

УДК 681.51

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ И РЕАЛИЗУЕМЫЕ ПОДХОДЫ К ИХ РЕШЕНИЮ

В. М. Кудрявцев

По докладам, представленным на Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника» (ЭР-2015), состоявшейся 8–9 октября 2015 года в Санкт-Петербурге, проведен анализ проблем построения систем управления движением беспилотных транспортных средств (мобильных роботов) и описаны реализуемые подходы к их решению.

Ключевые слова: беспилотное транспортное средство, мобильный робот, система управления движением, научно-технические проблемы.

Keywords: unmanned transport vehicle, mobile robot, system for controlling movement, scientific and technological problems.

Введение

Анализ проблем построения систем управления движением беспилотных транспортных средств (мобильных роботов) проведен преимущественно по докладам, представленным на Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника» (ЭР-2015), состоявшейся 8–9 октября 2015 года в Санкт-Петербурге.

Это одно из крупнейших научных мероприятий в области робототехники в России. Организатор конференции — Государственный научный центр Российской Федерации «Федеральное государственное автономное научное учреждение „Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики”» (ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург) — родоначальник и головная организация отечественной робототехники. Деятельность ЦНИИ РТК сосредоточена на научно-исследовательских разработках и создании технических средств робототехники и технической кибернетики космического, воздушного, наземного и морского базирования.

Тематика конференции охватывает следующие основные направления:

- теория и методы проектирования робототехнических систем (методы проектирования и моделирования робототехнических систем, модульные роботы, мехатроника в экстремальной робототехнике);

- робототехника для экстремальных условий (мониторинг, инспекция, технологические операции, ликвидация последствий аварий и катастроф, космическая робототехника, морская робототехника, специальная мини- и микроробототехника);

- военная и антитеррористическая робототехника (боевые, боевого обеспечения и антитеррористические робототехнические системы, разведка, разминирование, охрана, спасательные и транспортные операции);

- робототехника в медицине (оказание первой помощи, обслуживание больных и инвалидов, их реабилитация, микророботы для обследования и лечения внутренних органов).

В сборнике трудов ЭР-2015 [1] опубликовано 63 доклада в основном специалистов предприятий (учреждений) и высших учебных заведений России, которые были представлены на пленарном и на трех секционных заседаниях конференции:

секция 1: «Теория и методы проектирования робототехнических комплексов (РТК)»;

секция 2: «Разработки и применение РТК»;

секция 3: «Информационное обеспечение и управление РТК».

В рамках конференции ЭР-2015 9 октября был проведен второй Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта» (БТС-ИИ-2015), на котором обсуждались:

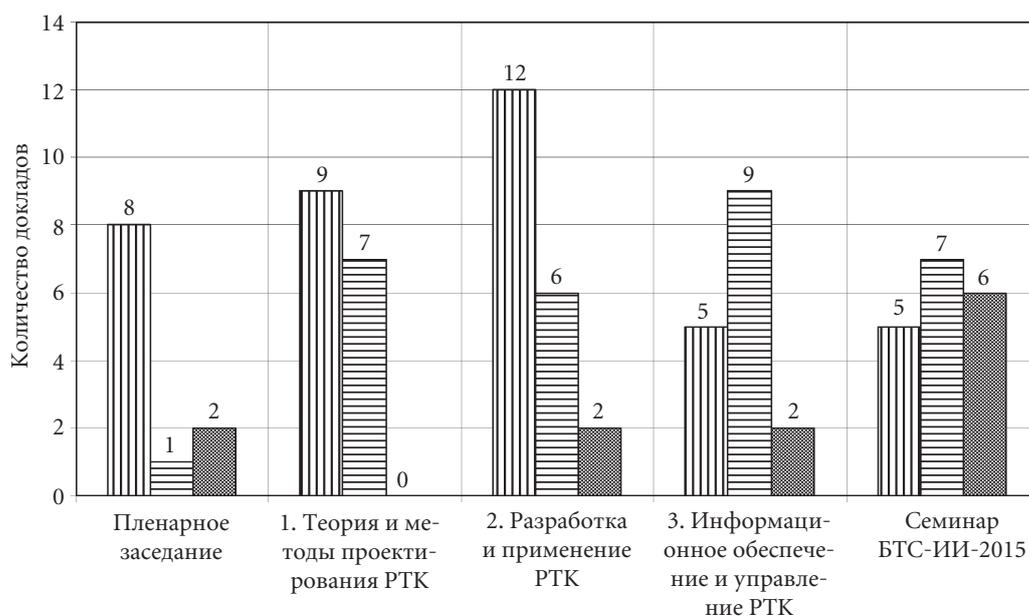


Рис. 1

Состав опубликованных докладов по принадлежности авторов к предприятиям и вузам:

▨ — предприятия; ▨ — вузы;
■ — в соавторстве

- общие проблемы и перспективы развития беспилотных транспортных средств;
- методы и алгоритмы управления и навигации беспилотными транспортными средствами;
- аппаратное и программное обеспечение для создания интеллектуальных систем управления беспилотными транспортными средствами;
- разработки в области беспилотных транспортных средств;
- вопросы проведения соревнований беспилотных транспортных средств.

В сборнике трудов БТС-ИИ-2015 [2] опубликовано 18 докладов специалистов предприятий (учреждений) и высших учебных заведений России.

Количество опубликованных докладов по тематике заседаний с учетом принадлежности их авторов к предприятиям (учреждениям) или высшим учебным заведениям иллюстрируется рис. 1.

Базовые представления о техническом облике системы управления движением беспилотного транспортного средства

Описание базовых представлений о техническом облике системы управления движением беспилотного транспортного средства (мобильного робота) выполнено по научным трудам председателя программного комитета конференции ЭР-2015 доктора технических наук, профессора Евгения Ивановича Юревича.

На рис. 2 приведена типовая схема системы управления движением мобильного робота (за основу взята схема, описанная в учебном пособии [3, с. 103–104]).

В книге [4, с. 383] указаны следующие актуальные задачи по созданию основных компонентов нового поколения робототехнических устройств:

- для *сенсорных систем*: комплексирование сенсорных систем различного типа (технического зрения,

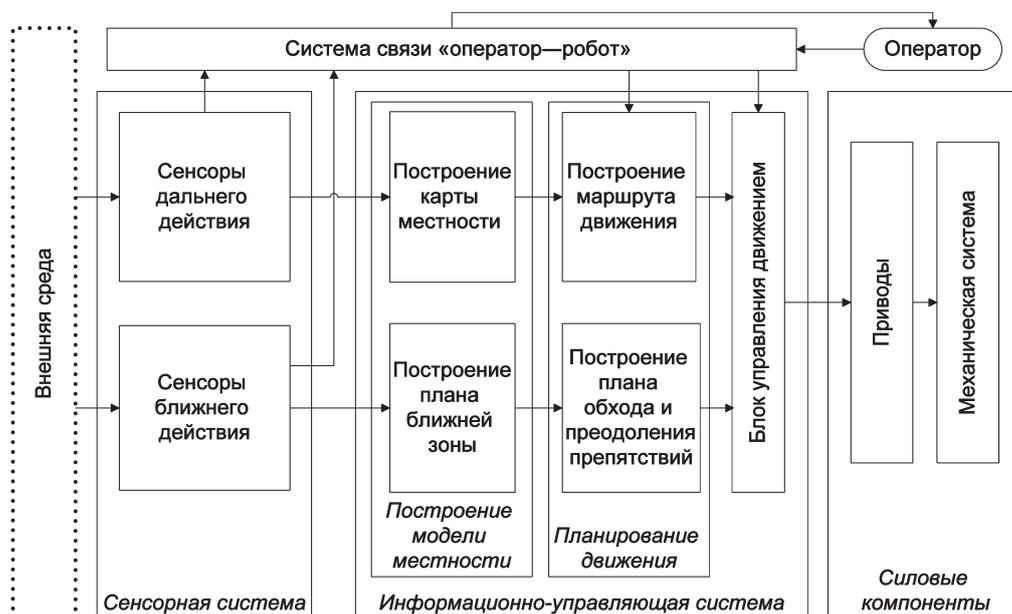


Рис. 2

Функциональная схема управления движением мобильного робота

ультразвуковых, инфракрасных, радиотехнических и лазерных дальномеров и т. д.); развитие химических сенсоров;

- для *информационно-управляющих систем*: развитие формализуемых символьных технологий искусственного интеллекта; решение проблемы создания методов работы с образной информацией и творчества (интуиции);

- для *систем связи «оператор—робот»*: создание 3D-виртуальных обобщенных сцен внешней среды, эффекта присутствия, неконтактных способов управления через 3D-картины внешней среды (голосом, световыми метками и т. п.);

- для *силовых (исполнительных и энергопитания) компонентов*: удовлетворение заданных требований по коэффициенту полезного действия и удельным массогабаритным параметрам.

Приоритетными направлениями решения этих задач являются: создание автопилотов для мобильных робототехнических устройств (т. е. систем управления движением беспилотных транспортных средств), их групповое применение, а также создание новых интеллектуальных поколений роботов, ориентированных на автономное функционирование [4, с. 383–384]. Эти работы должны проводиться на основе системного подхода к проектированию робототехнических устройств и модульного принципа их построения.

Степень неопределенности условий применения мобильного робота, сложность местности (внешней среды) и характер целевых заданий определяют требуемый уровень реализации методов искусственного интеллекта при построении системы управления движением мобильного робота для повышения качества решения следующих задач [3, с. 83]:

- обработка сенсорной информации;
- оценка внешней среды и принятие решений по адекватному поведению;
- планирование поведения;
- управление движением по реализации этих планов;
- создание интеллектуальных интерфейсов для взаимодействия с человеком-оператором и другими роботами и совместно действующим оборудованием.

Сенсорные системы роботов составляют основную часть их информационно-измерительных систем. Их назначение — формировать и выдавать информацию о состоянии объектов, процессах во внешней среде и о самом роботе, для функционирования которого эта информация требуется. Сенсорные системы, используемые в системах передвижения робота, подразделяются на системы, обеспечивающие безопасность движения (предотвращение столкновений с препятствиями, опрокидывания на уклонах, попадания в недопустимые для робота внешние условия и т. п.), и системы, обеспечивающие навигацию робота в пространстве. Требования, предъявляемые к сенсорным системам, существенно зависят от того уровня системы управления, на котором используется их информация [5].

Основу концепции построения интеллектуальных систем управления движением мобильных роботов составляют следующие принципы [6, с. 42–45]:

- *принцип ситуационного управления*: каждому классу возможных ситуаций, возникающих в процессе функционирования робота, ставится в соответствие определенный класс допустимых решений по управлению;

- *принцип иерархической организации* системы интеллектуального управления;

- *принцип обоснованного выбора* современных интеллектуальных технологий (экспертных систем, нейросетевых структур, нечеткой логики, ассоциативной памяти), используемых для решения задач отдельных уровней иерархии управления.

В соответствии с принципом иерархической организации системы интеллектуального управления включают три уровня управления [6, с. 42–45; 7, 8]:

- *стратегический уровень*, на котором осуществляется планирование целесообразного поведения робота (выбор стратегии выполнения задания, формирование последовательности необходимых действий, оперативная коррекция поведения с учетом изменений среды);

- *тактический уровень*, на котором планируются целесообразные действия с учетом динамики исполнительных подсистем и с учетом состояния и текущих изменений внешней среды;

- *исполнительный (приводной) уровень*, на котором обеспечивается инвариантность или активная адаптация системы управления приводами мобильного робота к изменениям внешней нагрузки и вариациям параметров системы управления приводом.

Измерительно-информационный комплекс мобильного робота замыкает контуры отдельных уровней управления и обеспечивает адекватность преобразуемой информации целям функционирования системы, а также достоверное отображение состояния внешней среды, системы и объекта управления.

Главная архитектурная особенность, которая отличает интеллектуальную систему управления движением мобильного робота от системы, построенной по традиционной схеме, связана с подключением механизмов хранения и обработки знаний [9, 10] для реализации возможности выполнения требуемых функций в неопределенных условиях, т. е. при случайном характере внешних и внутренних возмущений, к которым может быть отнесено непредусмотренное изменение цели или программы управления, эксплуатационных характеристик системы и объекта управления, параметров внешней среды и т. д.

Перечень актуальных проблем построения систем управления движением беспилотных транспортных средств

По докладам на конференции ЭР-2015 и публикациям аналогичной тематической направленности в других источниках информации с авторством некоторых

участников конференции [11] рассмотрены проблемы робототехники, которые распространяются и на задачи построения систем управления движением беспилотных транспортных средств (мобильных роботов).

Проблемы робототехники могут быть отнесены к трем основным типам: организационные, материально-технические, научно-технические.

Среди организационных проблем робототехники могут быть выделены отсутствие целостной политики государства и рассогласованность действий различных ведомств в развитии отечественной робототехники, отсутствие национальных стандартов в области робототехники [12], а также нехватка профессионально подготовленных специалистов в области построения интеллектуальных информационно-измерительных и управляющих систем автономных мобильных роботов.

К материально-техническим проблемам робототехники относятся отставание отечественных предприятий в создании отдельных электромеханических и микроэлектронных компонентов, а также ориентация на применение робототехнических и мехатронных компонентов импортного производства, что ставит отечественную робототехнику в критическую зависимость от других стран [12].

Научно-технические проблемы робототехники в аспекте построения систем управления движением беспилотных транспортных средств (мобильных роботов) можно сгруппировать следующим образом:

- 1) проблемы обработки информации в информационно-управляющей системе мобильного робота;
- 2) проблемы группового управления мобильными роботами;
- 3) проблемы построения интеллектуальной системы автоматического управления.

В настоящей статье рассматриваются только научно-технические проблемы и реализованные подходы к их решению.

Проблемы обработки информации в информационно-управляющей системе мобильного робота

В табл. 1 перечислены актуальные проблемы обработки информации в информационно-управляющей системе мобильного робота, а также описаны подходы к их решению, реализованные авторами научно-технических публикаций.

Таблица 1 Перечень актуальных проблем обработки информации в информационно-управляющей системе мобильного робота и реализованные подходы к их решению

Подход к решению проблемы	Примечание
<i>Обнаружение и распознавание препятствий мобильным роботом</i>	
Комплексная обработка информации с сенсорных систем разного типа в бортовой системе технического зрения (СТЗ) с программно-алгоритмическим обеспечением решения задачи сегментации комплексированного изображения для распознавания растительности на опорной поверхности [13]	Создан макет комплексированной СТЗ, в состав которой входят сканирующий 3D-лазерный дальномер, сканирующий 2D-лазерный дальномер, телевизионные камеры, тепловизионная камера, интегрированная инерциально-спутниковая навигационная система. Натурные эксперименты подтвердили повышение эффективности (достоверность, быстрдействие, точность) решения задач распознавания растительности на разных типах опорной поверхности для различных погодных условий и времени суток
Комплексная обработка информации с датчиков в бортовой СТЗ. Комплексирование информации с телевизионной и тепловизионной камер в СТЗ позволяет более достоверно детектировать живые и некоторые искусственные препятствия за счет их температурного контраста с окружающей средой [14]	Разработан и испытан макет комплексированной СТЗ, смонтированной на автомобиле. По результатам натурных испытаний констатируется повышение эффективности СТЗ (полнота и точность распознавания, быстрдействие)
<i>Позиционирование мобильного робота внутри помещения</i>	
Представлен алгоритм визуальной локализации беспилотного летательного аппарата (БЛА) квадроспирального типа внутри помещения на основе сопоставления граней, полученных из изображения с видеокamеры и из изображения, смоделированного на основе известной 3D-модели помещения. Для обработки данных о схожести изображений используется алгоритм локализации, основанный на множестве частиц (гипотез о местоположении робота) [15]	Грани образуются элементами конструкции помещения (стыки стен, потолок и пола, границы окон и дверей и т. д.). Для нахождения отрезков прямых линий в выделенных границах на изображении используется преобразование Хафа ¹ . Приводятся результаты проверки работоспособности алгоритма путем моделирования в среде симулятора Gazebo. В качестве модели БЛА использовалась модель квадрокоптера Ar. Drone
В работе [16] описываются применение алгоритмов поиска объектов на изображении, полученном с инфракрасного дальномера, а также комплексирование этой информации с бортовыми инерциальными системами в целях определения собственного местоположения	По последовательности эхо-изображений совместно с информационным массивом выделенных на них объектов можно определять координаты этих объектов с заданной точностью, оценить их пригодность для использования в навигации, а также организовать траекторное слежение за объектами

Продолжение табл. 1

Подход к решению проблемы	Примечание
<p>Поток данных с бортовой аппаратуры комплексирован с результатами обработки видеопотока с бортовой видеокамеры. Обработка выполняется с помощью быстродействующих псевдоградиентных алгоритмов, позволяющих БЛА определять свое местоположение относительно наблюдаемых объектов. Координаты текущего местоположения сравниваются с координатами заданной цели, после чего происходит корректировка курса [17]</p>	<p>Состав бортовой аппаратуры: гироскоп, магнитный компас, инерциальная навигационная система, датчики высоты, видеокамера. Разработанный программный комплекс представляет собой набор функциональных модулей, выполненных в виде отдельных исполняемых файлов, взаимодействующих между собой посредством протокола UDP². Для реализации подхода использовался квадрокоптер Ar. Drone 2.0. Проведены летные испытания БЛА, показавшие, что предложенный подход позволяет обеспечить высокую точность позиционирования</p>
<i>Навигация мобильного робота</i>	
<p>Построена СТЗ, которая на основе изображения с видеокамеры выделяет искусственные ориентиры и позволяет вычислить отклонение движения мобильного робота от заданного курса с учетом найденных ориентиров. СТЗ представляет собой программно-аппаратный комплекс, включающий одну видеокамеру с поворотной-наклонной механизмом и бортовой компьютер, на котором реализовано программное обеспечение [18]</p> <p>Для получения информации о характере движения мобильного робота использован метод оптического потока. Построен алгоритм обнаружения и сопровождения особых точек на изображении с телевизионной камеры, направленной по ходу движения мобильного робота [19]</p> <p>Создание СТЗ для бортовых навигационных комплексов автономного наземного мобильного робота с использованием нейросетевой аппроксимации и классификации при решении основных задач обработки изображений [20]: поиск особых точек изображения, стереорекострукция для особых точек, поиск перемещения в бортовой СТЗ</p> <p>Для решения проблемы применения СТЗ БЛА в изменяемых условиях наблюдения предложен подход к формированию в СТЗ адаптивных эталонных описаний объектов наблюдений на основе интерполяции имеющихся описаний, полученных для других условий, который базируется на использовании нейронечетких систем [21]</p> <p>В работе [22] рассматривается задача навигации робота, работающего на больших открытых пространствах в условиях ограниченности сенсорной базы. Описывается алгоритм навигации мобильного робота семейства SLAM⁴, основанный на методе реконструкции сцен с использованием недоопределенных моделей</p> <p>В работе [23] исследуются современные методы одновременного картирования и локализации по видеопотоку (vSLAM), полученному с единственной камеры, которые применимы в задачах навигации БЛА в неизвестной среде</p> <p>Автономная оценка собственного перемещения робота по изображениям бортовых камер — визуальная одометрия. В работе [24] представлена система автоматического возвращения мобильного робота к оператору с использованием данных визуального одометра, объединяемых с показаниями инерциального датчика</p>	<p>В качестве искусственных ориентиров выступают линии, ограничивающие трассу робота, и метки в виде двумерных штриховых кодов. При наличии модели пространства с искусственными ориентирами СТЗ позволяет установить позицию и ориентацию мобильного робота. Примененный алгоритм распознавания ориентира-линии основан на операции порогового преобразования изображения, морфологическом расширении и преобразовании Хафа</p> <p>В алгоритме решения задачи использованы две функции из библиотеки компьютерного зрения OpenCV³: алгоритм Шитомаса обнаружения особых точек; алгоритм Лукаса—Канаде сопровождения особых точек</p> <p>Результаты моделирования нейросетевой СТЗ показали принципиальную эффективность подхода к решению задач навигации и ориентации в бортовых системах автономных мобильных объектов</p> <p>Рассмотрены три проблемы, снижающие эффективность применения СТЗ БЛА: 1) неопределенные и изменяемые условия наблюдения; 2) недостаточная информативность атрибутов объектов поиска; 3) недостаточная производительность поиска. Вторая и третья проблемы могут быть решены, например, с привлечением дополнительных поисковых средств (группы БЛА)</p> <p>Вычислительный процесс метода объединяет задачи построения карты и навигации в пространстве. Перечислены методы SLAM. Рассмотрено описание сцены в виде графа: вершины — это объекты-ориентиры, ребра — связи между объектами</p> <p>Использовались свободные реализации методов MonoSLAM, PTAM и LSD-SLAM для фреймворка Robot Operating System (ROS). Приведены результаты экспериментального сравнения этих методов по скорости обработки изображений, детализации полученной карты, скорости составления карты</p> <p>Метод визуальной одометрии основан на измерении смещения ключевых точек в пространстве, информация о которых получается по результатам анализа последовательности стереоизображений СТЗ. Система автоматического возвращения мобильного робота установлена на мобильном трехколесном роботе</p>

Продолжение табл. 1

Подход к решению проблемы	Примечание
В работе [25] рассмотрены возможности интеллектуализации систем управления беспилотными транспортными средствами за счет использования СТЗ и определены основные особенности этого подхода	Рассмотрен нейросетевой подход к построению интеллектуальной модели формирования параметров алгоритма обработки кадров в процессе движения беспилотного наземного модуля в естественной среде
<i>Управление мобильным роботом</i>	
В работе [26] предложена математическая модель, описывающая пространственное положение мобильного робота — трикоптера. Структурная схема управления трикоптером включает микроконтроллер, логический регулятор, объект управления и обратные связи	Управление приводами генерируется бортовой системой управления по соответствующим алгоритмам. В качестве датчиков обратной связи используются акселерометр (показывает изменение скорости движения трикоптера в пространстве), магнитометр (показывает положение в пространстве), гироскоп (определяет значение углов поворота трикоптера, характеризующих его ориентацию в пространстве)
В работе [27] изучена динамика мультироторного летательного аппарата, построены базовые алгоритмы управления и выполнено их численное моделирование. На основании моделирования строится нейроконтроллер для квадрокоптера	Построена модель квадрокоптера с четырьмя управлениями и шестью степенями свободы, учитывающая сопротивление воздуха через воздействие его на вращение лопастей. С помощью численного моделирования изучены такие базовые траектории, как взлет, полет по прямой, посадка
В работе [28] рассмотрены вопросы математического моделирования движения квадрокоптера с учетом массогабаритных свойств четырех электроприводов, снабженных редуктором	Приведена расчетная схема и составлены дифференциальные уравнения на основе общих теорем динамики, которые описывают взаимосвязанные электромагнитные и механические процессы в электромеханической системе приводов винтов квадрокоптера
В работе [29] рассмотрены проблемы создания беспилотных автомобилей. Для изучения проблемы управления автомобилем разработана динамическая модель в среде MatLab/Simulink с использованием библиотеки компонентов SimScape	Для задания характеристик модели использовались технические характеристики автомобиля ВАЗ-21214 «Нива». Проведенные эксперименты показали полную адекватность созданных моделей поставленной задаче — автомобиль под управлением созданных устройств обеспечивает точности движения, аналогичные достижимым при управлении человеком
В работе [30] описана система управления и навигации квадрокоптера типа Parrot Ar. Drone 2.0, разработанная под управлением ROS для решения задачи движения БЛА по заданной трассе, обозначенной на земле черной пунктирной линией на белом фоне	Базовые функции управления реализованы на комплекте средств разработки SDK ⁵ . Представлены результаты экспериментальных исследований, проведенных в помещении
В работе [31] рассмотрен подход к формированию сценариев безопасного автономного завершения полета дистанционно пилотируемого летательного аппарата (квадрокоптера) при отказе одного или двух двигателей путем программного изменения тяги других двигателей	Описана математическая модель объекта исследования — квадрокоптера. На модели исследованы ситуации отказа одного и двух двигателей. Делается вывод, что при отказе одного двигателя для обеспечения приемлемого уровня безопасности необходимо выключить симметричный двигатель
В работе [32] рассматривается задача бесконтактного управления БЛА посредством жестов руки. Предложена система команд для квадрокоптера Ar. Drone 2.0	Распознавание жестов осуществляется посредством кадровой обработки видеоряда, состоящего из дальностных изображений. Метод не требует начального обучения, не чувствителен к изменениям освещения, инвариантен к размерам ладони и тела человека
<p>¹ Преобразование Хафа (Hough Transform) — алгоритм (численный метод), применяемый для извлечения элементов из изображения.</p> <p>² UDP (User Datagram Protocol) — протокол пользовательских дейтаграмм, один из ключевых элементов TCP/IP, набора сетевых протоколов для интернета.</p> <p>³ OpenCV (Open Source Computer Vision Library) — библиотека компьютерного зрения с открытым исходным кодом.</p> <p>⁴ SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) — метод одновременной навигации и построения карты, используемый автономными транспортными средствами для построения карты в неизвестном пространстве или для обновления карты в заранее известном пространстве с одновременным контролем текущего местоположения и пройденного пути.</p> <p>⁵ SDK (Software Development Kit) — комплект средств разработки, который позволяет специалистам создавать приложения для программного обеспечения базовых средств разработки, аппаратной платформы, компьютерной системы и т. п.</p>	

Проблемы группового управления мобильными роботами

Групповое управление — это совместное связанное управление несколькими объектами, основной целью которого является выполнение объектами общей технологической операции с определенным распределением между ними отдельных ее частей [4]. Основная идея группового управления мобильными роботами (групповой робототехники) заключается в том, что некото-

рые задачи (например, разведка и картографирование местности), решаемые одним или несколькими сложными роботами, могут быть решены группой относительно простых мобильных роботов.

Особенностью задач траекторного управления группой БЛА является то, что помимо управления отдельными БЛА необходимо обеспечить согласованность их действий с действиями других БЛА группы [33]. Подходы к решению этой проблемы описаны в табл. 2.

Таблица 2 Подходы к решению проблемы группового управления мобильными роботами

Подход к решению проблемы	Примечание
<p>В работе [34] предлагается подход к поиску наземных мало-размерных подвижных объектов группой БЛА вертолетного типа, функционирующей в автономном режиме (без участия человека-оператора), который заключается в предварительном распределении заданной целевой задачи поиска между БЛА с учетом наблюдаемости объектов на различных подстилающих поверхностях</p>	<p>Необходимым (но недостаточным) условием для обнаружения или распознавания объектов поиска является их наблюдаемость, зависящая от положения системы наблюдения, размеров объектов поиска и структуры рельефа обследуемой местности. Предложен алгоритм формирования согласованных управлений БЛА при групповом поиске наземных объектов</p>
<p>В работе [35] рассмотрены механизмы локального взаимодействия в группе мобильных роботов, направленные на уменьшение времени картографирования и повышение точности этой операции, основанные на языковом общении роботов</p>	<p>Предложена концепция представления картографированных областей в виде градиентной сетки; реализована процедура картографирования и навигации в группе роботов со слаборазвитой сенсорикой</p>
<p>Решения задач определения лидера и распределения ролей в однородной группе роботов предложены в работе [36]. Для решения задачи согласованного движения мобильных роботов достаточно наличия лидера. Однако для более сложных задач, решаемых группой роботов, требуются дифференциация их функций и распределение задач между роботами</p>	<p>Одной из принципиальных особенностей роевой робототехники является локальный характер взаимодействия (неявная коммуникация) роботов друг с другом, а также роботов со средой: каждый робот группы непосредственно взаимодействует лишь со своими соседями, находящимися в некоторой ограниченной зоне видимости. В такой системе роботы самостоятельно принимают решения о дальнейших действиях</p>
<p>В работе [37] рассмотрен пример действий смоделированной гетерогенной группы роботов (беспилотного наземного робота и БЛА) через 3D-модель лабиринта методом вероятностной дорожной карты</p>	<p>Проведено исследование согласованных действий группы роботов в симулированной 3D-среде Gazebo в целях картографирования местности и навигации через лабиринт</p>
<p>Создание среды имитационного моделирования (СИМ) групповых действий БЛА с высокой степенью автономности, которая предназначена для экспериментального исследования и отработки в реальном времени различных моделей группового поведения БЛА в условиях командного взаимодействия [38]</p>	<p>СИМ разрабатывается с позиций концепции многоагентных систем. Сформулированы предъявляемые к СИМ требования, рассмотрены ее архитектура и основные особенности функционирования</p>
<p>В работе [39] представлена распределенная система управления и навигации БЛА, функционирующих в условиях отсутствия сигналов глобальных навигационных систем (GPS/ГЛОНАСС). Разработанная интеллектуальная система управления основана на модели 4D/RCS¹</p>	<p>Разработанная интеллектуальная система управления реализована с применением программного обеспечения ROS. Реализация представленной системы демонстрируется на примере задачи построения карты помещения, решаемой группой квадрокоптеров Ar. Drone 2.0. Реализован алгоритм построения карты расположения маркеров, который может применяться в практических задачах автономной навигации при возможности установки визуальных маркеров. Задача картирования решается с помощью реализации алгоритма EKF-SLAM</p>

¹ 4D/RCS (4D/Real-time Control System) – эталонная модель архитектуры системы управления беспилотных транспортных средств с варьируемой степенью автономности [4D/RCS Version 2.0: A Reference Model Architecture for Unmanned Vehicle Systems / J. Albus [et al.]. — NIST, NISTIR 6910, 2002. — 167 p.].

Проблемы построения интеллектуальной системы автоматического управления

Введение в архитектуру системы автоматического управления блоков базы знаний и механизма логического вывода и организация соответствующего канала подстройки регулирующего устройства (т. е. создание интеллектуального контура адаптации) определяет, в дополнение к трем базовым принципам концепции построения интеллектуальных систем управления [6, с. 42–45], четвертый принцип: введение контура интеллектуальной обратной связи, формирующей новые или уточняющие имеющиеся знания в процессе самообучения на основе обобщения накапливаемого опыта [40].

В работе [40] сформулирован и пятый базовый принцип: чем выше уровень неопределенности условий, в которых функционирует система, тем выше должна быть степень ее интеллектуальности, определяющая требуемый уровень адаптации системы автоматического управления, который определяется возможностью работы с базой знаний, наличием блоков самообучения и прогноза и соответствующих каналов воздействия на параметры регулятора, программу действий или цель управления.

Практическая реализация предложенного подхода предполагает необходимость фундаментальных исследований по таким вопросам, как [40]:

- рациональная организация баз данных для хранения накапливаемой сенсорной информации в составе интеллектуальных самообучающихся систем управления;
- механизмы построения ассоциативной памяти для формирования обобщенных образов наблюдаемых объектов, ситуаций и явлений на основе комплексного применения технологии нейросетевых структур;
- обобщенные критерии целесообразности функционирования интеллектуальных систем.

Интеллектуальная система управления движением автономного мобильного робота должна обеспечивать прокладку оптимального в некотором смысле маршрута его целенаправленного перемещения [40].

Интеллектуальный робот как машина-исполнитель должен принимать задание в общей форме, а сам робот должен обладать возможностью принимать решения или планировать свои действия в распознаваемой им неопределенной или сложной обстановке. Для транспортного робота это означает, что система должна самостоятельно выбирать маршрут до намеченной цели, обходить препятствия, которые могут возникать на пути, выбирать оптимальные параметры перемещения (скорость, положение корпуса в пространстве, ускорения на виражах), а также предотвращать столкновения и аварийные ситуации [41].

В работе [42] рассмотрены международные стандарты и основные подходы к созданию интеллектуальных систем управления (ИСУ) автономными транспортными средствами.

Так, стандарт JAUS (Joint Architecture for Unmanned Systems) определяет общие требования к архитектуре систем управления беспилотных транспортных средств с различной степенью автономности и к обмену данными между ними. Система управления беспилотных транспортных средств согласно JAUS имеет иерархическую структуру «система—подсистема—узел—компонент».

Стандарт 4D/RCS (4D/Real-time Control System) — эталонная модель архитектуры системы управления беспилотных транспортных средств с варьируемой степенью автономности, описывает функциональные элементы системы управления и механизмы взаимодействия между ними на трех уровнях абстракции: концептуальном, архитектурном, реализации [42].

Концептуальная модель описывает систему управления в виде предъявляемых к ней требований, общих свойств и принципов функционирования, при этом основным свойством системы управления является интеллектуальность управления. Декларируется, что выбор управляющих воздействий для достижения поставленной цели в условиях сложной обстановки должен осуществляться на основе всестороннего анализа поступающих и хранящихся в системе данных, рассмотрения различных альтернативных планов и выбора наилучшего из них.

Основным принципом, закладываемым в эталонную модель 4D/RCS, является принцип масштабируемости. Модель системы управления состоит из связанных иерархической структурой узлов. На каждом уровне иерархии осуществляется выбор управляющих воздействий на основе информации, поступающей с вышестоящих уровней. Выполняются декомпозиция задачи управления и распределение подзадач между узлами нижнего уровня.

Архитектура модели описывается в виде иерархии узлов 4D/RCS. Узел — это совокупность четырех функциональных элементов, каждый из которых определяется как элементарный процесс системы управления: обработка сенсорной информации, построение модели мира, оценивание свойств, выбор управляющих воздействий (генерация поведения). В качестве узла могут выступать отдельное беспилотное транспортное средство, группа, конкретная подсистема, датчик. Любой узел связан с другими узлами в иерархии вертикальными и горизонтальными связями. Обработка сенсорной информации на определенном узле 4D/RCS включает совокупность процессов анализа данных, полученных от датчиков беспилотного транспортного средства, и их обработки для генерации таких структур данных, которые требуются для решения задач в рамках этого уровня иерархии.

Под моделью мира понимается представление информации об окружающей среде в виде, который обеспечивает требуемый уровень детализации для решения задач управления, присущих конкретному узлу в иерархии 4D/RCS. Модель мира распределена между всеми узлами архитектуры.

Программа UCAR (Unmanned Combat Armed Rotorcraft) — это модель архитектуры интеллектуально-

го управления с групповым взаимодействием, которая воплощает в себе все современные подходы в области автоматизации управления группировкой БЛА, в том числе составление планов достижения целей [42]. Для составления планов в динамической среде задача разбивается на элементарные подзадачи, которые можно решить с помощью «примитивов» (специализированных алгоритмов). На основе информации, полученной от модуля оценки обстановки, алгоритм планирования для текущей задачи собирается из хранящихся в библиотеке примитивов. Основной функцией модуля оценки обстановки является обработка имеющихся данных в целях формирования единой модели мира, которая используется остальными модулями системы управления для принятия решений.

Работа [43] посвящена методам и подходам к проектированию и разработке интеллектуальных систем управления беспилотными транспортными средствами, в частности БЛА, способными к автономному функционированию в окружающей среде. Создание систем управления такими средствами подразумевает необходимость исследования методов и подходов к решению ряда вопросов, связанных как с концептуальной организацией архитектуры таких систем, так и непосредственно с их программной реализацией. В работе [43] принимается трехуровневая архитектура системы управления беспилотного транспортного средства:

- стратегический (верхний) уровень управления, ответственный за постановку и выбор целей, прогнозирование, высокоуровневую обработку информации;
- тактический (промежуточный) уровень управления, ответственный за распознавание образов, построение карты местности, планирование траектории;
- уровень управления (нижний), ответственный за выдерживание параметров управления исполнительными механизмами.

Предложена концептуальная модель архитектуры тактического уровня управления беспилотным транспортным средством, а также способ программной реализации этой модели, основанный на использовании открытого программного обеспечения ROS [43].

В работе [44] описан когнитивный подход к представлению знаний: предложена знаковая модель пространственно-временной картины мира, позволяющая с использованием специального алгоритма обучения НТМ* осуществить привязку используемых элементов знания к реальным объектам и свойствам среды. В рамках этого подхода рассмотрена модельная задача перемещения группы БЛА на местности с различными типами препятствий.

* НТМ (Hierarchical Temporal Memory) — иерархическая темпоральная память. НТМ является технологией машинного самообучения, моделирующей структурные и алгоритмические свойства коры головного мозга. НТМ может быть использована при построении машин, которые достигнут (превзойдут) уровень человека в решении множества когнитивных задач [Иерархическая темпоральная память (НТМ) и ее кортикальные алгоритмы обучения. Версия 0.2.1 от 12 сентября 2011 г. (C) Numenta, Inc., 2011].

Заключение

По результатам анализа научно-технической информации можно сделать вывод, что рассмотренные на конференции ЭР-2015 научно-технические проблемы построения систем управления движением беспилотных транспортных средств (мобильных роботов) и реализуемые подходы к их решению соответствуют поставленным в работе [1, с. 383] задачам по созданию информационно-управляющих систем для нового интеллектуального поколения мобильных роботов, ориентированных на их автономное функционирование.

При этом следует отметить, что на конференции ЭР-2015:

- решению проблемы создания систем управления движением беспилотных транспортных средств с элементами искусственного интеллекта было посвящено незначительное количество докладов;
- представленные в докладах подходы к решению проблемы построения интеллектуальной системы автоматического управления движением беспилотных транспортных средств ограничиваются в основном научно-методическими предложениями;
- отсутствовали доклады по работам, доведенным до создания реальных образцов беспилотных транспортных средств, ориентированных на их автономное функционирование.

Литература

1. Экстремальная робототехника: тр. Международ. науч.-техн. конф. СПб.: Политехника-сервис, 2015. 376 с.
2. Второй Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта (БТС-ИИ-2015)» (9 октября 2015 г., Санкт-Петербург, Россия): тр. семинара. СПб.: Политехника-сервис, 2015. 140 с.
3. Станкевич Л. А., Юревич Е. И. Искусственный интеллект и искусственный разум в робототехнике: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 167 с.
4. Юревич Е. И. Основы робототехники. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 416 с.
5. Юревич Е. И. Сенсорные системы в робототехнике: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 100 с.
6. Интеллектуальные роботы: учебное пособие для вузов / И. А. Каляев, В. М. Лохин, И. М. Макаров [и др.]; под общ. ред. Е. И. Юревича. М.: Машиностроение, 2007. 360 с.
7. Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Евстигнеев Д. В. (Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики — технический университет) Интеллектуальные системы управления беспилотными летательными аппаратами на основе комплексного применения технологий нечеткой логики и ассоциативной памяти // Авиакосмическое приборостроение. 2002. № 2. С. 29–42.
8. Боголюбов А. А., Галютин В. Б., Лебедев Г. Н. (Московский авиационный институт — государственный технический университет) Проблема управления полетом с помощью искусственного интеллекта // Авиакосмическое приборостроение. 2002. № 1. С. 19–25.

9. **Искусственный интеллект**: в 3 кн. Кн. 2. Модели и методы: справ. / Под ред. Д. А. Поспелова. М.: Радио и связь, 1990. 304 с.
10. **Гаврилова Т. А., Хорошевский В. Ф.** Базы знаний интеллектуальных систем. СПб.: Питер, 2000. 384 с.
11. **Четырнадцатая** национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2014 (24–27 сентября 2014 г., г. Казань): тр. конф.: в 3 т. Т. 3. М.: Физматлитгиз, 2014. 416 с.
12. **Лысый С. Р.** (ФГУП «ЦНИИ машиностроения», г. Королев, Московская обл.) Научно-технические проблемы и перспективы развития робототехники специального (космического) назначения / (см. [1, с. 29–32]).
13. **Вазаев А. В., Носков В. П., Рубцов И. В.** (МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва) Повышение достоверности модели внешней среды по данным комплексированной СТЗ / (см. [1, с. 363–366]).
14. **Ханин А. А.** (МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва) Повышение достоверности распознавания дорожных сцен за счет комплексирования телевизионных, тепловизионных и дальнометрических данных (см. [1, с. 367–371]).
15. **Буйвал А. К.** (Брянский государственный технический университет, г. Брянск) Локализация беспилотного летательного аппарата внутри помещений на основе визуальных геометрических признаков и известной 3D-модели окружающей среды (см. [2, с. 10–17]).
16. **Дементьев В. Е., Кондратьев Д. С.** (Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск) Разработка алгоритмов навигации автономных летательных аппаратов на основе комплексирования разнородных навигационных данных (см. [11, с. 256–264]).
17. **Воронов С. В., Дементьев В. Е., Логинов С. С.** (Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск) Разработка алгоритмов и программных средств управления беспилотным летательным аппаратом (см. [11, с. 249–255]).
18. **Юдин Д. А., Проценко В. В., Постольский Г. Г., Кижук А. С., Магергут В. З.** (Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова — БГТУ им. В. Г. Шухова) Система технического зрения для автоматического ориентирования и позиционирования мобильного робота / Робототехника и техническая кибернетика. 2014. № 1 (2). С. 70–75.
19. **Фомин И. С.** (ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург) Алгоритм определения режима движения транспортного средства по видеопоследовательности с фронтальной камеры (см. [1, с. 161–165]).
20. **Корлякова М. О., Новиков П. К., Прокопов Е. Ю., Пилипенко А. Ю.** (Московский государственный технический университет, Калужский филиал, г. Калуга) Интеллектуальная обработка информации в системе технического зрения (см. [11, с. 289–297]).
21. **Ким Н. В., Бодунков Н. Е., Крылов И. Г.** (Московский авиационный институт — МАИ) Поиск наземных объектов беспилотными летательными аппаратами (см. [2, с. 42–49]).
22. **Московский А. Д.** (Московский физико-технический институт МФТИ; Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» — НИЦ «Курчатовский институт», Москва) Метод распознавания сцен для задачи навигации мобильных роботов (см. [2, с. 66–73]).
23. **Боковой А. В.** (Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук / ФИЦ ИУ РАН, Москва). Исследование методов одновременно картоирования и локализации по видеопотоку, полученному с единственной камеры (см. [2, с. 26–33]).
24. **Девятериков Е. А., Михайлов Б. Б.** (МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва) Использование данных визуального одометра для автономного возвращения мобильного робота в среде без фиксированных точек отсчета (см. [1, с. 356–361]).
25. **Ивашина Е. А., Корлякова М. О., Пилипенко А. Ю., Филимонков А. А.** (Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана — КФ МГТУ им. Баумана, Калуга, КБ-683; филиал ФГУП НПЦ АП им. Н. А. Пилюгина — «СПЗ», г. Калуга) Подход к настройке системы технического зрения для мобильной платформы (см. [2, с. 58–65]).
26. **Павловский В. Е.** (Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша Российской академии наук — ИПМ РАН, Москва), Яцун С. Ф., Емельянова О. В., Стуканева С. П. (ГОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск) Математическое моделирование робота с переменными вектором тяги (см. [2, с. 99–106]).
27. **Павловский В. Е.** (ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, Москва), Савицкий А. В. (МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва) Модель, базовые траектории, нейроконтроллер для мультироторного робота (см. [11, с. 315–323]).
28. **Яцун С. Ф., Попов Н. И., Емельянова О. В., Савин А. И.** (ГОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск) Моделирование движения беспилотных летательных аппаратов квадроскопического типа (см. [11, с. 366–373]).
29. **Павловский В. Е., Огольцов В. Н., Спиридонова И. А.** (Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша Российской академии наук, Москва; Российский государственный гуманитарный университет, Москва) Задачи управления беспилотным автомобилем в проекте «АвтоНИВА» (см. [2, с. 107–114]).
30. **Сурцук М. М., Московский А. Д.** (Московский физико-технический институт; Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва) Система управления и навигации мультироторным летательным аппаратом для задачи пролета над заданной траекторией (см. [2, с. 91–98]).
31. **Шибяев В. М., Аполлонов Д. В., Матвеев В. А., Кобцева Т. Л.** (Центр экспертизы и сертификации авиационной техники на базе центрального аэрогидродинамического института им. профессора Н. Е. Жуковского, г. Жуковский) Формирование сценариев безопасного автономного завершения полета ДПЛА с целью определения критериев сертификации (см. [2, с. 123–129]).
32. **Нагапетян В. Э., Хачумов В. М.** Распознавание жестов руки в задаче бесконтактного управления беспилотным летательным аппаратом // Автометрия. 2015. Т. 51, № 2. С. 103–109.
33. **Липатов А. А., Миляков Д. А.** (ОАО «Концерн «Вега», Москва) Задачи управления и информационного обеспечения при применении групп беспилотных летательных аппаратов (см. [11, с. 298–306]).
34. **Ким Н. В., Крылов И. Г.** (Московский авиационный институт, Москва) Согласованное управление автономной группой беспилотных летательных аппаратов (см. [11, с. 283–288]).
35. **Воробьев В. В.** (Московский институт электроники и математики Высшей школы экономики; Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва) Решение задачи групповой рекогносцировки с использованием локального взаимодействия роботов (см. [2, с. 34–41]).
36. **Карпов В. Э.** (Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва) Процедура голосования в однородных коллективах роботов // XIV Нац. конф. по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2014 (24–27 октября 2014 г., г. Казань): тр. конф. Т. 2. Казань: Изд-во РИЦ «Школа», 2014. 341 с. С. 159–167.

37. **Афанасьев И. М., Сагитов А. Г., Данилов И. Ю., Магид Е. А.** (Университет Иннополиса, г. Казань) Навигация гетерогенной группы роботов (БПЛА и БНР) через лабиринт в 3D-симуляторе Gazebo методом вероятностной дорожной карты (см. [2, с. 18–25]).

38. **Пантелеев М. Г., Лебедев С. В.** (СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург), **Н. В. Кохтенко** (ЗАО НИИ ТС «Синвент», Санкт-Петербург) Среда имитационного моделирования групповых действий автономных БПЛА (см. [11, с. 324–332]).

39. **Яковлев К. С.** (Институт системного анализа Российской академии наук, Москва), **Хитьков В. В.** (Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П. А. Соловьева, г. Рыбинск) Распределенная система управления коалициями беспилотных летательных аппаратов, функционирующих в условиях отсутствия сигналов глобальных навигационных систем (см. [11, с. 350–358]).

40. **Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П.** (МИРЭА, Москва) Повышение адаптивных свойств автономных роботов на базе интеллектуальных технологий (см. [1, с. 63–67]).

41. **Добрынин Д. А.** (ВИНИТИ РАН, Москва) Беспилотные транспортные средства, современное состояние и перспективы (см. [11, с. 265–274]).

42. **Осипов Г. С., Тихомиров И. А., Хачумов В. М., Яковлев К. С.** (Институт системного анализа Российской академии наук, Москва) Интеллектуальные системы управления автономными транспортными средствами: стандарты, проекты, реализации // Авиакосмическое приборостроение. 2009. № 6. С. 34–43.

43. **Яковлев К. С.** (Институт системного анализа Российской академии наук, Москва), **Петров А. В., Хитьков В. В.** (Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П. А. Соловьева, г. Рыбинск) Программный комплекс навигации и управления беспилотными транспортными средствами // Информационные технологии и вычислительные системы. 2013. № 3. С. 72–82.

44. **Панов А. И.** (Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, Москва) Представление знаний в задачах согласованного перемещения группы БПЛА (см. [2, с. 74–82]).