

АРХИТЕКТУРА СРЕДЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОАГЕНТНЫХ СИСТЕМ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ В ЗАДАЧАХ КОМАНДНОГО ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ

ARCHITECTURE OF A SIMULATION ENVIRONMENT FOR REAL-TIME MULTI- AGENT SYSTEMS IN THE TASK OF TEAM OPPOSITION

**M. Panteleyev
S. Lityagin**

Summary. This paper presents the architecture of a simulation environment for real-time multi-agent systems (RT MAS SE) designed for testing scenarios of team opposition. Based on the identified requirements for RT MAS SE and the analysis of existing solutions, a client-server architecture is proposed that ensures scalability across distributed computing resources and modularity of software components. The server part of RT MAS SE implements the modeling of environment dynamics and sensor data, which are transmitted to clients containing intelligent agents and implementing their logic (including team interaction strategies). The paper describes the main interface modules that allow developers to implement various physical platforms, their motion models, sensors and sensor data, as well as to organize network communication using different technologies without changing the overall logic of the RT MAS SE. The limitations of the proposed architecture are identified: the absence of terrain modeling and collision detection between physical platforms; unified storage of sensor data for different sensors in a single container; simplified communication logic between agents. The results of this study can be applied to the development and testing of real-time multi-agent systems in tasks of team opposition. Future work includes extending the architecture by modeling terrain maps and support for training reinforcement learning (RL) agents.

Keywords: team opposition, distributed computing resources, client-server architecture, intelligent agent, simulation environment, real-time multi-agent system.

Пантелеев Михаил Георгиевич
кандидат технических наук, доцент,
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
mgpanteleev@etu.ru

Литягин Семён Михайлович
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
semen.lol@yandex.ru

Аннотация. В данной статье рассматривается архитектура среды имитационного моделирования многоагентных систем реального времени (СИМ МАС РВ), ориентированная на отработку сценариев командного противодействия. На основе выделенных требований к СИМ МАС РВ и анализе существующих СИМ МАС РВ предложена клиент-серверная архитектура СИМ МАС РВ, обеспечивающая масштабируемость на распределенные вычислительные ресурсы и модульность программных компонентов. Серверная часть СИМ МАС РВ реализует моделирование динамики среды и сенсорных данных, которых отправляются на клиенты, содержащие интеллектуальных агентов и реализующих их логику (в том числе логику командного взаимодействия). В работе описаны основные интерфейсные модули, позволяющие разработчикам реализовывать разные физические платформы, модели их движения, сенсоры, сенсорные данные, а также реализовывать сетевое взаимодействие с помощью разных технологий без изменений общей логики СИМ МАС РВ. Выделены ограничения предлагаемой архитектуры СИМ МАС РВ: отсутствие моделирования карты местности и коллизий между физическими платформами; сенсорные данные для разных сенсоров хранятся в едином контейнере, упрощенная логика коммуникации между агентами. Результаты исследования применимы для разработки и апробации многоагентных систем реального времени в задачах командного противодействия. В дальнейшем планируется расширение архитектуры за счет моделирования с учетом карты местности, добавления возможности обучать интеллектуальных агентов с подкреплением.

Ключевые слова: командное противодействие, распределенные вычислительные ресурсы, клиент-серверная архитектура, интеллектуальный агент, среда имитационного моделирования, многоагентная система реального времени.

Введение

Для современных задач все чаще применяются решения из области искусственного интеллекта, способные корректно работать в условиях открытого мира реального времени, изменяющегося непрерывно и динамически. Особый интерес в этой области представляют решения в виде интеллектуальных агентов, способных адаптироваться к такому миру, взаимодействовать и координировать свои действия в команде, образующей многоагентную систему [1, 2] реального времени. Разработка многоагентной системы реального времени, функционирующей в реальном мире (беспилотные наземные, воздушные, водные аппараты), затруднена дороговизной оборудования, ограничениями в масштабируемости экспериментов и другими факторами, поэтому широко применяются среды имитационного моделирования многоагентных систем реального времени (СИМ MAC PB).

Большинство существующих СИМ MAC PB ориентированы на физически достоверное моделирование динамики [3, 4], моделирование реалистичной графики [5], «заточены» под ограниченные сценарии [6, 7] (как при моделировании мира, так и при моделировании физической платформы с интеллектуальным агентом, действующим в этом мире). Они позволяют использовать ограниченные классы интеллектуальных агентов [8], имеют ограниченное число моделей сенсорных данных, на основе которых интеллектуальный агент может реализовывать интеллектуальную деятельность, что актуализирует разработку СИМ MAC PB [9], преодолевающую эти ограничения.

В рамках данной работы предлагается архитектура СИМ MAC PB, позволяющая реализовывать сценарии командного противодействия для тестирования разработанных многоагентных систем реального времени согласно следующим требованиям [8, 9]:

1. Моделирование разных классов интеллектуальных агентов как в части робототехнической платформы, так и в части архитектуры интеллектуальной подсистемы интеллектуального агента;
2. Добавление и моделирование разных компонентов физической платформы интеллектуального агента (модели движения, сенсоры);
3. Моделирование в масштабе времени, заданном тактом моделирования, который соответствует динамике процессов в моделируемом мире;
4. Масштабируемость на распределенные вычислительные ресурсы (распределение моделирования интеллектуальных клиентов на отдельные вычислительные ресурсы) в локальной сети;
5. Моделирование различных сенсорных данных и их отправка целевому интеллектуальному агенту;

6. Реализация действий, инициируемых интеллектуальными агентами;
7. Моделирование командных сценариев;
8. Отсутствие ограничений стратегии командного взаимодействия интеллектуальных агентов;
9. Поддержка модульности программных компонентов СИМ MAC PB.

Объектом исследования является процесс моделирования многоагентной системы в условиях открытого мира реального времени, изменяющегося непрерывно и динамически.

Предметом исследования выступает процесс создания архитектуры среды имитационного моделирования многоагентных систем реального времени, обеспечивающей имитацию поведения интеллектуальных агентов в рамках заданного сценария и сенсорных данных, воспринимаемых интеллектуальными агентами.

Цель исследования заключается в проектировании архитектуры среды имитационного моделирования многоагентных систем реального времени с возможностью масштабирования на распределенные вычислительные ресурсы.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи исследования:

1. Определить последовательность действий, выполняемых СИМ MAC PB в заданном такте моделирования, образующих цикл имитационного моделирования СИМ MAC PB;
2. Спроектировать клиент-серверную архитектуру СИМ MAC PB;
3. Оценить преимущества и недостатки созданной архитектуры СИМ MAC PB.

Цикл имитационного моделирования СИМ MAC PB

Для проектирования архитектуры СИМ MAC PB рассмотрим ментальный цикл интеллектуального агента:

1. Наблюдать — восприятие мира через сенсоры;
2. Обдумывать — анализировать наблюдения и формировать картину мира;
3. Принимать решение — формировать план по достижению поставленной интеллектуальному агенту цели;
4. Выполнять действие — воздействовать на мир через актуаторы.

СИМ MAC PB должна реализовывать первый и последний пункты — формировать сенсорные данные на основе моделируемого мира, по которым интеллектуальный агент строит картину мира, и изменять моделируемый мир на основе действий, выбранных в ходе

интеллектуальной деятельности агента. На основе этих пунктов формируется цикл имитационного моделирования СИМ MAC PB.

Цикл имитационного моделирования СИМ MAC PB в данной работе построен на основе цикла, определенного в [8]. Итерация цикла имитационного моделирования СИМ MAC PB задается тактом моделирования. В начале каждой итерации выполняется расчет сенсорных данных для каждого интеллектуального агента. Далее они отправляются интеллектуальным агентам. Сразу после отправки СИМ MAC PB ставит таймер на время, отведенное для выполнения интеллектуальной деятельности интеллектуального агента. По истечении этого времени СИМ MAC PB запрашивает воздействия на моделируемый мир от интеллектуальных агентов (изменение ускорения, изменения режима работы сенсора, отправка сообщения другому интеллектуальному агенту и др.), получает и выполняет их, а затем пересчитывает физические состояния моделируемых физических платформ (согласно такту моделирования).

Следует отметить, что если интеллектуальный агент не успел выполнить действие в рамках текущего такта моделирования, то такое действие не учитывается в текущей итерации. Возможность его выполнения в дальнейшем зависит от реализации интеллектуального агента.

Архитектура СИМ MAC PB

В данной работе для учета требования масштабируемости на распределенные вычислительные ресурсы выбрана клиент-серверная модель. Серверная часть СИМ MAC PB отвечает за моделирование физических процес-

сов — расчет состояний физических платформ с учетом их модели движения в течение заданного временного такта моделирования, расчет сенсорных данных согласно набору сенсоров физической платформы, выполнение действий для воздействия на мир интеллектуальных агентов, а также за коммуникацию с клиентами (на которых реализуется логика интеллектуальных агентов) по сети.

Разделение логики интеллектуальных агентов на клиентов не ограничивает разработчиков многоагентных систем в части реализации интеллектуальных агентов с разной архитектурой интеллектуальных подсистем. Более того, это позволяет разработчикам использовать разные языки программирования для реализации интеллектуальных агентов на клиентах.

Выделим основные программные модули:

1. Модуль инициализации физических платформ по файлу конфигурации, `ObjectsConfigParseBase`;
2. Модуль сетевого взаимодействия, `NetworkServerBase`;
3. Модуль СИМ MAC PB, реализующий цикл имитационного моделирования, `ServerBase`;
4. Модуль физической платформы, `Object`;
5. Модуль модели движения физической платформы, `MovementModel`;
6. Модуль сенсора, `Sensor`;
7. Модуль действий для воздействия на моделируемый мир, `Action`.

На рисунке 1 показана UML диаграмма модулей `ServerBase`, `ObjectsConfigParseBase`, `NetworkServerBase`.

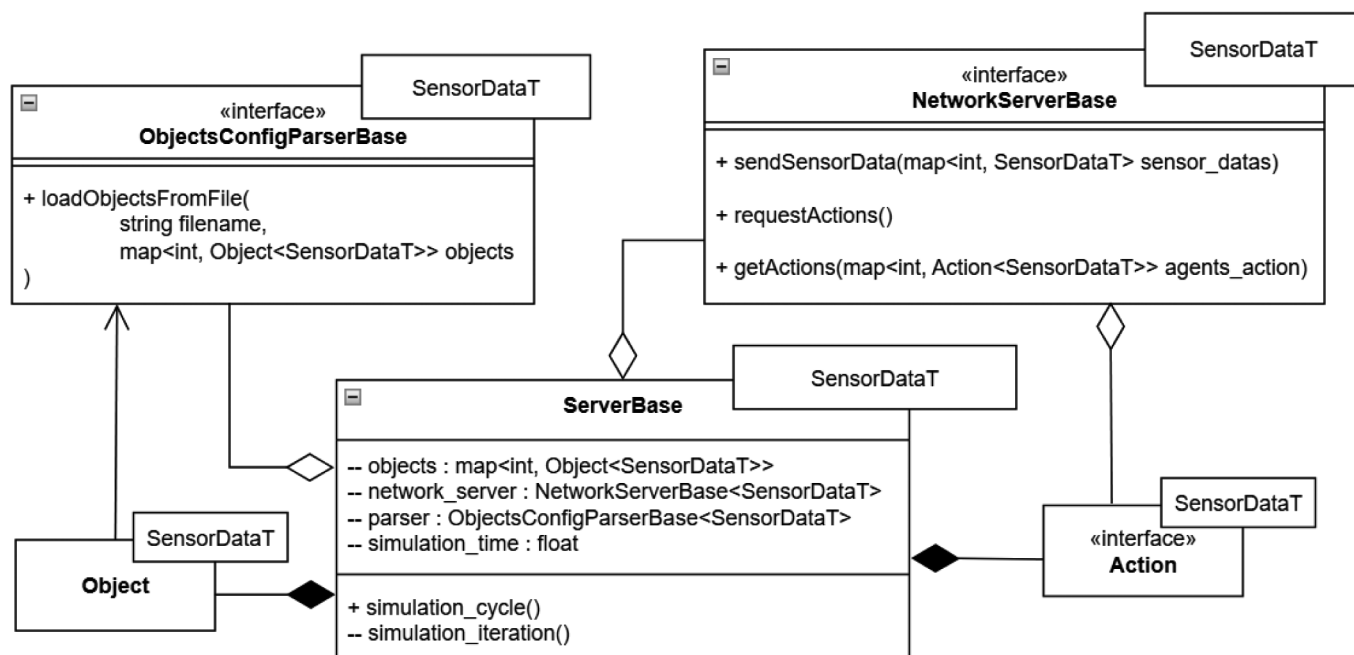


Рис. 1. UML диаграмма серверной части СИМ MAC PB с модулем сетевого взаимодействия

Все представленные модули являются классами-шаблонами (некоторые являются также интерфейсами), что позволяет заменять структуры сенсорных данных SensorDataT, переписывая при этом лишь реализации интерфейсов программных модулей СИМ MAC PB.

Главным программным модулем является ServerBase, реализующий цикл имитационного моделирования СИМ MAC PB, хранящий все моделируемые физические платформы; объект, реализующий сетевое взаимодействие; объект, инициализирующий физические платформы по файлу конфигурации. Файл конфигурации содержит информацию о физических платформах, которые должны быть инициализированы СИМ MAC PB перед началом моделирования.

Описание физических платформ в файле конфигурации зависит от области применения интеллектуального агента, а также от сложности моделируемого сценария, поэтому в модуле ObjectsConfigParseBase реализован интерфейс, позволяющий в случае изменения структуры описания физических платформ изменять лишь реализацию этого интерфейса, не изменяя при этом логику других программных модулей.

В модуле сетевого взаимодействия NetworkServerBase реализован интерфейс, позволяющий в реализациях изменять протоколы сетевого взаимодействия, при этом не затрагивая логику остальных модулей. В логику дан-

ного модуля входит отправка сенсорных данных клиентам по их идентификатору, а также сбор действий от клиентов, которые после будут переданы в ServerBase. В методы интерфейса отдельно выделен метод запроса действий от клиентов и метод передачи полученных действий. Это позволяет реализовывать как синхронные протоколы с последовательным запросом и получением в ответ действия от клиента, так и асинхронные.

Для практической реализации может быть использована асинхронная модель обмена на основе UDP с сериализацией сообщений через Protocol Buffers (protobuf), что допустимо при работе в локальной сети, где потери пакетов минимальны. Однако данный выбор не является фиксированным и может быть заменен, например, на TCP или gRPC, в зависимости от требований к системе (выбор напрямую влияет на масштабируемость СИМ MAC PB).

На рисунке 2 представлена UML диаграмма модулей Object, MovementModel, Sensor, Action. Представленные модули также являются классами-шаблонами и/или интерфейсами для удобства работы с изменениями структуры сенсорных данных и действий клиентов.

В модуле сенсора Sensor реализован интерфейс, шаблонизируемый структурой сенсорных данных, позволяющий в реализациях задавать логику формирования сенсорных данных по физической платформе, на ко-

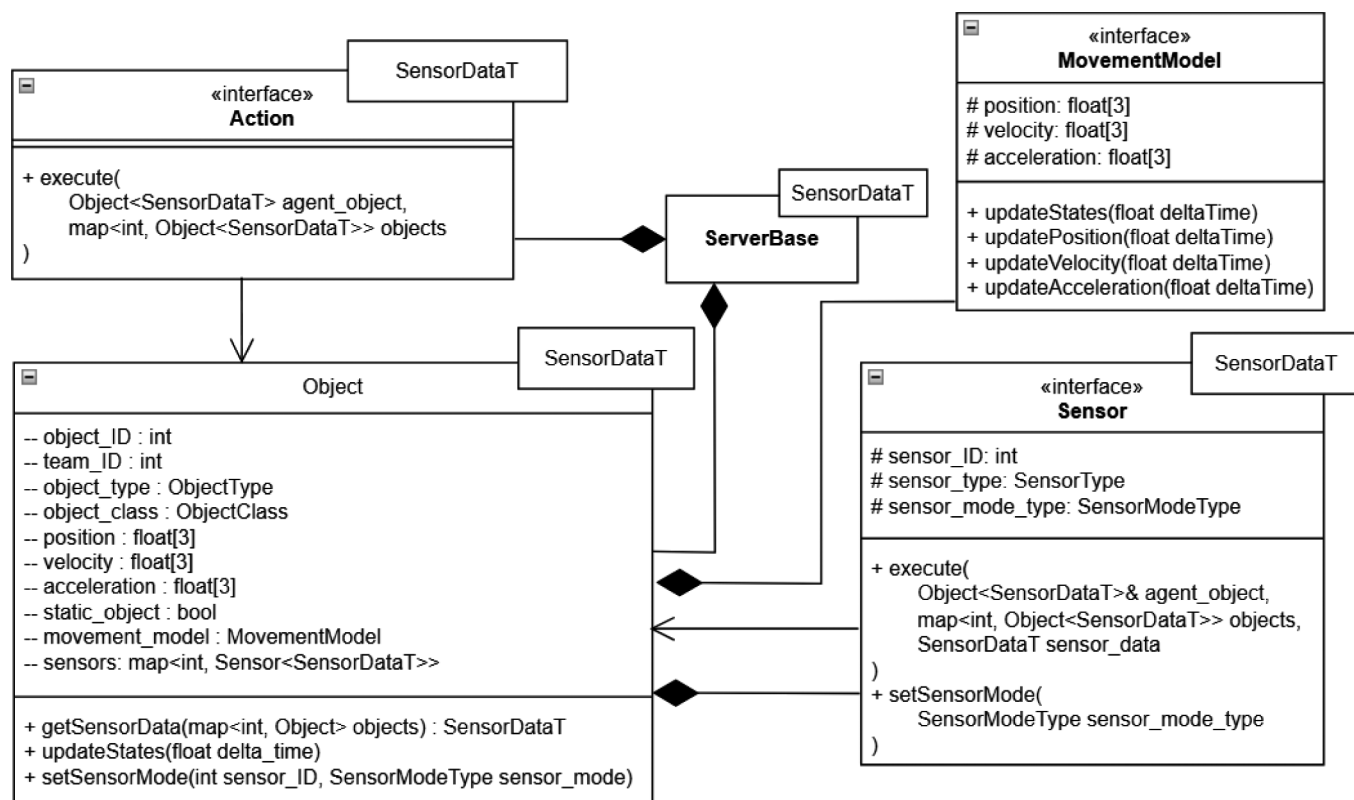


Рис. 2. UML диаграмма серверной части СИМ MAC PB с модулями для моделирования мира

торую этот сенсор установлен, и по всем физическим платформам, участвующих в моделируемом сценарии. В текущей работе для сенсоров выделяются режимы работы, по которым в реализациях сенсора от данного интерфейса требуется устанавливать определенные параметры (например, при реализации радара параметром будет радиус действия, и в разных режимах работы будет изменяться значение этого параметра).

В классической литературе по мобильной робототехнике [10] подробно описаны типовые сенсоры (лидар, камера, ультразвук и др.). Реализация моделирования для сенсоров низкоуровневых сенсорных данных (облака точек для лидаров, многоканальные изображения для камер и др.) избыточно, поскольку разработчика MAC в первую очередь интересует апробация разработанной MAC системы. Сенсорные данные для этого достаточно моделировать как результат обработки низкоуровневых данных (в виде информации об обнаруженных объектах и проч.), что снижает нагрузку на передачу данных от сервера к клиенту, а также уменьшает время генерации сенсорных данных для большого числа моделируемых физических платформ.

В модуле физической платформы Object реализован класс-шаблон, где хранится состояние физической платформы (позиция, скорость, ускорение, статичность), информация о ней (класс, тип, идентификатор, принадлежность к определенной команде), модель движения и сенсоры. Реализованная логика класса физической платформы позволяет получать сенсорные данные, устанавливать режимы работы для сенсоров, обновлять состояния физической платформы по заданному временному такту.

Для удобства дальнейшей реализации различных моделей движения сформирован отдельный модуль MovementModel.

В модуле воздействия на моделируемый мир Action реализован интерфейс, который позволяет в дальнейшем реализовывать различную логику воздействия на мир по полученным сообщениям в модуле сетевого взаимодействия. Это позволяет разработчику реализовывать действия в соответствии со структурой получаемого сообщения и применять его либо к физической платформе самого интеллектуального агента, либо к другим моделируемым физическим платформам.

Таким образом, сервер СИМ MAC PB выполняет только моделирование динамики среды. Вся логика интеллектуального агента реализуется отдельно на клиентах, как и логика стратегии командного взаимодействия. Ряд таких стратегий потребует реализации коммуникации между интеллектуальными агентами, что не ограничивается описанными модулями [11]. Достаточно реализо-

вать соответствующий сенсор и действие по передаче сообщения.

Заключение

Предлагаемая архитектура СИМ MAC PB удовлетворяет требованиям масштабируемости на распределенные вычислительные ресурсы и в то же время не накладывает ограничения на разные архитектуры интеллектуальных подсистем интеллектуальных агентов.

Реализация основных модулей СИМ MAC PB удовлетворяет требованию модульности, требованию добавления и моделирования сенсоров с разными сенсорными данными, разных физических платформ, разных действий интеллектуальных агентов для влияния на моделируемый мир. Более того, модульность позволяет разработчикам реализовывать различные протоколы сетевого взаимодействия.

Добавление и моделирование сенсоров с разными сенсорными данными и разнообразных действий интеллектуальных агентов удовлетворяет требованию исключения ограничений стратегии командного взаимодействия интеллектуальных агентов, а поддержка поля номера команды в модуле физической платформы Object обеспечивает поддержку команд. Основная логика таких стратегий должна реализовываться в интеллектуальных подсистемах интеллектуальных агентов, но в некоторых случаях требуется реализация коммуникации между интеллектуальными агентами. В роли коммуникатора могут выступать соответствующий сенсор и действие с гибкой структурой сообщений.

Цикл имитационного моделирования СИМ MAC PB в модуле ServerBase удовлетворяет требованию моделирования в масштабе времени, задающем динамику процессов в моделируемом мире.

В предлагаемых модулях СИМ MAC PB интерфейсы и/или классы-шаблоны реализованы с допущениями, составляющими ограничения для разработчиков многоагентных систем.

Главное ограничение предлагаемой архитектуры СИМ MAC PB — отсутствие возможности задавать в моделируемом физическом мире карту местности. Например, — в виде плоскости с зонами, где зона с лесом влияет на распознавание физических платформ сенсорами, а зона с болотистой местностью влияет на скорость передвижения наземных физических платформ. В такой архитектуре моделируемый мир представлен как набор физических платформ. Менее значимым ограничением является отсутствие коллизии между физическими платформами — метод обновления состояния физической платформы в модуле Object не имеет доступа к модели-

руемым физическим платформам в мире для проверки столкновений.

Еще одним ограничением является единая структура сенсорных данных. В допущении единой структуры сенсорных данных стало возможно реализовать основные модули как классы-шаблоны, однако это приводит к тому, что в реализациях структура сенсорных данных должна иметь возможность содержать все возможные сенсорные данные (например, один сенсор имеет возможность фиксировать скорость движения физических платформ и их положение, а другой — их положение, тип и класс, что приведет к сохранению структур сенсорных данных для каждого из сенсоров в единой структуре). Другое ограничение сенсоров в предлагаемой архитектуре СИМ MAC РВ состоит в том, что не учтен вариант работы сенсоров с разной частотой получения сенсорных данных.

Усложнение логики коммуникации между агентами приведет к сложности использования коммуникатора как обычного сенсора, что потребует реализации отдельного модуля и включения его в логику остальных модулей.

В текущей реализации архитектура СИМ MAC РВ ориентирована преимущественно на тестирование разрабатываемых MAC, а не на обеспечение инфраструктуры для их обучения. Значительное количество современных исследований связано именно с обучением многоагентных систем в средах смешанного кооперативно-конкурентного взаимодействия [12], поэтому для расширения применимости СИМ MAC РВ потребуется интеграция механизмов, поддерживающих обучение MAC (в том числе механизмов обучения с подкреплением), что позволит использовать СИМ MAC РВ не только для апробации, но и для обучения MAC.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ferber J. Multi-Agent Systems: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence. — Addison-Wesley, 1999. ISBN 978-0201360486.
2. Wooldridge M. An Introduction to MultiAgent Systems. — 2nd ed. — Chichester: John Wiley & Sons, 2009. ISBN 978-0470519462.
3. Gazebo Simulator [Электронный ресурс]. — 2025. — URL: <https://gazebo.org/home> (дата обращения: 02.04.2025).
4. Koenig N., Howard A. Design and Use Paradigms for Gazebo, An Open-Source Multi-Robot Simulator // Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). — 2004. DOI: 10.1109/IROS.2004.1389727.
5. Juliani A., Berges V.-P., Viger F., Cohen A., Harper J., Henry H., Mattar M., Lange D. Unity: A General Platform for Intelligent Agents [Электронный ресурс]. — 2020. — arXiv:1809.02627 [cs.LG]. — URL: <https://arxiv.org/abs/1809.02627> (дата обращения: 14.04.2025).
6. RoboCup Soccer Simulator [Электронный ресурс]. — 2025. — URL: <https://rscocersim.github.io/> (дата обращения: 10.04.2025).
7. Zheng L., Yang J., Cai H., Zhou M., Zhang W., Wang J., Yu Y. MAgent: A Many-Agent Reinforcement Learning Platform for Artificial Collective Intelligence // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. — 2018. — Vol. 32, No. 1.
8. Пантелеев М.Г., Кохтенко Н.В., Лебедев С.В. Среда имитационного моделирования агентных систем реального времени // Науч.-техн. вестн. информ. технологий, механики и оптики. — 2012. — № 1 (77). — С. 53–57. — УДК 004.94:519.876.5.
9. Литягин С.М. Анализ сред имитационного моделирования многоагентных систем реального времени // Наука настоящего и будущего: сб. материалов XII науч.-практ. конф. с междунар. участием для студентов, аспирантов и молодых ученых. Т. I. — [б. м.], 2025. — С. 52. — Секция: искусственный интеллект в прикладных областях.
10. Siegwart R., Nourbakhsh I.R., Scaramuzza D. Introduction to Autonomous Mobile Robots. — 2nd ed. — Cambridge, MA: MIT Press, 2011. ISBN 978-0262015356.
11. Новикова А.С., Ромашкова О.Н. Интеграция нейросетей в информационные системы розничных торговых сетей: прогнозирование и управление распределением ресурсов // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2024. № 1-2. С. 49–52.
12. Lowe R., Wu Y., Tamar A., Harb J., Abbeel P., Mordatch I. Multi-Agent Actor-Critic for Mixed Cooperative-Competitive Environments [Электронный ресурс] // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS). — 2017. — URL: <https://arxiv.org/abs/1706.02275> (дата обращения: 14.04.2025).

© Пантелеев Михаил Георгиевич (mgpanteleev@etu.ru); Литягин Семён Михайлович (cemen.lol@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»