, отправки сообщений и воздействия на окружающую среду. Также роботы должны иметь систему управления. Здесь под системой управления понимается система управления в широком смысле, которая включает в себя систему распознавания, принятия решений и, собственно, систему управления.



*Рис. 2. UML диаграмма класса Robot*

*Fig. 2. UML diagram of the Robot class*

## ОПИСАНИЕ РАСТЕНИЙ

В общем случае описание растений можно осуществлять тремя способами:

- статистическим, когда задаются законы пространственного распределения растения и интервалы характеристик, из которых случайным образом выбираются значения конкретного растения;
- детерминированным, когда каждое растение описывается в общем случае кортежем из двух элементов: структурированным описанием и графическим представлением.
- комбинированным, который сочетает в себе первые два способа, например, конкретные положения описываются детерминированным способом, а значения в структурированном описании задаются статистическим.

Такой подход позволит в дальнейшем решать задачи моделирования фенотипирования с помощью роботов.

Далее представлен пример структурного описания кукурузы на основе формата JSON.

```

{
  "id":1000,
  "pos":{"x":5, "y":7},
  "name":"maize",
  "height":2.2,
  "cob":{
    "1":{"mounting height":0.9, "size":0.15},
    "2":{"mounting height":1.3, "size":0.17 }
  }
  "number of leaves": 5
}
  
```

где: id – уникальный номер растения;

pos – координаты растения;

name – название растения;

height – высота растения;

cob – секция описывает початки, высоту их крепления (mounting height), размер (size);

number of leaves – количество листьев.

В случае необходимости описание можно расширить информацией о фазе роста и времени достижения конкретной фазы роста.

#### ОПИСАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Важным аспектом создания среды моделирования являются механизмы взаимодействия составных элементов.

Взаимодействие робот-растение. Как воздушные, так и наземные роботы могут получать информацию только из области видимости, т.е. находятся в частично наблюдаемой среде. Предполагается, что у воздушных роботов область видимости шире, чем у наземных. Конкретные значения задаются на этапе настройки системы моделирования перед запуском. Для систем управления, которые готовы работать с информацией от реальных датчиков, возможно применить процедуру рандомизации, которая изменяет заранее заданные показания сенсорной системы на величину погрешности измерения с заданным законом распределения. Данная процедура позволит решить проблему переобучения, когда система распознавания не строит закономерности, а запоминает конкретные значения. Для решения задач моделирования процесса борьбы с сорняками необходимо реализовать механизм воздействия робота на растение. Для этого в описание как культурных, так и сорных растений добавляется параметр *health*, который является безразмерным и описывает интегральное состояние «здоровья» растения и принимает значение от 0 до 100, где 0 – растение мертвое, 100 – растение абсолютно здорово. Если растение находится в области воздействия робота, робот может изменить значение *health* растения, тем самым имитировать процесс воздействия на растение. Если учесть, что информация о сорных и культурных растениях поступает по одному каналу, роботу необходимо принимать решение о том, как он будет взаимодействовать с каждым растением.

Взаимодействие робот-робот. Для моделирования коллективных эффектов роботам необходимо предоставить возможность обмениваться сообщениями. В зависимости от целей моделирования возможна гибкая настройка среды обмена сообщениями. Так, возможно реализовать обмен сообщениями всех со всеми или ограничить радиус отправки/приема сообщений конкретными значениями, за пределами которых невозможно получить или отправить сообщение.

Взаимодействие робот-среда. Параметры, которые описывают данное взаимодействие, позволяют гибко управлять степенью физической корректности среды. Так, можно задать «стоимость» передвижения роботов и таким образом моделировать процесс выбора оптимального пути. Например, наземные роботы имеют возможность передвигаться только вдоль рядов кукурузы и, соответственно, должны в принятии решений это учитывать, а воздушные роботы не имеют таких ограничений, однако должны учитывать более высокую стоимость (или энергозатратность) своего перемещения. Таким образом, подобный подход позволяет моделировать процесс борьбы с сорными растениями и оценивать экономическую эффективность полученных результатов.

СЕТЕВОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
БЕСПЕРЕБОЙНОСТИ ПРОЦЕССА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Предлагаемая система виртуального моделирования не привязывается к определенным формализмам, с помощью которых разрабатывается система управления робота. Для подключения системы управления к роботу можно воспользоваться двумя механизмами. Первый механизм основан на системе модулей языка Python, когда система управления реализована на языке Python или есть программный интерфейс, позволяющий обратиться к ней с помощью языка Python. Второй механизм основан на так называемой клиент-серверной архитектуре. Система управления конкретного робота может физически находиться на другом компьютере, но при этом обмениваться с сервером по протоколу http. Данный подход обладает большей универсальностью, так как снимает ограничение на совместимость с языком Python.

Задача обеспечения бесперебойности процесса моделирования особо актуальна в случае, если моделирование занимает достаточно продолжительный период времени. В предлагаемой системе она решается за счет периодического сохранения промежуточных этапов в базу данных, к которым можно будет вернуться в случае, если произошел сбой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье описаны основные существующие системы виртуального моделирования сельскохозяйственных роботов. Показана актуальность разработки системы моделирования, которая обладает новыми свойствами и лишена недостатков предыдущих систем. Дальнейшее развитие предложенной системы моделирования необходимо расширить, добавив возможность моделирования вредителей и болезней растений.

REFERENCES

1. Zhao S., Hwang S.-H. Complete coverage path planning scheme for autonomous navigation ROS-based robots. *ICT Express*. 2023.
2. Albonico M. et al. Software engineering research on the Robot Operating System: A systematic mapping study. *Journal of Systems and Software*. 2023. Vol. 197. P. 111574.
3. Ribeiro J.P.L. и др. Computational Simulation of an Agricultural Robotic Rover for Weed Control and Fallen Fruit Collection—Algorithms for Image Detection and Recognition and Systems Control, Regulation, and Command. *Electronics*. 2022. Vol. 11. No. 5. P. 790.
4. Wang C. и др. Virtual Simulation of Fruit Picking Robot Based on Unity3D. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. Vol. 1631. No. 1. P. 012033.
5. Аверкин А. Н. и др. Разработка моделей и алгоритмов для беспилотного управления сельскохозяйственной техникой с применением технологий виртуальной и дополненной реальности // Вестник ТГТУ. 2020. № 4.  
Averkin A.N. et al. Development of models and algorithms for unmanned control of agricultural machinery using virtual and augmented reality technologies. *Vestnik TGTU*. 2020. No. 4. (In Russian)
6. Jiang C. et al. Co-simulation of the Unreal Engine and MATLAB/Simulink for Automated Grain Offloading. *IFAC-PapersOnLine*. 2022. Vol. 55. No. 24. Pp. 379–384.

### **Информация об авторах**

**Анчёков Мурат Инусович**, науч. сотр. лаборатории «Молекулярная селекция и биотехнология», Кабардино-Балкарский научный центр РАН;

360000, Россия, г. Нальчик, ул. Кирова, 224;

murat.antchok@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8977-797X>

**Лешкенов Аслан Мухамедович**, зав. лабораторией «Сельскохозяйственная робототехника», Кабардино-Балкарский научный центр РАН;

360002, Россия, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2;

aslan.leshckenov@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9516-3213>

### **Information about the authors**

**Anchekov Murat Inusovich**, Researcher of the Laboratory “Molecular selection and biotechnology”, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360000, Russia, Nalchik, 224 Kirov street;

murat.antchok@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8977-797X>

**Leshckenov Aslan Muhamedovich**, Head of the Laboratory “Agricultural robotics”, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360002, Russia, Nalchik, 2 Balkarov street;

aslan.leshckenov@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9516-3213>