

Раздел I. Вычислительные и информационно-управляющие системы

УДК 004.81: 004.75

DOI 10.18522/2311-3103-2024-3-6-18

К.Ч. Бжихатлов, И.А. Пшенокова, А.Р. Макоев

КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА БАЗЕ НЕЙРОКОГНИТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ

Основными целями внедрения роботов в сельское хозяйство являются повышение эффективности и производительности, выполнение трудоемких и опасных задач и решение вопроса нехватки рабочей силы. Технологические достижения в области обнаружения и управления, а также машинного обучения позволили автономным роботам выполнять больше сельскохозяйственных задач. Такие задачи варьируются на всех этапах выращивания: от подготовки земли и посева до мониторинга и сбора урожая. Некоторые сельскохозяйственные роботы уже доступны, и ожидается, что в ближайшие годы их станет еще больше, поскольку технологии обработки больших данных, машинного зрения и легкого захвата и становятся все более точными. В настоящее время все большую актуальность приобретает внедрение нескольких взаимодействующих роботов в полевых условиях, так как оно имеет хорошие перспективы в снижении производственных затрат и повышении операционной эффективности. Целью данного исследования является разработка интеллектуальной системы управления группой мобильных роботов на основе мультиагентных нейрокогнитивных архитектур. Задача исследования состоит в разработке нейрокогнитивных алгоритмов управления мультиагентной робототехнической системой сельскохозяйственного назначения. В работе описан мультиагентный робототехнический комплекс для активной защиты растений в рамках системы «умного» поля. Представлена концепция системы управления группой мобильных роботов на основе моделирования мультиагентных нейрокогнитивных архитектур. Для обеспечения работы многоагентной гетерогенной группы автономных роботов предлагается использование нейрокогнитивной модели управления с реализацией отдельных интеллектуальных агентов как на каждом отдельном роботе, так и на базовых станциях обслуживания или серверах. При этом, учитывая реализацию рекурсивности в самой архитектуре, задача масштабирования подобной системы управления заметно упрощается. Использование агентов сенсоров и эффекторов для обеспечения обмена знаниями между роботами и центрами принятия решений позволяет минимизировать нагрузку на систему связи и обеспечить запас отказоустойчивости системы управления. Полученные результаты могут быть применены для разработки универсальных систем управления и упрощения масштабирования для различных групп автономных роботов.

Автономный робот; нейрокогнитивная архитектура; системы коллективного управления; мультиагентные системы.

K.Ch. Bzhikhatlov, I.A. Pshenokova, A.P. Makoev

NEUROCOGNITIVE ALGORITHMS FOR MANAGING MULTI-AGENT ROBOTICS SYSTEM FOR AGRICULTURAL PURPOSES

The main goals of the introduction of robots into agriculture are to increase efficiency and performance, fulfilling labor-intensive and dangerous tasks and solving the issue of lack of labor. Technological achievements in the field of detection and management, as well as machine learning allowed autonomous robots to perform more agricultural tasks. Such tasks vary at all stages of cultivation: from preparation of land and sowing to monitoring and harvesting. Some agricultural robots are already available, and it is expected that in the coming years there will be even more, since technologies for processing big data,

machine vision and easy capture are becoming more accurate. Currently, the introduction of several interacting robots in the field is becoming increasingly relevant, since it has good prospects in reducing production costs and increasing operating efficiency. The purpose of this study is to develop an intellectual system for managing a mobile robot group based on multi-agent neurocognitive architectures. The task of the study is to develop neurocognitive algorithms for controlling the multi-agent robotics system of agricultural purposes. The work describes a multi-agent robotics complex for active plant protection within the framework of the Smart Field system. The concept of the management system of the group of mobile robots based on modeling multi-group neurocognitive architectures is presented. To ensure the work of the multi-agent heterogeneous group of autonomous robots, the use of a neurocognitive control model with the implementation of individual intellectual agents is proposed on each individual robot and at the bases of service or servers. At the same time, given the implementation of recursing in architecture itself, the task of scaling such a management system is noticeably simplified. The use of sensors and effectors to ensure the exchange of knowledge between robots and decision-making centers allows minimizing the load on the communication system and ensure a reserve of failure tolerance of the management system. The results obtained can be used to develop universal control systems and simplification for various groups of autonomous robots.

Autonomous robot; neurocognitive architecture; collective control systems; multi-agent systems.

Введение. В настоящее время, в связи с необходимостью более эффективных и устойчивых методов ведения сельского хозяйства, активно развивается подход, известный как «точное земледелие». Точное земледелие – определяется как стратегия управления, которая использует электронную информацию и другие технологии для сбора, обработки и анализа пространственных и временных данных с целью руководства целевыми действиями, повышающими эффективность, производительность и устойчивость сельскохозяйственных операций [1]. Этот подход позволяет собирать с помощью стационарных датчиков и автономных агентов (таких как роботы и беспилотное сельскохозяйственное оборудование) более точную информацию о здоровье растений, качестве почвы, урожайности и других аспектах сельского хозяйства, которые ранее отслеживались вручную в течение десятилетий [2, 3].

В работах [4–6] приведены систематические обзоры, которые широко освещают исследования в области сельскохозяйственных роботов. Обзоры, посвященные кооперативному взаимодействию роботов в контексте сельского хозяйства приведены в [7, 8]. Во всех этих исследованиях представлены возможности применения сельскохозяйственной робототехники. Основными целями внедрения роботов в сельское хозяйство являются повышение эффективности и производительности, выполнение трудоемких и опасных задач и решение вопроса нехватки рабочей силы. Технологические достижения в области обнаружения и управления, а также машинного обучения позволили автономным роботам выполнять больше сельскохозяйственных задач. Такие задачи варьируются на всех этапах выращивания: от подготовки земли и посева до мониторинга и сбора урожая. Некоторые сельскохозяйственные роботы уже доступны, и ожидается, что в ближайшие годы их станет еще больше, поскольку технологии обработки больших данных, машинного зрения и легкого захвата и становятся все более точными. В настоящее время все большую актуальность приобретает внедрение нескольких взаимодействующих роботов в полевых условиях, так как оно имеет хорошие перспективы в снижении производственных затрат и повышении операционной эффективности.

Кооперацию в сельскохозяйственной робототехнике можно условно разделить на следующие группы: человеко-машинное взаимодействие (ЧМК), взаимодействие беспилотных летательных аппаратов (мульти-БПЛА), взаимодействие наземных роботизированных комплексов и гибридные команды БПЛА и РК.

В ЧМК разработка систем кооперативного управления направлены на улучшение сенсорных ограничений существующих систем машинного зрения и роботизированное сопровождение ручного труда. В первом случае человек-оператор дополняет возможности автоматического обнаружения и распознавания объектов автономным роботом, выполняя дополнительную проверку и коррекцию восприятия робота. Во втором случае, робот выступает в роли помощника, для решения трудных и, возможно, опасных задач. Так, для улучшения показателей обнаружения фруктов в неструктурированной сельско-

хозяйственной среде в работе [9] было изучено взаимодействие человека и робота на разных уровнях автономии, которое в [10] было расширено за счет динамического переключения между различными уровнями автономии в режиме реального времени. В работе [11] представлен коллаборативный опрыскиватель «человек-робот» для целенаправленного распыления на конкретном объекте, где совместная задача обнаружения целей решается с помощью выбранного пользователем уровня автономии. Исследования по разработке человеко-машинного интерфейса для опрыскивания виноградников можно найти в [12]. В [13] разработана система диспетчерского управления сельскохозяйственным транспортным средством, в которой человек может определять высокоуровневые цели или команды, которые робот должен выполнять автономно. Протокол коллаборативного управления для маршрутизации роботов представлен в [14]. В работах [15, 16] разработана гибридная модель на основе автоматов для роботизированных операций по транспортировке урожая, чтобы сократить непродуктивное время ходьбы сборщиков. В работе [17] представлен алгоритм эффективного планирования задач, основанный на оптимизации, по выполнению таких операций, как обрезка, осмотр или опрыскивание под наблюдением человека.

Во всех представленных примерах человеко-машинного взаимодействия вопрос об уровне автономности робота и разделении труда между человеком и роботом остается открытым. Этот баланс зависит от характера выполняемой задачи, поскольку эффективность, результативность и точность робота варьируются для каждой функции.

В таких задачах как дистанционное зондирование, картографирование, мониторинг и борьба с вредителями активно используются БПЛА. Однако, использование одного БПЛА для этих задач сопряжено с определенными ограничениями, такими как, эффективность использования времени и батареи [18]. Во-первых, время, необходимое одному транспортному средству для преодоления большой площади, может быть большим. Во-вторых, из-за увеличенной продолжительности выполнения задачи и рабочей нагрузки требования к энергии могут заставить БПЛА покрывать лишь небольшую площадь между частыми подзарядками. Для решения этих проблем целесообразно использовать команды взаимодействия БПЛА. В случае работы мульти-БПЛА область покрытия и, следовательно, рабочая нагрузка, делится между БПЛА, которые координируют свои движения, сокращают энергопотребление и время выполнения работы. В работе [19] представлен обзор исследований беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве.

Имитационное моделирование коллективного поведения команды БПЛА для мониторинга сорняков и картографирования представлено в [20]. Система реализует стохастическое покрытие и картографирование, которое включает в себя предотвращение столкновений между летательными аппаратами и бортовое видение. Принятая стратегия мониторинга заключалась в том, чтобы сначала разделить поле на клетки и назначить каждому агенту путь, основанный на случайном блуждании. Затем отдельный агент принимает решение о перемещении в соседние клетки в соответствии с вероятностью, определяемой распределением Гаусса.

В работе [21] представлены имитационные исследования и эксперименты с использованием четырех квадрокоптерных летательных аппаратов для оценки алгоритма роевого интеллекта управления сельскохозяйственных БПЛА при обнаружении вредителей и болезней. при этом подходе управление реализовывалось на двух уровнях: первый уровень представлял собой дистанционное управление, где человек-оператор устанавливал управление скоростью, а на втором уровне происходило управление построением, а также предотвращением столкновений.

В [22] сравнивались четыре конфигурации сельскохозяйственных БПЛА: автономные и дистанционно управляемые одиночные и множественные команды БПЛА. Для оценки производительности системы в качестве метрик использовались общее время, время настройки, время полета, расход заряда батареи, неточность определения местности, тактильное усилие управления и коэффициент покрытия. Результаты экспериментов показали, что использование алгоритма автономного управления роем повысило эффективность выполнения сельскохозяйственной задачи.

Так как БПЛА, как правило, оснащены различными камерами и датчиками и используются для мониторинга, обнаружения вредителей и картографирования исследования в этой области в основном сосредоточены на планировании и координации траектории и алгоритмах предотвращения столкновений, которые учитывают пространственное расположение и ограничения батареи. По мере того, как будут появляться новые технологические инструменты, будущие исследования будут сосредоточены на расширении полезности БПЛА за счет улучшения их способности восприятия и автономности батареи, а также улучшения навыков манипулирования.

В настоящее же время эту проблему можно решить, используя в сельском хозяйстве коллаборативную систему, состоящую из группы наземных роботов и БПЛА [23]. Так, в [24] представлена биоинспирированная стратегия планирования траектории для координации гибридной (воздушной и наземной) команды из нескольких роботов. В этой стратегии, исследованной с помощью имитационной модели, трехмерный ландшафт был смоделирован в виде топологической карты нейронов, а алгоритм метаэвристической оптимизации «стрекоза» оптимизировал движения роботов.

В работе [25] представлен другой подход к управлению командой роботов. Авторами представлена команда сельскохозяйственных роботов, состоящая из трех беспилотных летательных аппаратов и одного беспилотного наземного робота. Каждый робот смоделирован как конечный автомат, а вся система из нескольких роботов – как дискретная событийная система. Система управления включает в себя диспетчерский контроллер, позволяющий гетерогенным сельскохозяйственным роботам выполнять полевые операции, избегать препятствий, следовать по определенному строю и следовать по заданному пути.

Другие подходы к координации наземных роботов и БПЛА можно найти в работах [26–28]. В рассмотренной литературе, чаще всего представлены две стратегии сотрудничества. В первом случае БПЛА помечают интересующие области после чего наземные роботы выполняют необходимые операции. Во втором случае, наземные роботы служат в качестве посадочных и зарядных станций для БПЛА.

Целью данного исследования является разработка интеллектуальной системы управления группой мобильных роботов на основе мультиагентных нейрокогнитивных архитектур.

Задача исследования состоит в разработке нейрокогнитивных алгоритмов управления мультиагентной робототехнической системой сельскохозяйственного назначения.

Использование мультиагентных нейрокогнитивных архитектур позволит разрабатывать универсальные системы управления и упростить масштабирование системы для различных групп автономных роботов.

Мультиагентная робототехническая система для системы «умного» поля. В работе рассматривается применение гетерогенного комплекса автономных роботов, предназначенных для ухода за посевами в рамках концепции точного земледелия – системы «умного» поля [29]. Подобные системы предполагают внедрение интеллектуальных систем управления сельскохозяйственными процессами на разных этапах производства продукции. Архитектура разрабатываемой системы «умного» поля приведена на рис. 1. В качестве источников данных предполагается использование различных сенсорных систем, в частности, применение стационарных метеостанций для мониторинга состояния окружающей среды и почвы, использование данных мультиспектральной съемки с искусственных спутников земли, анализ видеопотоков с камер наблюдения, а также обработка данных лабораторных анализов почвы и растений. В качестве воздействующих устройств (а также дополнительных источников данных) могут служить различные автономные роботы (стационарные, наземные или воздушные), а также навесное оборудование для сельскохозяйственной техники. Учитывая большой объем данных, генерируемых подобной системой и сложность принятия решений в частично наблюдаемой среде, для управления всем комплексом участников робототехнического коллектива используется

интеллектуальная система обработки данных и принятия решений, обеспечивающая комплексирование многомодальных данных, их обработку, прогнозирование развития условий внешней среды и состояния посевов, определение наиболее оптимальных режимов обработки посевов, а также управления автономными мобильными роботами.

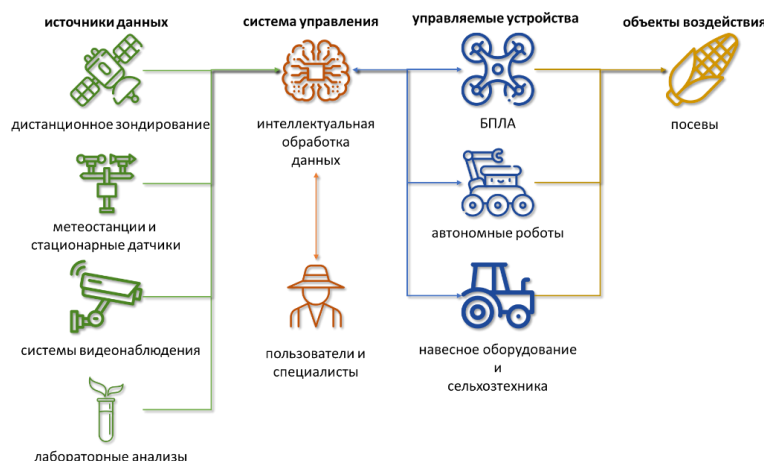


Рис. 1. Архитектура интеллектуальной системы для выращивания сельскохозяйственной продукции (стрелками показаны потоки данных и управляющих воздействий)

В рамках исследований был разработан ряд автономных мобильных роботов сельскохозяйственного назначения, в частности роботы для мониторинга и ухода за посевами зерновых культур. Общая концепция системы мониторинга и ухода за посевами показана на рис. 2. На данном рисунке показаны элементы робототехнической системы, предназначенной для мониторинга состояния и защиты посевов кукурузы от вредителей и сорных растений.

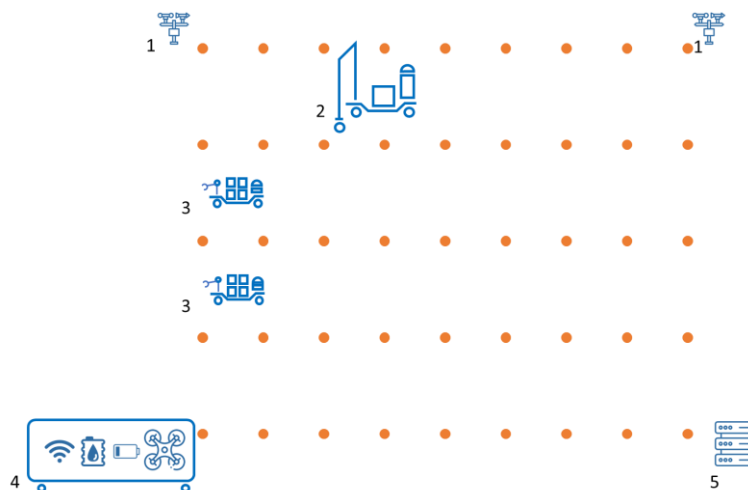


Рис. 2. Концепция системы мониторинга и ухода за посевами зерновых культур: 1 – метеостанции, 2 – робот для мониторинга и защиты посевов, 3 – роботы для транспортировки, 4 – базовая робототехническая станция обеспечения, 5 – внешний сервер системы управления

За сбор метеоданных отвечают стационарные метеостанции, расположенные на каждом отдельном участке для мониторинга состава и состояния почвы. В качестве основного воздействующего устройства выступает универсальная транспортная платформа, которая может выступать в роли робота для отбора проб почвы и мониторинга состояния посевов, а также в роли автономной системы для внесения удобрений и опрыскивания. Для перемещения носителей энергии, баков с агрохимией и заборов проб используются более легкие транспортировочные роботы. За обеспечение автономности всех участников робототехнического коллектива отвечает базовая робототехническая станция, выполняющая задачи по аккумулированию электроэнергии, хранению аккумуляторов и баков с активными веществами, а также обеспечение связи и управления роботами. Базовая станция также может выступать в роли места зарядки и заправки БПЛА, участвующих в мониторинге состояния посевов. Также базовая станция отвечает за связь с внешним сервером системы управления, который находится за пределами поля и отвечает за обработку данных и принятия решений. На рис. 3 показан внешний вид универсальной транспортной платформы с установленными на ней опусками системы опрыскивания.



Рис. 3. Внешний вид автономного робота для защиты растений с установленными на нем опусками системы опрыскивания (во время испытаний в посевах кукурузы в КБР)

Робот для защиты растений реализован в виде узкой транспортной платформы, с одной или двумя П-образными арками [30]. На транспортной платформе установлены мотор колеса и актуаторы поворота для обеспечения перемещения робота и его полезной нагрузки по полю. Также в носовой части расположен блок с оборудованием (системы энергообеспечения, связи и бортовая ЭВМ). Также на ней установлены сенсоры, обеспечивающие навигацию и ориентацию робота, лидар, камера и ряд других источников данных. Центральная часть транспортной платформы предназначена для установки различной полезной нагрузки. В частности, на рисунке показан робот, оборудованный системой опрыскивания посевов. Для этого на нем установлен бак с активной жидкостью и насосы для системы опрыскивания. Отдельно установлен генератор, использовавшийся для подзарядки робота без смены аккумуляторов. На арке установлены опуски с опрыскивателями, которые обеспечивают точечную обработку каждого растения с возможностью регулирования положения по вертикали и расстояния от форсунки до растения. Вместо системы опрыскивания могут быть установлены модули для сбора проб почвы, транспортировки урожая, десикации кукурузы и другие. Все сенсоры и эффекторы робота объединены в общую сеть и через протокол UPIONet связаны с бортовым ЭВМ робота. За обмен данными между роботами на поле отвечает система связи на основе WiFi роутера (в котором предусмотрен LoRaWan передатчик). Структура сенсорной и эффекторной подсистем автономного робота для активной защиты растений показана на рис. 4.



Рис. 4. Структура сенсорной и эффекторной подсистем автономного робота для активной защиты растений (зеленым обозначены сенсоры, синим – эффекторы для различных подсистем автономного робота)

Сенсоры и эффекторы можно разделить на функциональные группы, отвечающие за отдельные функции робота. В частности, для обеспечения перемещения робота в пространстве отвечают 4 независимых мотор-колеса и 3 актуатора поворота. Сенсорная система состоит из энкодеров на двигателях, GPS приёмника, инерционного датчика, лидара и дальномеров для распознавания препятствий вокруг робота. Кроме того, для определения положения робота в пространстве используется веб камера.

Нейрокогнитивная архитектура интеллектуального управления робототехнической системой. В качестве системы управления элементами «умного» поля предполагается применение систем моделирования процесса принятия решений на основе мультиагентных нейрокогнитивных архитектур. Применение подобной системы позволит обеспечить целенаправленное поведение автономных робототехнических и программных агентов в сложной, частично наблюдаемой и трудно прогнозируемой среде за счет моделирования процесса роста и деградации аксодендрональных связей нейронов головного мозга [31]. Данный формализм предполагает использование отдельных независимых агентов-нейронов, взаимодействие которых (за счет обмена информацией и энергией) обеспечивает согласованное целенаправленное поведение всей мультиагентной системы.

При этом стоит учитывать сложность самой робототехнической системы, управление которой обеспечивает мультиагентная нейрокогнитивная архитектура. В частности, необходимо обеспечить совместную работу отдельных автономных мобильных роботов и человека в полевых условиях. При этом у участников робототехнической системы значительно отличаются выполняемые задачи, конструкция, алгоритм работы, вычислительные возможности и доступность связи. На рис. 5 показана схема взаимодействия элементов системы «умного» поля.

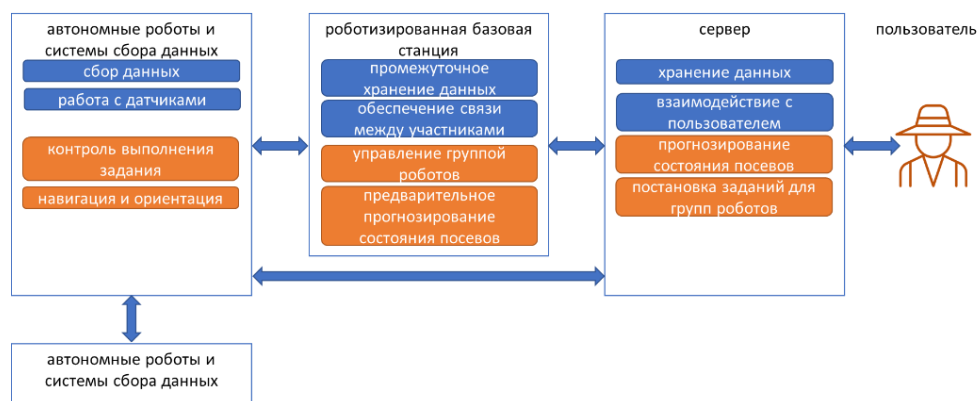


Рис. 5. Схема взаимодействия участников робототехнического коллектива в составе системы «умного» поля

Каждый робот несет на борту вычислительное устройство. Чаще всего программа на нем отвечает, как минимум, за работу с сенсорами и эффекторами робота, сбор данных и передачу информации. Кроме того, на роботе разворачивается программа моделирования нейрокогнитивных мультиагентных архитектур, отвечающая за выполнение поставленной данному роботу миссии, а также за навигацию и перемещение по полю. Система связи позволяет передавать сообщения от интеллектуального агента робота на системы управления других роботов и на роботизированную базовую станцию. Эта станция, в свою очередь, выполняет роль координатора на поле. В частности, программное обеспечение базовой станции отвечает за сбор и промежуточное хранение всех данных с датчиков и обеспечение связи между роботами. Интеллектуальный агент базовой станции отвечает за тактический уровень планирования работ в поле, а в частности, за управление поведением группы роботов (распределение задач и ресурсов, мониторинг состояния роботов, обеспечение безопасности и равномерного распределения исполнителей по полю) и за прогнозирование состояния посевов по полученным данным (на основе чего могут быть внесены изменения в алгоритм работы отдельных роботов или всей системы в целом). Интеллектуальная система управления базовой станцией рассчитана на взаимодействие с внешним сервером, но при этом предполагает возможность самостоятельной работы при длительном отсутствии связи. То есть, база знаний включает в себя не только данные, необходимые для выполнения текущего задания, но и общую информацию об агротехнических операциях для обрабатываемой культуры. Сервер является основой для системы управления «умным» полем и обеспечивает сбор и хранение всех данных с поля, их визуализацию, взаимодействие с пользователями и специалистами. Основной задачей интеллектуальной системы принятия решений является прогнозирование состояния посевов с учетом всех полученных данных (как с сенсоров на поле, так и из внешних источников) и построение наиболее оптимального технологического маршрута ухода за растениями. На основе проведенного анализа интеллектуальная система готовит план действия и формирует задания для группы роботов и специалистов в поле.

Рассмотрим реализацию системы управления автономного мобильного робота в составе «умного» поля (рис. 6). В каждой интеллектуальной системе на основе мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры предусмотрены агенты-сенсоры, выполняющие роль программного «моста» между реальным сенсором и агентами внутри системы принятия решений. При этом в системе предполагается использование отдельных агентов для каждого сенсора на роботе (например, для робота агрозащитника это более 60 датчиков без учета потоков данных с камеры и датчика глубины). Кроме того, общение между роботами в составе «умного» поля реализовано за счет отдельных сенсоров, отвечающих за связь с каждым роботом в системе, в том числе и за связь с базовой станцией и сервером. Такой же подход реализован и на уровне агентов-эффекторов в системе управления

роботом. То есть, автономный робот получает информацию напрямую из своих датчиков и из интеллектуальных агентов других роботов и сервера. На основе полученной информации интеллектуальная система принимает решения и обеспечивает управление роботом. При этом результаты обработки данных в виде сообщений передаются другим роботам, базовой станции и серверу напрямую. Управляющая мультиагентная нейрокогнитивная архитектура рекурсивна. Свойство рекурсии проявляется на нескольких уровнях вложенности агентов друг в друга и заключается в том, что характер процессов от уровня к уровню не меняется, сохраняя свое основное содержание поиска субоптимальных планов действий и их использования для синтеза целенаправленного поведения агента (интеллектуальной системой управления роботом) в целом.

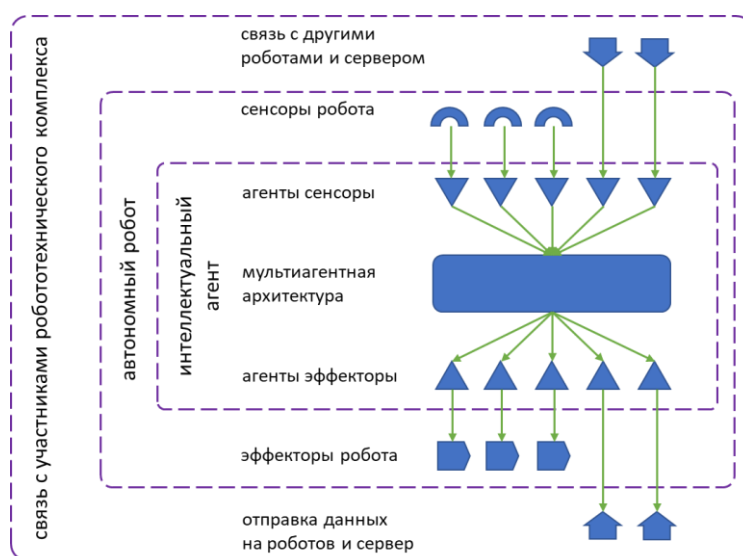


Рис. 6. Структура системы управления автономного мобильного робота, используемого в составе «умного» поля

При этом стоит учитывать, что у некоторых из участников робототехнического коллектива может отсутствовать достаточно производительное вычислительное устройство (например, на борту БПЛА), что не позволит разметить программу для моделирования мультиагентных нейрокогнитивных архитектур непосредственно на самом роботе. В этом случае интеллектуальный агент базовой станции берет на себя задачу моделирования поведения данных роботов, а данные с датчиков попадают напрямую на соответствующие агенты-сенсоры в системе принятия решений базовой станции. Распределенный подход позволит обеспечить работоспособность всей системы при равномерной нагрузке на вычислительные устройства и системы связи ее участников. Скриншот визуализации мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры управления автономным роботом для защиты растений, выполненный в разработанной программе редактирования и визуализации мультиагентных архитектур, показан на рис. 7.

Структура интеллектуального агента базовой станции и сервера принятия решений отличаются лишь тем, что они в основном получают данные от интеллектуальных агентов на борту роботов, но при этом имеют агентов-сенсоров и эффекторов для обеспечения прямого управления каким-либо из роботов (при необходимости). Стоит отметить, что использование мультиагентных нейрокогнитивных архитектур позволит разрабатывать универсальные системы управления и упростить масштабирование системы для групп автономных роботов.

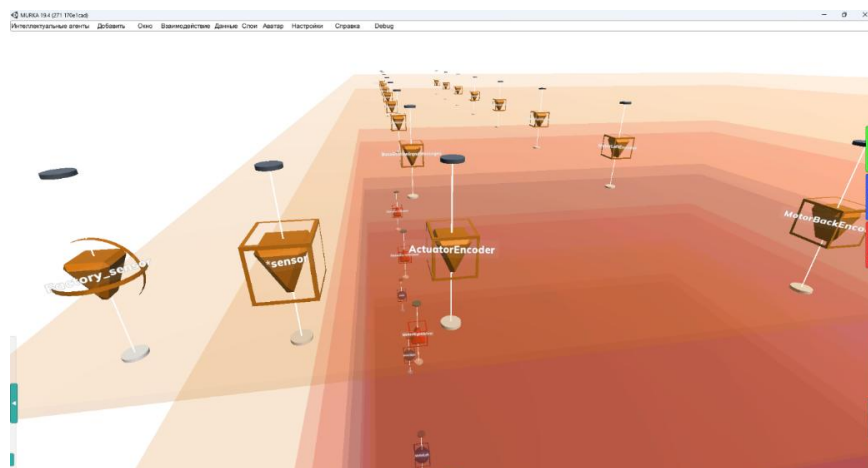


Рис. 7. Скриншот мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры управления автономным роботом для защиты растений

Заключение. В работе представлена концепция системы управления группой мобильных роботов в рамках системы «умного» поля на основе моделирования мультиагентных нейрокогнитивных архитектур. Для обеспечения работы многоагентной гетерогенной группы автономных роботов предлагается использование нейрокогнитивной модели управления с реализацией отдельных интеллектуальных агентов как на каждом отдельном роботе, так и на базовых станциях обслуживания или серверах. При этом, учитывая реализацию рекурсивности в самой архитектуре, задача масштабирования подобной системы управления заметно упрощается. При переходе на более масштабные системы управления, например управление сельскохозяйственной сферой на уровне региона, каждая отдельная система управления выступает в роли «интеллектуального агента» и обменивается сообщениями с агентами, моделирующим сферу сельского хозяйства в целом. При этом принцип организации системы и программная реализация остаются неизменными, то есть агенты разного уровня обмениваются сообщениями и обрабатывают их согласно своим базам знаний. Использование агентов сенсоров и эффекторов для обеспечения обмена знаниями между роботами и центрами принятия решений позволяет минимизировать нагрузку на систему связи и обеспечить запас отказоустойчивости системы управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Lowenberg-DeBoer J., Erickson B. Setting the record straight on precision agriculture adoption // *Agronomy Journal*. – 2019. – Vol. 111, No. 4. – P. 1552-1569.
2. Pierce F.J., Nowak P. Aspects of precision agriculture // *Advances in agronomy*. – 1999. – Vol. 67. – P. 1-85.
3. Stafford J.V. Implementing precision agriculture in the 21st century // *Journal of agricultural engineering research*. – 2000. – Vol. 76, No. 3. – P. 267-275.
4. Marinoudi V. et al. Robotics and labour in agriculture. A context consideration // *Biosystems Engineering*. – 2019. – Vol. 184. – P. 111-121.
5. Fountas S. et al. Agricultural robotics for field operations // *Sensors*. – 2020. – Vol. 20, No. 9. – P. 2672.
6. Oliveira L.F.P., Moreira A. P., Silva M.F. Advances in agriculture robotics: A state-of-the-art review and challenges ahead // *Robotics*. – 2021. – Vol. 10, No. 2. – P. 52.
7. Lytridis C. et al. An overview of cooperative robotics in agriculture // *Agronomy*. – 2021. – Vol. 11, No. 9. – P. 1109-1818. – <https://doi.org/10.3390/agronomy11091818>.
8. Yerebakan M.O., Hu B. Human-Robot Collaboration in Modern Agriculture: A Review of the Current Research Landscape // *Advanced Intelligent Systems*. – 2024. – P. 2300823.
9. Bechar A., Edan Y. Human-robot collaboration for improved target recognition of agricultural robots // *Industrial Robot: An International Journal*. – 2003. – Vol. 30, No. 5. – P. 432-436.

10. Tkach I., Bechar A., Edan Y. Switching between collaboration levels in a human–robot target recognition system // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews). – 2011. – Vol. 41, No. 6. – P. 955-967.
11. Berenstein R., Edan Y. Human-robot collaborative site-specific sprayer // Journal of Field Robotics. – 2017. – Vol. 34, No. 8. – P. 1519-1530.
12. Adamides G. et al. HRI usability evaluation of interaction modes for a teleoperated agricultural robotic sprayer // Applied ergonomics. – 2017. – Vol. 62. – P. 237-246.
13. Bergerman M. et al. Robot farmers: Autonomous orchard vehicles help tree fruit production // IEEE Robotics & Automation Magazine. – 2015. – Vol. 22, No. 1. – P. 54-63.
14. Dusadeerungsikul P O., Nof S.Y. A collaborative control protocol for agricultural robot routing with online adaptation // Computers & Industrial Engineering. – 2019. – Vol. 135. – P. 456-466.
15. Seyyedhasani H. et al. Collaboration of human pickers and crop-transporting robots during harvesting–Part I: Model and simulator development // Computers and electronics in agriculture. – 2020. – Vol. 172. – P. 105324.
16. Seyyedhasani H. et al. Collaboration of human pickers and crop-transporting robots during harvesting–Part II: Simulator evaluation and robot-scheduling case-study // Computers and electronics in agriculture. – 2020. – Vol. 172. – P. 105323.
17. Tsiotsop L.F., Servetti A., Masala E. An integer linear programming model for efficient scheduling of UGV tasks in precision agriculture under human supervision // Computers & Operations Research. – 2020. – Vol. 114. – P. 104826.
18. Doering D. et al. Design and optimization of a heterogeneous platform for multiple UAV use in precision agriculture applications // IFAC Proceedings Volumes. – 2014. – Vol. 47, No. 3. – P. 12272-12277.
19. del Cerro J. et al. Unmanned aerial vehicles in agriculture: A survey // Agronomy. – 2021. – Vol. 11, No. 2. – P. 203-215.
20. Albani D. et al. Field coverage for weed mapping: toward experiments with a UAV swarm // Bio-inspired Information and Communication Technologies: 11th EAI International Conference, BICT 2019, Pittsburgh, PA, USA, March 13–14, 2019, Proceedings 11. – Springer International Publishing, 2019. – P. 132-146.
21. Ju C., Son H.I. A distributed swarm control for an agricultural multiple unmanned aerial vehicle system // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering. – 2019. – Vol. 233, No. 10. – P. 1298-1308.
22. Ju C., Son H.I. Multiple UAV systems for agricultural applications: Control, implementation, and evaluation // Electronics. – 2018. – Vol. 7, No. 9. – P. 162.
23. Vu Q. et al. Trends in development of UAV-UGV cooperation approaches in precision agriculture // Interactive Collaborative Robotics: Third International Conference, ICR 2018, Leipzig, Germany, September 18–22, 2018, Proceedings 3. – Springer International Publishing, 2018. – P. 213-221.
24. Ni J. et al. An improved real-time path planning method based on dragonfly algorithm for heterogeneous multi-robot system // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 140558-140568.
25. Ju C., Son H.I. Hybrid systems based modeling and control of heterogeneous agricultural robots for field operations // 2019 ASABE Annual International Meeting. – American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2019. – P. 3-15.
26. Potena C. et al. AgriColMap: Aerial-ground collaborative 3D mapping for precision farming // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2019. – Vol. 4, No. 2. – P. 1085-1092.
27. Wang Z., McDonald S.T. Convex relaxation for optimal rendezvous of unmanned aerial and ground vehicles // Aerospace Science and Technology. – 2020. – Vol. 99. – P. 105756.
28. Peterson J. et al. Experiments in unmanned aerial vehicle/unmanned ground vehicle radiation search // Journal of Field Robotics. – 2019. – Vol. 36, No. 4. – P. 818-845.
29. Нагоев З.В., Шуганов В.М., Заммиев А.У., Бжихатлов К.Ч., Иванов З.З. Разработка интеллектуальной интегрированной системы «Умное поле» // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 1. – С. 81-91. – DOI: <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2022-1-81-91>.
30. Bzhikhatlov K., Pshenokova I. Intelligent Spraying System of Autonomous Mobile Agricultural Robot // International Conference on Agriculture Digitalization and Organic Production. – Singapore : Springer Nature Singapore, 2023. – P. 269-278. – https://doi.org/10.1007/978-981-99-4165-0_25.
31. Нагоев З.В. Интеллектика, или Мышление в живых и искусственных системах. – Нальчик: Изд-во КБНЦ РАН, 2013. – 211 с.

REFERENCES

1. Lowenberg-DeBoer J., Erickson B. Setting the record straight on precision agriculture adoption, *Agronomy Journal*, 2019, Vol. 111, No. 4, pp. 1552-1569.
2. Pierce F.J., Nowak P. Aspects of precision agriculture, *Advances in agronomy*, 1999, Vol. 67, pp. 1-85.
3. Stafford J.V. Implementing precision agriculture in the 21st century, *Journal of agricultural engineering research*, 2000, Vol. 76, No. 3, pp. 267-275.
4. Marinoudi V. et al. Robotics and labour in agriculture. A context consideration, *Biosystems Engineering*, 2019, Vol. 184, pp. 111-121.
5. Fountas S. et al. Agricultural robotics for field operations, *Sensors*, 2020, Vol. 20, No. 9, pp. 2672.
6. Oliveira L.F.P., Moreira A. P., Silva M.F. Advances in agriculture robotics: A state-of-the-art review and challenges ahead, *Robotics*, 2021, Vol. 10, No. 2, pp. 52.
7. Lytridis C. et al. An overview of cooperative robotics in agriculture, *Agronomy*, 2021, Vol. 11, No. 9, pp. 1109-1818. Available at: <https://doi.org/10.3390/agronomy11091818>.
8. Yerebakan M.O., Hu B. Human-Robot Collaboration in Modern Agriculture: A Review of the Current Research Landscape, *Advanced Intelligent Systems*, 2024, pp. 2300823.
9. Bechar A., Edan Y. Human-robot collaboration for improved target recognition of agricultural robots, *Industrial Robot: An International Journal*, 2003, Vol. 30, No. 5, pp. 432-436.
10. Tkach I., Bechar A., Edan Y. Switching between collaboration levels in a human-robot target recognition system, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 2011, Vol. 41, No. 6, pp. 955-967.
11. Berenstein R., Edan Y. Human-robot collaborative site-specific sprayer, *Journal of Field Robotics*, 2017, Vol. 34, No. 8, pp. 1519-1530.
12. Adamides G. et al. HRI usability evaluation of interaction modes for a teleoperated agricultural robotic sprayer, *Applied ergonomics*, 2017, Vol. 62, pp. 237-246.
13. Bergerman M. et al. Robot farmers: Autonomous orchard vehicles help tree fruit production, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2015, Vol. 22, No. 1, pp. 54-63.
14. Dusadeerungsikul P O., Nof S.Y. A collaborative control protocol for agricultural robot routing with online adaptation, *Computers & Industrial Engineering*, 2019, Vol. 135, pp. 456-466.
15. Seyyedhasani H. et al. Collaboration of human pickers and crop-transporting robots during harvesting—Part I: Model and simulator development, *Computers and electronics in agriculture*, 2020, Vol. 172, pp. 105324.
16. Seyyedhasani H. et al. Collaboration of human pickers and crop-transporting robots during harvesting—Part II: Simulator evaluation and robot-scheduling case-study, *Computers and electronics in agriculture*, 2020, Vol. 172, pp. 105323.
17. Tiotsop L.F., Servetti A., Masala E. An integer linear programming model for efficient scheduling of UGV tasks in precision agriculture under human supervision, *Computers & Operations Research*, 2020, Vol. 114, pp. 104826.
18. Doering D. et al. Design and optimization of a heterogeneous platform for multiple UAV use in precision agriculture applications, *IFAC Proceedings Volumes*, 2014, Vol. 47, No. 3, pp. 12272-12277.
19. del Cerro J. et al. Unmanned aerial vehicles in agriculture: A survey, *Agronomy*, 2021, Vol. 11, No. 2, pp. 203-215.
20. Albani D. et al. Field coverage for weed mapping: toward experiments with a UAV swarm, *Bio-inspired Information and Communication Technologies: 11th EAI International Conference, BICT 2019, Pittsburgh, PA, USA, March 13–14, 2019, Proceedings 11*. Springer International Publishing, 2019, pp. 132-146.
21. Ju C., Son H.I. A distributed swarm control for an agricultural multiple unmanned aerial vehicle system, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2019, Vol. 233, No. 10, pp. 1298-1308.
22. Ju C., Son H.I. Multiple UAV systems for agricultural applications: Control, implementation, and evaluation, *Electronics*, 2018, Vol. 7, No. 9, pp. 162.
23. Vu Q. et al. Trends in development of UAV-UGV cooperation approaches in precision agriculture, *Interactive Collaborative Robotics: Third International Conference, ICR 2018, Leipzig, Germany, September 18–22, 2018, Proceedings 3*. Springer International Publishing, 2018, pp. 213-221.
24. Ni J. et al. An improved real-time path planning method based on dragonfly algorithm for heterogeneous multi-robot system, *IEEE Access*, 2020, Vol. 8, pp. 140558-140568.
25. Ju C., Son H.I. Hybrid systems based modeling and control of heterogeneous agricultural robots for field operations, *2019 ASABE Annual International Meeting*. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2019, pp. 3-15.
26. Potena C. et al. AgriColMap: Aerial-ground collaborative 3D mapping for precision farming, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, Vol. 4, No. 2, pp. 1085-1092.

27. Wang Z., McDonald S.T. Convex relaxation for optimal rendezvous of unmanned aerial and ground vehicles, *Aerospace Science and Technology*, 2020, Vol. 99, pp. 105756.
28. Peterson J. et al. Experiments in unmanned aerial vehicle/unmanned ground vehicle radiation search, *Journal of Field Robotics*, 2019, Vol. 36, No. 4, pp. 818-845.
29. Нагоев З.В., Шуганов В.М., Заммиев А.У., Бжихатлов К.Ч., Иванов З.З. Разработка интеллектуальной интегрированной системы «Умное поле» [Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 1. – С. 81-91. – DOI: <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2022-1-81-91>.
30. Bzhikhatlov K., Pshenokova I. Intelligent Spraying System of Autonomous Mobile Agricultural Robot, *International Conference on Agriculture Digitalization and Organic Production*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023, pp. 269-278. Available at: https://doi.org/10.1007/978-981-99-4165-0_25.
31. Nagoev Z.V. Intellegitika, ili Myshlenie v zhivyykh i iskusstvennykh sistemakh [Intelligence, or thinking in living and artificial systems]. Nal'chik: Izd-vo KBNTS RAN, 2013, 211 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.Х. Пшихопов.

Бжихатлов Кантемир Чамалович – ФГБНУ «Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук»; e-mail: haosit13@mail.ru; г. Нальчик, Россия; тел.: +79631663448; к.ф.-м.н.; зав. лабораторией «Нейрокогнитивные автономные интеллектуальные системы».

Пшенокова Инна Аuesовна – Институт информатики и проблем регионального управления – филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук»; e-mail: pshenokova_inna@mail.ru; г. Нальчик, Россия; к.ф.-м.н.; зав. лабораторией «Интеллектуальные среды обитания».

Макоев Астемир Русланбекович – Научно-образовательный центр Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук; e-mail: astera@mail.ru; г. Нальчик, Россия; аспирант.

Bzhikhatlov Kantemir Chamalovich – Federal public budgetary scientific establishment «Federal scientific center «Kabardin-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences»; e-mail: haosit13@mail.ru; Nalchik, Russia; phone: +79631663448; cand. of phys. and math. sc.; head of the laboratory «Neurocognitive autonomous intelligent systems».

Pshenokova Inna Auesovna – Institute of Computer Science and Problems of Regional Management, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; e-mail: pshenokova_inna@mail.ru; Nalchik, Russia; cand. of phys. and math. sc.; head of the laboratory «Intelligent Habitats».

Makoev Astemir Ruslanbekovich – Scientific and Educational Center of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; e-mail: astera@mail.ru; Nalchik, Russia; post-graduate student.

УДК 621.396

DOI 10.18522/2311-3103-2024-3-18-32

С.Г. Емельянов, С.Н. Фролов, Е.А. Титенко, Д.П. Тетерин, А.П. Локтионов

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ДИНАМИЧЕСКОЙ РЕКОНФИГУРАЦИИ ГРУППИРОВКИ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Целью исследования является автоматизация управления группировкой малых космических аппаратов (наноспутников) в условиях ее переменной численности за счет актуализации ее состояния на основе рассылки и обработки широковещательных запросов между аппаратами и применения нейронной сети Transformer для составления прогнозов состояния сети космических аппаратов. Исследуется задача обеспечения связности сети наноспутников, которая сводится к реализации адаптивного управления сетью с оценкой и прогнозированием состояния каналов связи между парами аппаратов на основе нейронной сети. Разработаны динамическая реконфигурация и машинное обучение сети аппаратов. Определены алгоритмические средства для первичного обучения нейронной сети и ее последующего дообучения с учетом предобработки исходных разреженных или полностью связанных наборов данных о сети аппаратов. По завершении обучения на синтетических данных созданная нейронная сеть способна прогнозировать качество связи с учетом прямой видимости, ослабления сигнала в зависимости от расстояния и состояния аппаратной платформы наноспутника. Разработанная программная система выполняет детерминиро-