

Kartel Maksim Sergeevich – Southern Federal University; e-mail: mkartel@sfedu.ru; Taganrog, Russia; research Laboratory "Neuroelectronics and memristive nanomaterials"; research assistant.

Jityaeva Yulia Yurievna – Southern Federal University; e-mail: zhityaeva@sfedu.ru; Taganrog, Russia; research Laboratory of Functional Nanomaterials Technology; junior researcher.

Avakyan Artem Andreevich – Southern Federal University; e-mail: artav@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the Department of Radio Engineering Electronics and Nanoelectronics; postgraduate student.

Smirnov Vladimir Aleksandrovich – Southern Federal University; e-mail: vasmirnov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the Department of Radio Engineering Electronics and Nanoelectronics; cand. of eng. sc.; associate professor; head of department.

УДК 004.81: 004.85, 339.97

DOI 10.18522/2311-3103-2025-2-40-51

З.В. Нагоев, О.З. Загазежева, К.Ч. Бжихатлов, И.А. Мамбетов

РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СБОРА УРОЖАЯ

В условиях необходимости обеспечения продовольственной безопасности актуальными становятся задачи оптимизации производственных процессов в аграрном секторе. Например, учитывая нехватку трудовых ресурсов в сельском хозяйстве, требуется разработка и внедрение робототехнических систем для автоматизации процессов ухода за растениями, сбора урожая и его переработки. В статье представлены результаты разработки автономного робота для сбора яблок, созданного на базе универсального антропоморфного робота, разработанного в Кабардино-Балкарском научном центре РАН. Робот оснащен двумя многозвенными манипуляторами, схожими с руками человека, что позволяет ему выполнять сложные задачи по сбору урожая. Для обеспечения интеллектуального управления всей системой используется мультиагентная нейрокognитивная архитектура, которая имитирует работу человеческого мозга и позволяет роботу адаптироваться к изменяющимся условиям окружающей среды. Робот оснащен набором сенсоров, включая видеокамеры, ультразвуковые и инфракрасные дальномеры, лидар и энкодеры на приводах манипуляторов. Это позволяет ему точно определять местоположение яблок, оценивать их зрелость и планировать траекторию движения манипуляторов. Особое внимание уделено разработке захвата, который имитирует человеческую кисть и позволяет регулировать силу сжатия, что минимизирует риск повреждения плодов. Для управления роботом используется мультиагентная нейрокognитивная архитектура, которая обеспечивает автономное принятие решений на основе данных с сенсоров. Система способна строить карту местности, определять положение робота и планировать маршрут движения, а также распознавать яблоки и оценивать их состояние. В статье также рассмотрены проблемы, связанные с автоматизацией сбора урожая в сельском хозяйстве, включая нехватку трудовых ресурсов и потери урожая из-за неправильной эксплуатации техники. Авторы подчеркивают, что автоматизация и роботизация процессов уборки урожая имеют большой потенциал, особенно для культур, требующих индивидуального подхода, таких как фрукты и овощи. Представленный робот демонстрирует высокую эффективность в решении этих задач, что подтверждается результатами полевых испытаний. Разработанная система может быть адаптирована для работы с другими культурами, что делает ее универсальным решением для сельскохозяйственной отрасли.

Сельское хозяйство; робототехническая система; мультиагентная нейрокognитивная архитектура; экономическая эффективность; интеллектуальное управление; искусственный интеллект.

Z.V. Nagoev, O.Z. Zagazheva, K.Ch. Brzhihatlov, I.A. Mambetov

DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT ROBOTIC HARVESTING SYSTEM

In the context of the need to ensure food security, the tasks of optimizing production processes in the agricultural sector are becoming relevant. For example, given the shortage of labor in agriculture, it is necessary to develop and implement robotic systems to automate the processes of plant care, harvesting and processing. The article presents the results of the development of an autonomous robot for picking apples, created on the basis of a universal anthropomorphic robot developed at the Kabardino-Balkarian

Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. The robot is equipped with two multi-link manipulators similar to human hands, which allows it to perform complex harvesting tasks. To ensure intelligent control of the entire system, a multi-agent neurocognitive architecture is used, which imitates the work of the human brain and allows the robot to adapt to changing environmental conditions. The robot is equipped with a set of sensors, including video cameras, ultrasonic and infrared rangefinders, lidar and encoders on the manipulator drives. This allows it to accurately determine the location of apples, assess their ripeness and plan the trajectory of the manipulators. Particular attention is paid to the development of a gripper that imitates a human hand and allows you to adjust the squeezing force, which minimizes the risk of damage to the fruit. A multi-agent neurocognitive architecture is used to control the robot, which provides autonomous decision-making based on sensor data. The system is able to build a map of the area, determine the position of the robot and plan a route, as well as recognize apples and assess their condition. The article also considers the problems associated with the automation of harvesting in agriculture, including a lack of labor and crop losses due to improper operation of equipment. The authors emphasize that automation and robotization of harvesting processes have great potential, especially for crops that require an individual approach, such as fruits and vegetables. The presented robot demonstrates high efficiency in solving these problems, which is confirmed by the results of field tests. The developed system can be adapted to work with other crops, which makes it a universal solution for the agricultural industry.

Agriculture; robotic system; multi-agent neurocognitive architecture; economic efficiency; intelligent control; artificial intelligence.

Введение. Для России, находящейся в условиях санкций, обеспечение продовольственной безопасности и увеличение объемов отечественного производства сельскохозяйственной продукции являются задачами критической важности. Учитывая санкционное давление и геополитическую напряженность, акцент на импортозамещение и наращивание внутреннего производства становится не просто желательным, а необходимым условием стабильности и независимости.

В цепочке производства сельскохозяйственной продукции, особое внимание следует уделить проблемам сбора урожая. Проблемы, связанные с уборкой урожая, многогранны и зависят от множества факторов, включая тип культуры, географическое расположение, климат, доступные ресурсы и технологии. В основном это трудовые ресурсы, например, по данным руководства союза «Садоводы Кубани», в 2024 году в Краснодарском крае для сбора урожая не хватало 2,5 тыс. человек для уборки урожая.

Также **потери урожая** могут возникать из-за неправильной эксплуатации уборочной техники или проблем с логистикой. Чтобы минимизировать потери, на всех этапах уборочной кампании необходима система управления и четкий контроль [1].

Автоматизация и роботизация процессов сбора урожая, благодаря своей повторяемости, имеет большой потенциал, но пока успешно реализована только для культур, созревающих одновременно и не требующих индивидуальной оценки (например, злаки и корнеплоды). Для уборки фруктов и овощей сложной формы и различной окраски возникают сложности, обусловленные необходимостью использования "умных" систем. Эти системы должны находить и определять местоположение плодов, оценивать их зрелость и безопасно собирать их, не повреждая ни плод, ни растение. Ключевая проблема – не в создании самого робота-манипулятора, а в его управлении и интеллектуальном обеспечении.

В мире множества попыток создания робототехнических систем для уборки плодово-овощной продукции, например прототипы таких роботов: Abundant Robotics (США) – робот для сбора яблок, FF Robotics (Израиль) – робот для сбора апельсинов, Agrobot (Испания) – робот для сбора клубники, Harvest CROO Robotics (США)-робот для сбора клубники, Cambridge Consultants (Великобритания) – разработки в области робототехники для сельского хозяйства, Root AI (США) (приобретена AppHarvest) – Робот Virgo для сбора томатов. К примеру, в статье [2] представлено биомиметическое роботизированное решение, охватывающее цикл "Восприятие-Действие" для сбора клубники в вертикальных фермах. Система использует условные Generative Adversarial Networks (GAN) для идентификации спелых плодов на основе синтетических данных, избегая трудоемкого сбора реальных данных. Локализация плодов выполняется с помощью стереокамеры, а действия робота, включая срезание стеблей, основаны на концепции Passive Motion Paradigm, вдохновленной нейронным контролем движений. Полевые испытания подтвердили эффективность системы в обнаружении плодов, работе со сложными структурами растительного покрова и бимануальной координации. Хотя решение ориентировано на

клубнику, ведутся исследования по адаптации системы для других культур, таких как томаты и сладкий перец, что демонстрирует потенциал для автоматизации сельскохозяйственных задач и снижения зависимости от ручного труда.

В работе [3] исследуется потенциал информационных и коммуникационных технологий (ИКТ) в традиционном сельском хозяйстве, выделяя такие технологии, как робототехника, IoT, машинное обучение и искусственный интеллект (ИИ), а также их применение для мониторинга посевов, оптимизации урожайности и управления сельскохозяйственными процессами. Особое внимание уделено использованию дронов и передовых IoT-платформ. Авторы проводят детальный анализ последних исследований, выделяя текущие и будущие тенденции в области ИИ, а также описывают ключевые задачи, такие как обработка больших объемов данных (data tsunami) и развитие M2M-систем. Отмечается, что цифровизация сельского хозяйства открывает новые возможности для фермеров и потребителей, но также требует решения ряда технологических и исследовательских задач для успешного внедрения инноваций. В статье [4, 5] проводится анализ использования информационно-коммуникационных технологий в организациях предпринимательского сектора Российской Федерации; востребованность новых технологий у хозяйствующих субъектов АПК России; выпуск бакалавров, специалистов, магистров по основным направлениям подготовки и специальностям в области информационно-коммуникационных технологий. Резюмируется, что в результате внедрения инновационных методов цифровой экономики будут достигнуты определенные результаты, связанные с ростом эффективности сельскохозяйственного производства. В первую очередь, это: рост уровня производительности труда в аграрном секторе экономики; снижение потребности в различного вида ресурсах за счет их более экономичного потребления по сравнению с традиционными технологиями; повышение безопасности и условий труда в сельскохозяйственных организациях за счет применения робототехники на вредных и опасных производствах; снижение ущерба, связанного с негативным воздействием человеческого фактора.

К сожалению, российский рынок робототехники для сельского хозяйства, особенно для уборки фруктов, пока не очень развит по сравнению с мировыми лидерами (США, Европа, Израиль). Причины – более поздний старт, меньший объем инвестиций, технологические ограничения. Подобные проблемы также выявлены автором в [6]. В статье анализируются перспективы внедрения технологий искусственного интеллекта (ИИ) в сельское хозяйство Свердловской области, что актуально в связи с быстрым развитием цифровых технологий и неопределенностью их применения в аграрном секторе [7]. На основе анализа публикаций в WoS и опроса руководителей 55 сельскохозяйственных организаций выявлены основные сферы применения ИИ, такие как животноводство (26,0%) и мониторинг благополучия животных (18,5%). Респонденты ожидают увеличения производства продукции (23,2%) и снижения затрат (20,3%), а также считают, что ИИ изменит сельскохозяйственное производство, сократит низкоквалифицированный труд и создаст новые рабочие места в интеллектуальной сфере. Однако, несмотря на положительное восприятие, лишь 9,8% опрошенных уже используют эти технологии. Основными препятствиями являются высокая стоимость и недостаток финансирования, для преодоления которых предлагается увеличить государственную поддержку и повысить квалификацию персонала. Внедрение ИИ позволит повысить точность прогнозов, привлечь инвестиции и увеличить рентабельность производства [8, 9]. Поэтому готового, серийно выпускаемого робота для уборки плодоовощной проекции, который можно просто купить, пока не существует. Статьи [10, 11] исследуют проблемы разработки, внедрения и использования систем искусственного интеллекта (ИИ) в сельском хозяйстве. Авторы анализируют теоретические подходы к определению ИИ и классификации его видов, отмечая, что в настоящее время речь идет преимущественно о «узком» ИИ, предназначенном для решения конкретных задач. В агропромышленном секторе ИИ применяется в двух формах: как программное обеспечение и как роботизированные системы. В ней рассмотрены успешные примеры внедрения таких технологий в сельскохозяйственное производство. Также это проблема хорошо раскрывается в работе [12]. Искусственный интеллект (ИИ) играет важную роль в развитии умного сельского хозяйства, способствуя его устойчивости.

Технологии ИИ активно применяются в таких ключевых областях, как управление почвой и орошением, прогнозирование погоды, мониторинг роста растений, выявление заболеваний и управление скотом [13]. В статьях [14, 15] рассматриваются современные методы ИИ, используемые в этих сферах, с акцентом на применяемые алгоритмы и их влияние на эффективность сельскохозяйственных процессов.

В России в вузах совместно с крупными зарубежными компаниями есть прецеденты разработки в области роботизированных систем для сельского хозяйства, в том числе для уборки фруктов. Эти разработки представляют собой прототипы роботов по уборке яблок.

Аппаратная реализация автономного робота для сбора урожая. Для обеспечения автономного ухода за плодовыми садами необходимо обеспечить мониторинг состояния деревьев, внесение удобрений и лекарственных средств, ухода за деревьями и сбор урожая. Учитывая достаточный разброс выполняемых в саду задач, система роботизации должна состоять либо из гетерогенного набора специализированных роботов для мониторинга, полива, внесения различных препаратов, обрезки деревьев и сбора урожая или использовать универсальных роботов, способных выполнять все эти задачи. В первом случае для работы в интенсивных яблоневых садах (характерных для Кабардино-Балкарской республики) можно использовать систему мониторинга на основе нескольких БПЛА с RGB или мультиспектральными камерами, данные дистанционного зондирования земли, информацию с метеостанций и данные лабораторных анализов проб почвы или самих деревьев. Соответственно, для ухода за деревьями и внесения препаратов необходимо использовать отдельные робототехнические решения. Подобная система на примере кукурузы описана в [16]. Отдельно стоит рассмотреть возможность использования универсальных исполнителей, например автономных человекоподобных роботов для выполнения всего спектра задач в саду. В частности, рассматривается возможность использования универсального робота для сбора яблок, как достаточно сложной для автоматизации задачи.

Для обеспечения автоматизации сбора урожая в яблоневых садах предполагается использование автономных роботов, устанавливаемых на уже существующие транспортные платформы (трактора и мини комбайны для работы в садах), т.е. в местах, где сейчас используется человеческий труд. Робот должен обеспечивать распознавание яблок, оценку их состояния, захват и перемещение в область сбора (ящик или конвейер) без повреждения плодов. Для этого на роботе установлен набор сенсоров, состоящий из двух видеокамер, набора ультразвуковых и инфракрасных датчиков, лидар и набор энкодеров на приводах манипуляторов. Отдельно стоит отметить необходимость обеспечения ориентации и навигации для транспортной системы, для чего используется навигационный датчик (GPS и ГЛОНАСС) и инерциальный датчик с магнетометром (10 осевой IMU сенсор). Принципиальная схема робота приведена на рис. 1.



Рис. 1. Принципиальная схема универсального робота для плодовых садов

Робот для сбора урожая изготовлен на базе многоцелевой исследовательской робототехнической платформы Муром-ИСП, разработанной в КБНЦ РАН. Робот представляет собой транспортную платформу с двумя приведенными и двумя поворотными колесами.

ми. На транспортной платформе установлен человекоподобный модуль с двумя манипуляторами в форме рук. Сзади установлен блок, где размещены все тяжелые двигатели. Манипуляторы приводятся в движение за счет тросовых приводов, что позволяет заметно облегчить конструкцию. В «голове» робота расположены камеры, микрофоны, динамики и экран. Концепт внешнего вида прототипа робота для сбора урожая приведен на рис. 2. Стоит отметить возможность отделения верхней части робота с манипуляторами и использования других вариантов транспортной платформы.



Рис. 2. Концепт внешнего вида универсального робота для плодовых садов

Для обеспечения сохранности яблок при сборе используется манипулятор, захват которого изготовлен в виде кисти человека, где каждая фаланга имеет три ограниченные степени свободы. Трехмерная модель кисти приведена на рис. 3. Как видно из рисунка, в манипуляторе реализованы не только по три фаланги на палец, но и пястные кости человека. Каркас изготовлен из металла, а корпус из гибкого пластика или полимера. Размеры кисти составляют 18 см (длина ладони).

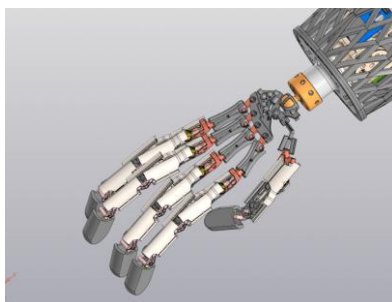


Рис. 3. Трехмерная модель захвата робота для сбора урожая

Схема устройства кисти на примере одной фаланги приведена на рис. 4. Сгиб каждой фаланги (на рисунке обозначена цифрой «1») управляется двумя тросами («3») с сервоприводами («4»), расположенными на предплечье робота. Все тросы протянуты внутри каркаса кисти и не мешают сбору урожая. Подобное решение, во-первых, позволяет минимизировать размер самой кисти и при этом обеспечивать контроль не только угла поворота фаланги, но и усилия, прилагаемого фалангой, кроме того, незначительное растяжение троса компенсирует неточности управления сервомоторами. Для отслеживания угла сгиба используются гибкие датчики деформации («5»), расположенные возле шарнира («2»). На частях манипулятора, непосредственно касающихся плодов устанавливается матрица датчиков нажатия, которая позволит определить форму яблока и обеспечит его перемещение без риска деформации. Матрица датчиков давления состоит из множества чувствительных датчиков магнитного поля и гибкой магнитной ленты, утопленных в мягкую основу (в прототипе использовался полимер на основе силикона).

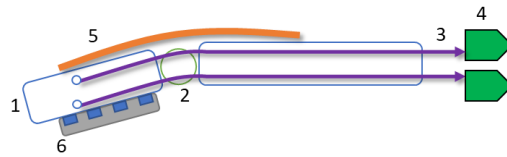


Рис. 4. Схема устройства фаланги на манипуляторе робота для сбора урожая:
1 – каркас фаланги; 2 – неразъемный трехосевой шарнир; 3 – тросы привода фаланги;
4 – серводвигатели фаланги; 5 – датчик сгиба фаланги (по одной из осей);
6 – матрица датчиков давления в полимерной оболочке

Наличие системы адометрии и матрицы датчиков давления позволят роботу «на ощупь» определять форму плода и подстраивать кисть под нее. При этом возможность регулировать степень сжатия пальцев позволит отрывать плод без риска его повреждения.

Мультиагентная нейрокогнитивная система управления автономным роботом для садоводства. Учитывая сложность задачи управления многозвенным манипулятором при работе с хрупкими объектами для обеспечения управления разработанной робототехнической системой необходимо реализовать интеллектуальную систему управления, которая в автономном режиме позволит захватывать и плоды и отделять их от веток. Кроме того, система управления должна отвечать за распознавание плодов, определения их положение, а также за навигацию и ориентацию робота. Для данного робота было решено использовать систему управления на основе мультиагентных нейрокогнитивных архитектур. Под ними понимается формализм искусственного интеллекта, позволяющий строить интеллектуальные системы продукционного типа для решения сложных задач в условиях неопределенности информации в проблемной среде. Архитектура имитирует работу головного мозга человека. Она организована в формате инварианта интеллектуального контура принятия решений. Инвариант включает в себя функциональные элементы когнитивной архитектуры, в которых размещаются рациональные программные агенты низкого уровня. Эти агенты синтезируют свое поведение с целью максимизации своих локальных целевых функций. Благодаря этому вся система в целом проявляет сложное и нетривиальное поведение, основанное на принципах мультиагентной самоорганизации, при движении к аттракторам. Аттракторы в данном контексте интерпретируются как семантически значимые состояния интеллектуального агента. В качестве целевой функции используется функция максимизации энергии, которая трактуется как описательная величина. Эта величина отражает способность агента влиять на окружающую среду, учитывая при этом энергетические затраты, необходимые для осуществления таких воздействий. На рис. 5 приведен интерфейс разработанного в КБНЦ РАН программного комплекса для моделирования и редактирования подобных архитектур. Предполагается, что мультиагентный подход при проектировании интеллектуальных систем позволит эффективно решать различные масштабные задачи, такие как ориентации и навигация мобильных роботов, распознавание образов, а также работа с естественным языком, благодаря гибкости, адаптивности и самоорганизации процесса обучения в слабоструктурированных проблемных средах.

Система принятия решений для управления автономным роботом должна собирать данные с сенсоров робота, в частности с камер, навигационной системы и датчиков манипулятора. Схема работы подобной системы приведена на рис. 6. Все полученные сигналы с датчиков попадают в систему принятия решений. В ней, за репрезентацию сигналов из внешнего мира отвечают отдельные агенты-сенсоры. Например, данные с навигационной системы попадают на агентов сенсоры для показаний широты, долготы, углов поворота, азимута и т.д. Эти данные позволяют построить набор мультиагентных фактов, отвечающих за положение и направление движения робота, что в свою очередь позволит автоматически наполнять онтологию системы принятия решений. В результате интеллектуальной обработки этих данных строится модель текущего состояния системы «сад-робот», определяется целевая позиция и строится траектория достижения цели. Эти данные передаются на соответствующие агенты-эффекторы, которые отвечают за передачу

информации двигателям транспортной системы робота. При этом стоит отметить, что для интеллектуальной системы принятия решений внешними сенсорами являются и данные о карте местности или условиях работы (внешние источники данных), а также команды пользователя (садовода).

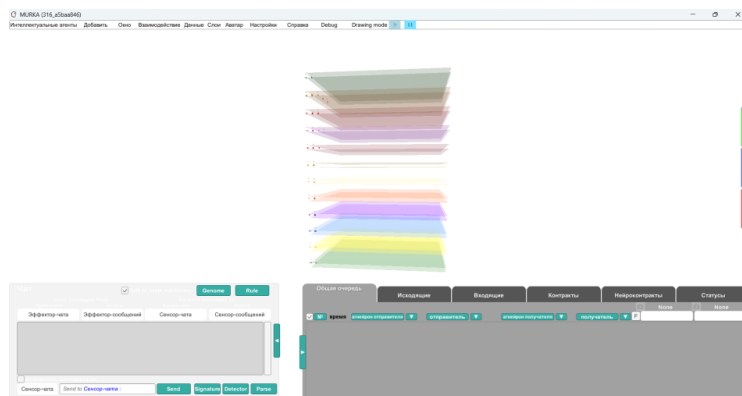


Рис. 5. Интерфейс мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры

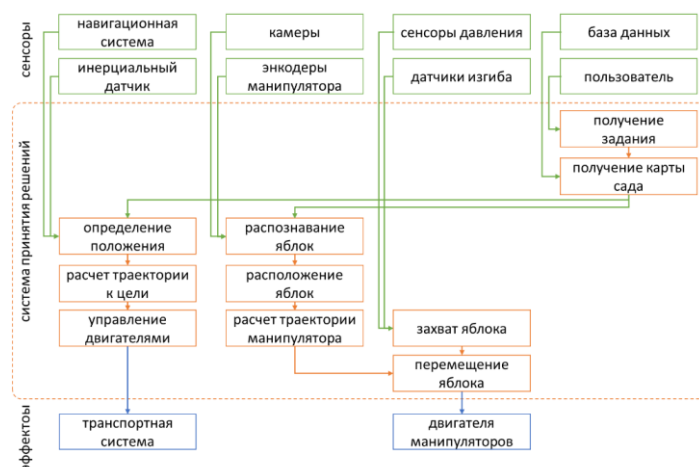


Рис. 6. Схема работы системы принятия решений робота для сбора урожая

Параллельно с задачей навигации и ориентации по территории сада стоит задача распознавания яблок, их состояния и расположения. Для этого используется поток данных с камер и энкодеров манипулятора. После определения яблока и расчета траектории манипулятора система переходит к отделению яблока от ветки. При этом постоянно отслеживаются расположение кисти и степень давления на яблоко. Эти данные позволяют передавать информацию на агенты-эффекторы, отвечающие за управление двигателями манипуляторов робота.

В статье [17, 18] представлена структура сенсорной подсистемы автономного робота, а также алгоритм формирования многозадачной системы локационных событий и отношений между объектами для построения метрических, топологических и семантических карт. В рамках исследования проблемы был разработан алгоритм обработки данных навигационной подсистемы мобильного робота на основе многозадачной нейрокогнитивной архитектуры. Благодаря этому создается гибридная карта местности и траектория движения робота в рамках системы принятия решений, что повышает автономность и эффективность работы в сложных условиях. Этот универсальный алгоритм будет использован в системе управления роботом для сбора урожая. На рис. 7 представлена схема алгоритма построения карты местности мультиагентной системой.

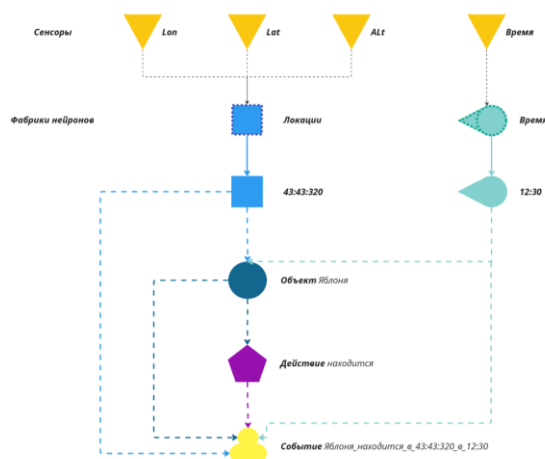


Рис. 7. Схема мультиагентной архитектуры для построения карты местности

В [19] рассматривается проблема повышения эффективности уборки плодовоовощной и ягодной продукции. Система управления манипулятором строится на основе мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры и представляет собой распределенную адаптивную обучающуюся систему в виде интеллектуального агента. В работе описан процесс обучения агента, включающий установку и отслеживание углов поворота сочленений пальцев схвата, контроль натяжения тросов и нагрузки двигателей с использованием данных сенсорной системы робота (рис. 8).

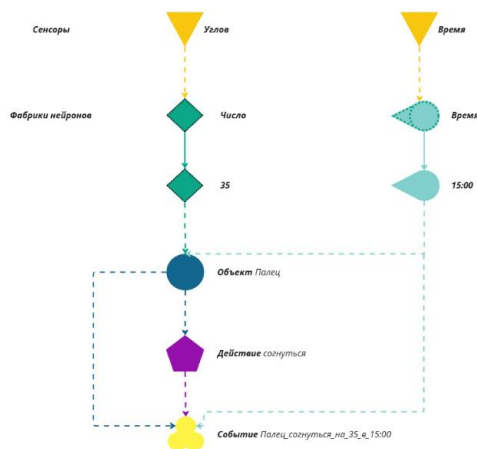


Рис. 8. Схема мультиагентной архитектуры для контроля угла пальца

В работе [20] представлена универсальная интеллектуальная система активной защиты растений, основанная на мультиагентной нейрокогнитивной архитектуре. Система включает подсистемы визуализации, перемещения, распознавания, принятия решений и управления манипуляторами. Особое внимание было уделено системе распознавания, которая анализирует изображения сельскохозяйственных культур для выявления заболеваний и вредителей, а также степень зрелости плодов. Используя мультиагентный подход, система сегментирует изображения на концепты (например, листья, плоды, гусеницы) и оценивает их состояние, формируя план действий для устранения угроз. Система демонстрирует потенциал для мониторинга и защиты сельскохозяйственных культур, но требует доработки для повышения точности и надежности. На рис. 9 представлен процесс фрагментации видеоизображения для дальнейшей обработки в мультиагентной системе распознавания объекта.

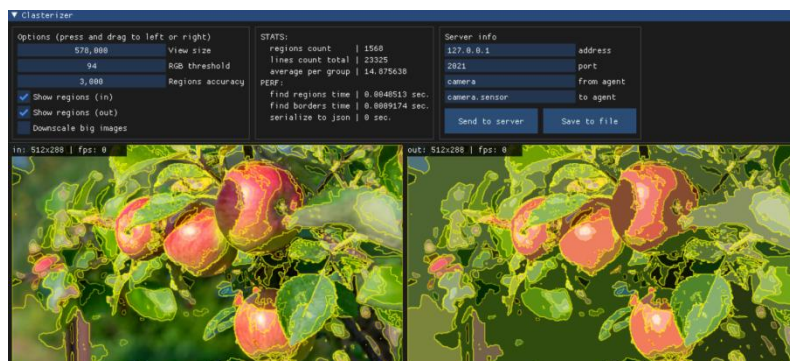


Рис. 9. Система распознавания образов интеллектуального агента

В дальнейшем планируется слияние отдельно разработанных интеллектуальных агентов в одну мультиагентную систему, формирующую общий искусственный интеллект, способный решать комплексные задачи в различных сферах деятельности, а также интеграция подобных систем в роботов любых назначений.

Заключение. В работе приведены результаты разработки программно-аппаратного комплекса для автоматизации сбора урожая. Прототип робота представляет собой модуль с двумя антропоморфными манипуляторами, реализующими все степени свободы руки человека. Манипулятор оснащен системой адометрии и матрицей сенсоров давления, что позволяет строить точную модель захватываемого манипулятором объекта. Для управления роботом используется система принятия решений на основе мультиагентных нейрокognитивных архитектур, которая на базе получаемых с сенсоров данных строит модель текущего состояния системы «робот-яблоко» и позволяет в автономном режиме управлять достаточно сложными манипуляторами для сбора урожая.

Подобный робот может позволить оптимизировать процесс сбора урожая в плодово-овощных садах и минимизировать потери урожая, связанные с человеческими факторами, такими как: несвоевременный сбор урожая, деформация плодов при сборе и т.д. В перспективе использование подобного робота позволит повысить урожайность, что крайне актуально в условиях необходимости обеспечения продовольственной безопасности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Wysokiński M, Domagala J, Gromada A, Golonko M, Trębska P. Economic and energy efficiency of agriculture // *Agric. Econ.* – Czech. – 2020. – 66 (8). – P. 355-364. – DOI: 10.17221/170/2020-AGRICECON.
2. Wang F., Urquiza R.C., Roberts P. et al. Biologically inspired robotic perception-action for soft fruit harvesting in vertical growing environments // *Precision Agric.* – 2023. – 24. – P. 1072-1096. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11119-023-10000-4>.
3. Shaikh T. A., Rasool T., Lone F. R. Towards leveraging the role of machine learning and artificial intelligence in precision agriculture and smart farming // *Computers and Electronics in Agriculture.* – 2022. – Vol. 198. – P. 107119. – ISSN 0168-1699. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107119>.
4. Бураева Е.В. Цифровизация сельского хозяйства как детерминанта экономического роста в аграрном секторе экономики // *Вестник ОрелГАУ.* – 2020. – № 2 (83).
5. Gupta N., Khosravy M., Patel N. et al. Economic data analytic AI technique on IoT edge devices for health monitoring of agriculture machines // *Appl. Intell.* – 2020. – 50. – P. 3990-4016. – <https://doi.org/10.1007/s10489-020-01744-x>.
6. Скворцов Е.А. Перспективы применения технологий искусственного интеллекта в сельском хозяйстве региона // *Экономика региона.* – 2020. – № 2.
7. Сологуб Н.Н., Уланова О.И., Остробородова Н.И., Остробородова Д.А. Проблемы и перспективы цифровых технологий в сельском хозяйстве // *МСХ.* – 2021. – № 4.
8. Li X., Zhang Y., Sorourkhah A. et al. Introducing Antifragility Analysis Algorithm for Assessing Digitalization Strategies of the Agricultural Economy in the Small Farming Section // *J. Knowl. Econ.* – 2024. – 15. – P. 12191-12215. – <https://doi.org/10.1007/s13132-023-01558-5>.
9. Антонов М.А., Анисимов А.А., Каширо С.Е. Об автоматизации сельского хозяйства // *Известия ТулГУ. Технические науки.* – 2022. – № 9.

10. Бадмаева М.Х. К вопросу об особенностях и проблемах применения систем искусственного интеллекта в сельском хозяйстве // Вестник БГУ. – 2022. – № 3.
11. El Jarroudi, M., Kouadio, L., Delfosse, P. et al. Leveraging edge artificial intelligence for sustainable agriculture // Nat Sustain. – 2024. – 7. – P. 846-854. – <https://doi.org/10.1038/s41893-024-01352-4>.
12. Шутухин А.М., Калугина В.В. Развитие сельскохозяйственных бизнес-систем и применение технологических инноваций // ЕГИ. – 2021. – № 6 (38).
13. Федосов А.Ю., Меньших А.М., Фартуков В.А., Зборовская М.И., Васильев Д.М. Применение искусственного интеллекта при оптимизации орошения и применении гербицидов // Экономика строительства. – 2023. – № 2.
14. Liu S.Y. Artificial Intelligence (AI) in Agriculture // IT Professional. – 2020. – Vol. 22, No. 3. – P. 14-15. – DOI: 10.1109/MITP.2020.2986121.
15. Shaikh F.K., Memon M.A., Mahoto N.A., Zeadally S., Nebhen J. Artificial intelligence best practices in smart agriculture // IEEE Micro. – 2022. – Vol. 42, No. 1. – P. 17-24. – DOI: 10.1109/MM.2021.3121279.
16. Рыбаков А.В., Выборнов Н.А., Рыбаков И.А. Анализ методов компьютерного зрения, перспективных для применения в агропромышленном комплексе // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2022. – № 1 (57).
17. Бжыхатлов К.Ч., Пишенокова И.А., Макоев А.Р. Концепция создания системы управления мультиагентной робототехнической системой сельскохозяйственного назначения на базе нейрокогнитивных алгоритмов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – № 3. – С. 6-18. – DOI: <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2024-3-6-18>.
18. Бжыхатлов К., Пишенокова И., Нагоева О., Мамбетов И. Мультиагентный алгоритм ориентации и навигации автономных роботов в горной местности // XV Международная научная конференция «INTERAGROMASH 2022» / под ред. А. Бескопыльного, М. Шамцяна, В. Артюха. INTERAGROMASH 2022. Lecture Notes in Networks and Systems. Т. 574. – Springer, Cham, 2023. – DOI: 10.1007/978-3-031-21432-5_204.
19. Нагоев З.В., Пишенокова И.А., Бжыхатлов К.Ч., Канкулов С.А. Имитационная модель интеллектуальной системы управления схватом сельскохозяйственного манипулятора на основе обучения мультиагентных нейрокогнитивных архитектур // Известия КБНЦ РАН. – 2021. – № 4 (102).
20. Бжыхатлов К.Ч., Пишенокова И.А., Канкулов С.А., Ксолов А.М. Концепция системы распознавания образов для интеллектуальной системы защиты растений // Цифровая трансформация науки и образования: Сб. научных трудов III Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Нальчик, 09–14 июля 2022 года. – Нальчик: Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, 2022. – С. 151-160. – EDN BQVKDM.

REFERENCES

1. Wysokiński M, Domagala J, Gromada A, Golonko M, Trębska P. Economic and energy efficiency of agriculture, *Agric. Econ. Czech*, 2020, 66 (8), pp. 355-364. DOI: 10.17221/170/2020-AGRICECON.
2. Wang F., Urquiza R.C., Roberts P. et al. Biologically inspired robotic perception-action for soft fruit harvesting in vertical growing environments, *Precision Agric*, 2023, 24, pp. 1072-1096. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11119-023-10000-4>.
3. Shaikh T.A., Rasool T., Lone F.R. Towards leveraging the role of machine learning and artificial intelligence in precision agriculture and smart farming, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, Vol. 198, pp. 107119. ISSN 0168-1699. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107119>.
4. Buraeva E.V. Tsifrovizatsiya sel'skogo khozyaystva kak determinanta ekonomicheskogo rosta v agrarnom sektore ekonomiki [Digitalization of agriculture as a determinant of economic growth in the agricultural sector of the economy], *Vestnik OrelGAU* [Bulletin of OrelSAU], 2020, No. 2 (83).
5. Gupta N., Khosravi M., Patel N. et al. Economic data analytic AI technique on IoT edge devices for health monitoring of agriculture machines, *Appl. Intell.*, 2020, 50, pp. 3990-4016. <https://doi.org/10.1007/s10489-020-01744-x>.
6. Skvortsov E.A. Perspektivy primeneniya tekhnologiy iskusstvennogo intellekta v sel'skom khozyaystve regiona [Prospects of application of artificial intelligence technologies in agriculture of the region], *Ekonomika regiona* [The Economy of the Region], 2020, No. 2.
7. Sologub N.N., Ulanova O.I., Ostroborodova N.I., Ostroborodova D.A. Problemy i perspektivy tsifrovyykh tekhnologiy v sel'skom khozyaystve [Problems and prospects of digital technologies in agriculture], *MSKh* [Ministry of Agriculture], 2021, No. 4.
8. Li X., Zhang Y., Sorourkhah A. et al. Introducing Antifragility Analysis Algorithm for Assessing Digitalization Strategies of the Agricultural Economy in the Small Farming Section, *J. Knowl. Econ.*, 2024, 15, pp. 12191-12215. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13132-023-01558-5>.
9. Antonov M.A., Anisimov A.A., Kashiro S.E. Ob avtomatizatsii sel'skogo khozyaystva [On automation of agriculture], *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of TulSU. Technical sciences], 2022, No. 9.

10. Badmaeva M.Kh. K voprosu ob osobennostyakh i problemakh primeneniya sistem iskusstvennogo intellekta v sel'skom khozyaystve [To the question of features and problems of applying artificial intelligence systems in agriculture], *Vestnik BGU* [Bulletin of BSU], 2022, No. 3.
11. El Jarroudi, M., Kouadio, L., Delfosse, P. et al. Leveraging edge artificial intelligence for sustainable agriculture, *Nat Sustain*, 2024, 7, pp. 846-854. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41893-024-01352-4>.
12. Shitukhin A.M., Kalugina V.V. Razvitie sel'skokhozyaystvennykh biznes-sistem i primeneniye tekhnologicheskikh innovatsiy [Development of agricultural business systems and application of technological innovations], *EGI* [EGI], 2021, No. 6 (38).
13. Fedosov A.Yu., Men'shikh A.M., Fartukov V.A., Zborovskaya M.I., Vasil'ev D.M. Primeneniye iskusstvennogo intellekta pri optimizatsii orosheniya i primeneniye gerbitsidov [The use of artificial intelligence in optimizing irrigation and the use of herbicides], *Ekonomika stroitel'stva* [Economics of Construction], 2023, No. 2.
14. Liu S.Y. Artificial Intelligence (AI) in Agriculture, *IT Professional*, 2020, Vol. 22, No. 3, pp. 14-15. DOI: 10.1109/MITP.2020.2986121.
15. Shaikh F.K., Memon M.A., Mahoto N.A., Zeadally S., Nebhen J. Artificial intelligence best practices in smart agriculture, *IEEE Micro*, 2022, Vol. 42, No. 1, pp. 17-24. DOI: 10.1109/MM.2021.3121279.
16. Rybakov A.V., Vybornov N.A., Rybakov I.A. Analiz metodov komp'yuternogo zreniya, perspektivnykh dlya primeneniya v agropromyshlennom komplekse [Analysis of promising computer methods for use in the agro-industrial complex], *Prikladnyy zhurnal: upravleniye i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2022, No. 1 (57).
17. Bzhikhatlov K.Ch., Pshenokova I.A., Makoev A.R. Kontseptsiya sozdaniya sistema upravleniya mul'tiagentnoy robototekhnicheskoy sistemoy sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya na baze neyrokognitivnykh algoritmov [The concept of creating a control system for a multi-agent robotic system for agricultural purposes based on neurocognitive algorithms], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2024, No. 3, pp. 6-18. DOI: <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2024-3-6-18>.
18. Bzhikhatlov K., Pshenokova I., Nagoeva O., Mambetov I. Mul'tiagentnyy algoritm orientatsii i navigatsii avtonomnykh robotov v gornoy mestnosti [Multi-agent algorithm for orientation and navigation of autonomous robots in mountainous areas], *XV Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya «INTERAGROMASH 2022»* [XV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2022"], ed. by A. Beskopyl'nogo, M. Shamtsyana, V. Artyukha. *INTERAGROMASH 2022. Lecture Notes in Networks and Systems* [INTERAGROMASH 2022. Lecture Notes in Networks and Systems], Vol. 574. Springer, Cham, 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-21432-5_204.
19. Nagoev Z.V., Pshenokova I.A., Bzhikhatlov K.Ch., Kankulov S.A. Imitatsionnaya model' intellektual'noy sistema upravleniya skhvatom sel'skokhozyaystvennogo manipulyatora na osnove obucheniya mul'tiagentnykh neyrokognitivnykh arkhitektur [An imitation model of an intelligent agricultural manipulator grip control system based on training multi-agent neurocognitive architectures], *Izvestiya KBNTS RAN* [Izvestiya KBSC RAS], 2021, No. 4 (102).
20. Bzhikhatlov K.Ch., Pshenokova I.A., Kankulov S.A., Ksalov A.M. Kontseptsiya sistema raspoznavaniya obrazov dlya intellektual'noy sistema zashchity rasteniy [The concept of an image recognition system for an intelligent plant protection system], *Tsifrovaya transformatsiya nauki i obrazovaniya: Sb. nauchnykh trudov III Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, Nal'chik, 09–14 iyulya 2022 goda* [Digital transformation of science and education: proceedings of the III All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation, Nalchik, July 09-14, 2022]. Nal'chik: Kabardino-Balkarskiy gosudarstvennyy universitet im. Kh.M. Berbekova, 2022, pp. 151-160. EDN BQBKDM.

Нагоев Залимхан Вячеславович – Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук»; e-mail: zaliman@mail.ru; 360000; г. Нальчик, Россия; тел.: 88662426562; к.т.н.

Загазежева Оксана Зауровна – Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук»; e-mail: oksmil.82@mail.ru; г. Нальчик, Россия; тел.: 89289136674; к.э.н.

Бжикхатлов Кантемир Чамалович – Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук»; e-mail: haosit13@gmail.com; г. Нальчик, Россия; тел.: 89631663448; к.ф.-м.н.

Мамбетов Идар Арсенович – Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук»; e-mail: idar.mam12@gmail.com; г. Нальчик, Россия; тел.: 89280846803; м.н.с.

Nagoev Zalimkhan Vyacheslavovich – Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences"; e-mail: zaliman@mail.ru; Nalchik, Russia; phone: +78662426562; cand. of eng. sc.

Zagazezheva Oksana Zaurovna – Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences"; e-mail: oksmil.82@mail.ru; Nalchik, Russia; phone: +79289136674; cand. of econ. sc.

Brzhikhatlov Kantemir Chamalovich – Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences"; e-mail: haosit13@gmail.com; Nalchik, Russia; phone: +79631663448; cand. of phys. and math. sc.

Mambetov Idar Arsenovich – Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences"; e-mail: idar.mam12@gmail.com; Nalchik, Russia; phone: +79280846803; junior researcher.

УДК 004.896

DOI 10.18522/2311-3103-2025-2-51-61

А.М. Корсаков, В.В. Иванова, А.А. Демчева, В.Д. Матвеев, Е.Ю. Смирнова

ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫПОЛНЕНИЯ СЦЕНАРИЯ РАБОТЫ МОБИЛЬНОГО РОБОТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОМОРФНОГО МЕХАНИЗМА УПРАВЛЕНИЯ ЗАДАНИЕМ

Представлены результаты исследования возможности формирования и выполнения сценария работы мобильного робота с использованием нейроморфных информационно-управляющих элементов (логические элементы «И», «ИЛИ» и «НЕ»; нейроморфный экстраполятор; нейроморфный детектор нештатных ситуаций; нейроморфный механизм формирования условного рефлекса). Приведено краткое описание этих информационно-управляющих элементов. В качестве базового элемента при этом выступает сегментная спайковая модель нейрона CSNM с возможностью структурного обучения. Обученная модель CSNM способна решать задачу бинарной классификации, из чего следует возможность её использования в качестве отдельного информационно-управляющего элемента – детектора состояния. Организацию выполнения сценария работы мобильного робота предлагается строить на основе универсальных нейроморфных модулей с использованием указанных нейроморфных информационно-управляющих элементов. Предлагаемый механизм управления заданием сводится к следующему. Универсальным нейроморфным модулям, используемым в качестве блоков-переключателей, присваиваются приоритеты. Детектирование той или иной ситуации выполняется посредством универсального нейроморфного модуля, приоритет которого выше, что приводит к торможению всех универсальных нейроморфных модулей, приоритет которых ниже данного. Добавляя, либо удаляя универсальные нейроморфные модули, а также меняя их приоритетность, мы получаем требуемое для нас поведение мобильного робота. В работе приведены результаты исследования предложенного механизма организации сценария работы робота как на компьютерной модели, так и на реальном роботе. Для компьютерного моделирования был разработан специальный эмулятор, который позволил всесторонне исследовать предложенное решение. В качестве тестовой задачи было выбрано движение к цели в помещении с перегородками. Результаты экспериментов показали принципиальную применимость предложенного механизма формирования и выполнения сценария работы робота. В работе указаны основные недостатки текущей реализации: возможность ситуаций, приводящих к заикливанию набора действий, совершаемых мобильным роботом, а также необходимость ручного согласования основных параметров сцены и мобильного робота (метрические характеристики заданных размеров зон сцены, угловая и линейная скорость мобильного робота и т.п.). Предложены пути устранения указанных недостатков. Сделан вывод о перспективности применения сегментной спайковой модели нейрона и сетей на её основе для задач управления мобильными роботами.

Сценарий работы робота; нейроморфные системы; спайковые нейронные сети.

A.M. Korsakov, V.V. Ivanova, A.A. Demcheva, V.D. Matveev, E.Yu. Smirnova

ORGANIZING THE EXECUTION OF A MOBILE ROBOT OPERATION SCENARIO USING A NEUROMORPHIC TASK MANAGEMENT MECHANISM

The paper presents the results of a study of the possibility of forming and executing a mobile robot operation scenario using neuromorphic information and control elements (logical elements "AND", "OR" and "NOT"; neuromorphic extrapolator; neuromorphic emergency detector; neuromorphic conditioned reflex formation mechanism). A brief description of these information and control elements is given. In this case, the segmented spike model of the CSNM neuron with the possibility of structural learning acts as