

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ АГРОРОБОТОВ¹

Д.К. Ву, В.В. Нгуен, К.Т. Нго, А.Л. Ронжин (Санкт-Петербург)

Отличительной чертой аграрной робототехники является относительно устойчивая регулярность топологии рассадки обрабатываемых культур в отличие от других сфер применения роботов, где обслуживаемые объекты не имеют заранее известных координат и могут перемещаться в пространстве. Данный фактор несколько упрощает алгоритмизацию траектории движения робототехнических средств в процессе выполнения агропромышленных операций. Однако это упрощение, характерное для точного земледелия, может быть использовано в задачах мониторинга и обработки земель, но не при сборе урожая, например, плодово-ягодных культур.

Наибольший прогресс в роботизации сельскохозяйственного производства в настоящее время виден в области точного земледелия (ТЗ), отличительной чертой которого является локальная дифференциация агротехнических воздействий с учетом пространственной вариабельности почвенных и иных факторов формирования урожая в пределах отдельного сельскохозяйственного поля (агроконтур) [1, 2].

С развитием беспилотных летательных аппаратов (БЛА) начали изучаться задачи их применения не только для мониторинга территорий, но и физического взаимодействия со средой и ее объектами. Технические проблемы проектирования манипулятора для БЛА рассматриваются в ряде современных зарубежных работ [3,4]. Также существует ряд работ, где рассматривается вопрос о взаимодействии или посадке одиночного БЛА на мобильную платформу или судно [5,6].

Совместное функционирование групп гетерогенных роботов, а также их доставка/транспортировка к месту непосредственного решения прикладных задач являются одними из основных нерешенных проблем в области робототехники. Существующие решения в области группового управления роботизированных средств в основном решают задачи аддитивного усиления функционала гомогенных роботов. Например, увеличение суммарной тяговой мощности нескольких роботов; захват длинномерных объектов несколькими роботами; одновременный контроль распределенных объектов протяженной территории несколькими БЛА; ускорение мониторинга и составления картограмм местности за счет использования группы БЛА. Задачи же совместной деятельности роботов с разным функционалом при выполнении параллельных или последовательных операций над объектами рассматриваются еще не так часто и не имеют приемлемых решений.

В связи с вышеперечисленными проблемами в рамках данного исследования ведется разработка прототипа роботизированной подвижной платформы, использующейся для транспортировки набора БЛА, учитывая полученный задел в области проектирования бортовых вычислителей и робототехнических систем [7, 8, 9].

Предложенная концептуальная модель решения задачи управления группой гетерогенных сельскохозяйственных роботов на некотором земельном пространстве включает в себя параметры: множества обрабатываемых угодий и обрабатывающих сельскохозяйственных объектов, множества объектов базирования и хранения робототехнических средств, множества выращиваемых сельскохозяйственных культур, множества гетерогенных роботов, возможные варианты подъезда/подлета робототехнических средств от территории базирования к обрабатываемой территории, а также набор ресурсных ограничений.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант №16-19-00044).

Для систематизации задач аграрной робототехники с привязкой к параметрам предметной области, отличающихся высокой динамикой процессов и ограниченностью имеющихся ресурсов, рассмотрим далее задачу управления группой гетерогенных роботов при обслуживании рабочего пространства.

Пусть имеется рабочее земельное пространство S , характеризующееся кортежем параметров $\langle \tilde{N}, P, G, \rangle$, где $H = \{H_1, \dots, H_{i^H}\}$, $i^H \in \{1, \dots, N\}$ – множество обрабатываемых угодий, $P = \{P_1, \dots, P_{i^P}\}$, $i^P \in \{1, \dots, N\}$ – множество обрабатываемых сельскохозяйственных объектов, $G = \{G_1, \dots, G_{i^G}\}$, $i^G \in \{1, \dots, N\}$ – множество объектов базирования и хранения робототехнических средств, $\tilde{N} = \{\tilde{N}_1, \dots, \tilde{N}_{i^N}\}$, $i^N \in \{1, \dots, N\}$ – множество выращиваемых сельскохозяйственных культур. Также имеется множество $W = \{W_1, \dots, W_{i^W}\}$, $i^W \in \{1, \dots, N\}$, описывающее возможные варианты подъезда/подлета робототехнических средств от территории базирования к обрабатываемой территории. Существует множество гетерогенных роботов $R = \{R_1, \dots, R_{i^R}\}$, $i^R \in \{2, \dots, N\}$, используемых на данной территории. Необходимо решить задачу разработки методов и алгоритмов управления группой гетерогенных роботов R для обслуживания рабочего пространства S при наличии набора ресурсных ограничений L .

Далее рассмотрим каждый из параметров более подробно. На рис. 1 приведен пример схемы расположения объектов, участвующих в планировании работы сельскохозяйственных робототехнических средств.

Каждое из обрабатываемых угодий H_{i^H} описывается кортежем параметров $\langle H_{i^H}^E, H_{i^H}^D, H_{i^H}^A, H_{i^H}^M \rangle$, где $H_{i^H}^E$ – множество координат вершин многоугольника, охватывающего границы данного угодья, $H_{i^H}^D$ – множество координат точек плановой регулярной посадки культуры, обоснованное ее вегетативными параметрами, $H_{i^H}^A$ – картограмма агроконтуров [2], отличающихся внутривольной неоднородностью почвенного покрова, его плодородием, $H_{i^H}^M$ – множество координат точек, задающих траектории движения/полета робототехнических средств при выполнении сельскохозяйственных задач на угодье.

В качестве объектов базирования и хранения робототехнических средств будем рассматривать только открытые площадки для подъезда наземной техники и вертикальной посадки БЛА. Также для дистанционного зондирования допускаем возможность применения внешних спутниковых и крупных БЛА, требующих взлетно-посадочной полосы, но не располагающихся на множестве объектов базирования и хранения G [10]. В этом случае объект G_{i^G} может быть описан множеством координат вершин многоугольника, охватывающего границы объекта. При необходимости использования нескольких объектов следует учитывать их компактное расположение и требования к подъезду/подлету.

Параметры выращиваемой сельскохозяйственной культуры C_{i^C} можно представить в виде кортежа параметров $\langle C_{i^C}^D, C_{i^C}^O \rangle$, где $C_{i^C}^D$ – описание культуры, включая параметры посадки культуры, сбора урожая, характеристик почвы и др. [1], $C_{i^C}^O = \{C_{i^C}^{O^1}, \dots, C_{i^C}^{O^{i^O}}\}$, $i^O \in \{1, \dots, N\}$ – множество операций, запланированных в процессе культивации. В свою очередь каждая операция $C_{i^C}^{O^i}$ описывается кортежем параметров $\langle O_{i^O}^C, O_{i^O}^S, O_{i^O}^D, O_{i^O}^R, O_{i^O}^P, O_{i^O}^E \rangle$, где $O_{i^O}^C$ – условия начала операции, $O_{i^O}^S$ – плановое время начала операции, $O_{i^O}^D$ – плановая длительность операции, $O_{i^O}^R$ – ресурсы, необходимые для реализации операции, $O_{i^O}^P$ – множество обрабатываемых сельскохозяйственных объектов, необходимых для реализации операции, $O_{i^O}^E$ – множество критериев оценки степени выполнения операции.

Каждый робот R_i характеризуется кортежем параметров $\langle R_{i^R}^B, R_{i^R}^F, R_{i^R}^T, R_{i^R}^E \rangle$, где $R_{i^R}^B$ – тип базирования робота (водный, наземный, воздушный, космический и др.), $R_{i^R}^F$ – сельскохозяйственные функции, выполняемые роботом; $R_{i^R}^T$ – план задач, поставленный для реализации роботу, $R_{i^R}^E$ – многокритериальная оценка степени выполнения плана задач.

Разрабатываемые концептуальная модель и модельно-алгоритмическое обеспечение для управления группой гетерогенных роботов R при обслуживании рабочего пространства S также должно учитывать ресурсные ограничения L , включая время выполнения операций,

имеющееся количество техники, в том числе роботизированной, минеральные и водные ресурсы, загрузку обрабатываемых объектов, безопасность траекторий движения техники и другие факторы.

Далее рассмотрим основные результаты моделирования конструкции и функций подвижной роботизированной платформы, обслуживающей набор беспилотных летательных аппаратов. Отличительной особенностью разрабатываемой роботизированной платформы является наличие встроенных парковочных мест для нескольких БЛА. На данном этапе исследований приведем концептуальную модель платформы, учитывающую ее оснащение и конструктивные особенности. Основными конструктивными компонентами платформы являются:

- 1) шасси для передвижения платформы по сельскохозяйственным угодьям;
- 2) мультисенсорная система для определения локальных препятствий при перемещении платформы;
- 3) система энергопитания, обеспечивающая необходимую мощность для потребления самой платформой и набором БЛА при возникновении необходимости их подзарядки;
- 4) навигационная система, состоящая из двух подсистем, одна из которых контролирует движение платформы между местом базирования и рабочей территорией на основе средств глобальной навигации, а вторая локальная система разворачивается непосредственно на рабочей территории перед началом проведения аграрной операции с использованием радионавигационных БЛА;
- 5) коммуникационная система, реализующая связь подвижной платформой с БЛА и базовой станций;
- 6) кузовная часть платформы, содержащая контейнер для полезной нагрузки, а также парковочные места для набора БЛА.

Приведенный перечень основных компонентов обеспечивает функционирование платформы в автономных аграрных миссиях и совместную работу БЛА при обработке сельскохозяйственных объектов.

На рис. 1 представлена алгоритмическая модель совместной работы подвижной платформы и набора БЛА, которая укрупненно описывает основные этапы функционирования и совместной работы платформы и БЛА при решении целевой аграрной задачи. Первым этапом является планирование маршрута движения и выезд подвижной платформы с находящимся на борту набором БЛА на поле. После достижения платформы заданной точки границы обрабатываемого поля следует этап мониторинга поля, который выполняется с помощью БЛА и бортовых или облачных систем технического зрения. Цель этапа – составление уточненной цифровой карты местности и при необходимости различных видов картограмм обрабатываемого поля. Затем следует этап развертывания системы локальной навигации. На основе цифровой карты местности посредством БЛА создается сеть опорных станций, размещаемых в точках с известными координатами. Система локальной навигации предназначена для решения основных задач, таких как: обеспечения навигационными данными потребителей (платформы и БЛА) в пределах прямой радиовидимости; формирование навигационного поля для указанных потребителей.

Для формирования навигационного поля разворачиваются как минимум три станции для определения координат потребителей в трехмерном пространстве. Используя созданное навигационное поле, уточненную цифровую карту местности, картограммы БЛА перемещаются по своим траекториям и выполняют целевые задачи, взаимодействуя с передвигающейся платформой. После выполнения целевой задачи БЛА возвращаются к платформе. На следующем этапе платформа с находящимся на борту набором БЛА возвращается на место базирования. Планирование маршрута платформы рассчитывается с учетом текущего места нахождения платформы и системы глобальной навигации.

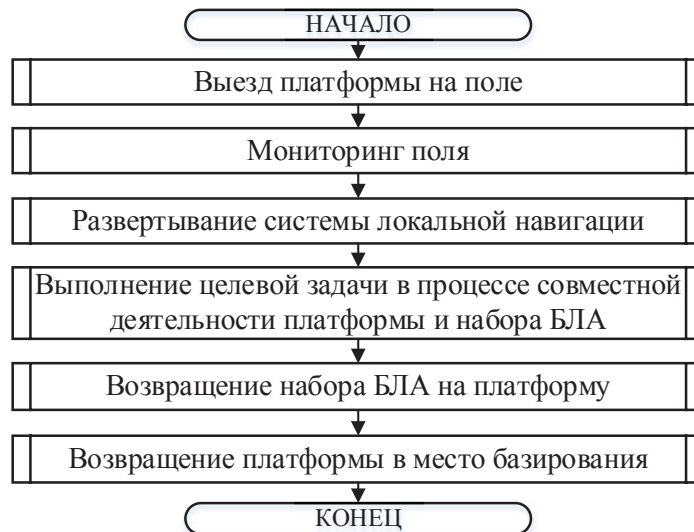


Рис. 1. Алгоритмическая модель совместной работы подвижной платформы и набора БЛА

При использовании сервисной роботизированной платформы в качестве автоматической системы обслуживания аккумуляторов БЛА следует учесть их функциональные и технические требования. На рис. 2 представлена классификация роботизированных систем сервисного обслуживания питания аккумуляторов БЛА. Системы питания аккумуляторов БЛА классифицируются по следующим признакам:

- 1) по типу базирования: наземные и надводные;
- 2) по способу навигации при посадке: системы локальной навигации, системы технического зрения и системы глобальной навигации;
- 3) по форме посадочной площадки: плоская, тороидальная, система с механическими направляющими к центру площадки, плоская;
- 4) по способу восстановления аккумулятора: системы с зарядом аккумулятора, системы с заменой аккумулятора.

В системе с зарядом аккумулятора имеются два типа контактных (например, станции заряда аккумуляторов БЛА: Rollin' Mat, Concentric circles, Honeycomb предлагается в работе [11]) и бесконтактных. В системе с заменой аккумулятора в зависимости от способа крепления аккумулятора имеются магнитные системы и механические системы, по типу размещения аккумуляторов имеются линейные и круговые магазины.

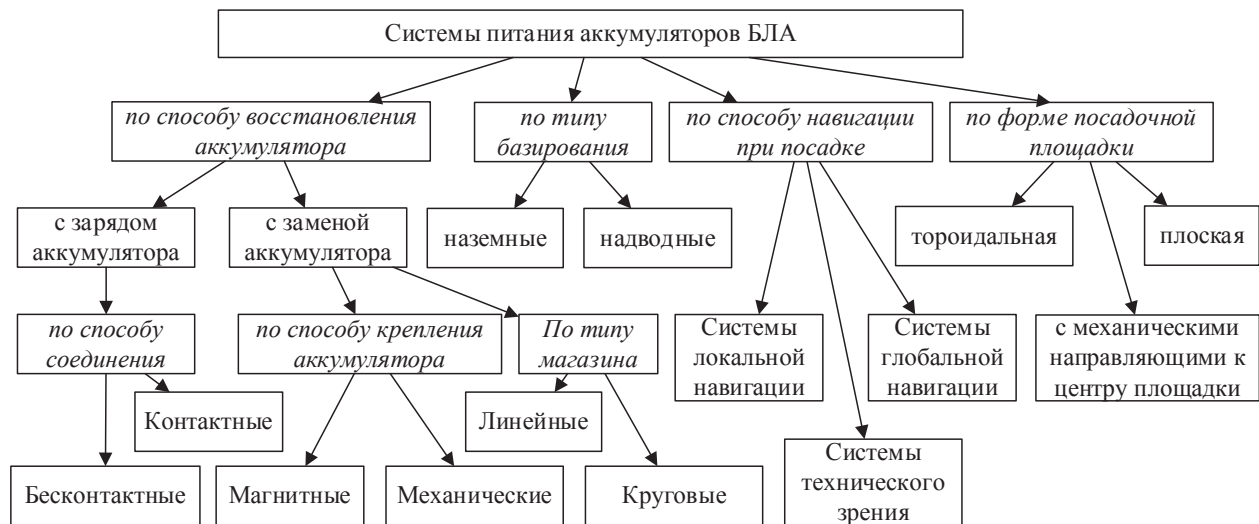


Рис. 2. Классификация роботизированных систем сервисного обслуживания питания аккумуляторов БЛА

Конструкции систем обслуживания элементов питания БЛА с зарядом аккумулятора являются более простыми и менее дорогостоящими. При этом скорость обслуживания не велика и количество одновременно заряжающихся БЛА ограничено. Системы с заменой аккумулятора имеет конструкции сложнее, но скорость обслуживания гораздо быстрее, в связи с чем увеличивается и количество прошедших зарядку БЛА. При решении задачи обработки набора БЛА также будут учтены принципы теории систем массового обслуживания [12].

В качестве тестовых сценариев совместной работы подвижной платформы и БЛА выбраны задачи аграрной робототехники:

- 1) мониторинг сельскохозяйственных угодий и построение картограмм с учетом пространственной вариативности;
- 2) уборка камней и других помех с полей с учетом картограммы засоренности;
- 3) внесение удобрений с учетом агрохимических картограмм плодородия почвы, планируемой урожайностью культуры, уровня предыдущего урожая, влагообеспеченности, особенностей рельефа полей, агрофизических свойств почвы и других факторов;
- 4) сбор плодов с учетом картограмм урожайности.

Выводы

Применение робототехнических средств в аграрной отрасли сможет решать ряд задач: создание систем точной навигации сельскохозяйственных машин; определение фактического уровня плодородия почвы; расчет доз удобрений на запланированную урожайность сельскохозяйственных культур. Беспилотные летательные аппараты сейчас используются для мониторинга угодий, составления картограмм урожайности земель и планирования зон внесения удобрений, также изучаются задачи применения БЛА для физического взаимодействия со средой и ее объектами.

Предложенная концептуальная модель решения задачи управления группой гетерогенных сельскохозяйственных роботов, а также предварительные результаты моделирования конструкции и функций подвижной роботизированной платформы, обслуживающей набор беспилотных летательных аппаратов, в дальнейшем будут использованы при разработке алгоритмических моделей отдельных этапов функционирования платформы и БЛА, а также проектных схем и конструкторских моделей подвижной платформы и ее основных отличительных узлов: контейнера для полезной нагрузки и парковочных мест для БЛА.

Литература

1. **Сидорова В.А., Жуковский Е.Е., Лекомцев П.В., Якушев В.В.** Геостатистический анализ характеристик почв и урожайности в полевом опыте по точному земледелию // *Агрехимия и плодородие почв*. 2012. № 8. С. 879–888.
2. **Афанасьев Р.А., Ермолов И.Л.** О перспективах роботизации точного земледелия // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2016. № 12. С. 828–833.
3. **Baizid K., Giglio G., Pierri F., Trujillo M.A., Antonelli G., Caccavale F., Viguria A., Chiaverini S., Ollero A.** Behavioral control of unmanned aerial vehicle manipulator Systems. *Auton. Robot.* 2017, 41. P. 1203–1220.
4. **Abaunza H., Castillo P., Victorino A., Lozano R.** Dual Quaternion Modeling and Control of a Quad-rotor Aerial Manipulator. *J. Intell. Robot. Syst.* DOI 10.1007/s10846-017-0519-4
5. **Андрейчук А.А., Яковлев К.С.** Метод разрешения конфликтов при планировании пространственных Труды конференции беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта, 2016. С. 31–40.
6. **Sanchez-Lopez J.L., Pestana J., Saripall S., Campoy P.** An Approach Toward Visual Autonomous Ship Board Landing of a VTOL UAV. *J Intell. Robot. Syst.* 2014, 74. P. 113–127.
7. **Гапонов В.С., Дашевский В.П., Бизин М.М.** Модернизация программно-аппаратного обеспечения модельных сервоприводов для использования в антропоморфных робототехнических комплексах // *Доклады ТУСУРа*. 2016. Т. 19. № 2. С. 41–50.
8. **Дашевский В.П., Бизин М.М.** Обзор возможностей бортовых вычислителей на основе SMARK-модулей для робототехнических комплексов // *Доклады ТУСУРа*. 2015. № 3 (37). С. 91–96.
9. **Ронжин А.Л., Карпов А.А., Леонтьева А.Б., Костюченко Б.Е.** Разработка многомодального информационного киоска // *Труды СПИИРАН*. 2007. № 5. С. 227–246.
10. **Якушев В.П., Петрушин А.Ф.** Получение, обработка и использование данных дистанционного зондирования для мониторинга мелиоративного состояния сельскохозяйственных полей // *Агрофизика*. 2013. № 2 (10). С. 52–58.
11. **Kemper P.F., Suzuki K.A.O., Morrison J.R.** UAV Consumable Replenishment: Design Concepts for Automated Service Stations. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2011. Vol. 61. pp. 369–397.
12. **Кирпичников А.П., Исаева Ю.Г., Якимов И.М.** Краткое описание информационной системы имитационного и аналитического моделирования систем массового обслуживания // *Труды седьмой всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2015) в 2 томах*. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН; Под общей редакцией С.Н. Васильева, Р.М. Юсупова. 2015, С. 190–197.