

# ОБЗОР РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ ЗАХВАТОВ ДЛЯ ФИЗИЧЕСКИХ МАНИПУЛЯЦИЙ С АГРАРНОЙ ПРОДУКЦИЕЙ

## OVERVIEW OF ROBOTIC GRIPPERS FOR PHYSICAL MANIPULATION WITH AGRICULTURAL PRODUCTS

Д.К. ВУ<sup>1</sup>О.Я. СОЛЕНАЯ<sup>1</sup>, К.Т.Н.А.Л. РОНЖИН<sup>1,2</sup>, Д.Т.Н.

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский институт информатики  
и автоматизации РАН, Санкт-Петербург, Россия,  
ronzhin@ias.spb.su

D.K. VU<sup>1</sup>O.YA. SOLENAYA<sup>1</sup>, PhD in EngineeringA.L. RONZHIN<sup>1,2</sup>, DSc in Engineering

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University of Aerospace  
Instrumentation, Saint Petersburg, Russia,

<sup>2</sup> The Federal State Institution of Science St. Petersburg Institute  
for Informatics and Automation of the Russian Academy  
of Sciences, Saint Petersburg, Russia, ronzhin@ias.spb.su

Представлен обзор агрозахватов, применяемых для борьбы с сорняками и сбора урожая. Актуальность исследования обоснована возможностью повышения качества свежей плодовоовощной продукции, снижения затрат на производство, сокращения дефицита рабочей силы за счет разработки и внедрения сельскохозяйственных роботов. Составлена классификация захватов, которые устанавливаются на роботизированных сельскохозяйственных средствах для манипуляций с плодами, сорняками и другими объектами. Выделено 22 типа захвата в зависимости от 6 выбранных критериев: тип привода, наличие привода в захвате, число пальцев, тип движения захвата, тип механизма, тип сенсоров. В данной классификации в основном рассмотрены характеристики захвата, который устанавливается на конце манипулятора и отвечает за физический контакт с объектом. Поэтому основное внимание уделено задачам, требующим непосредственного захвата объектов агроботом. Также упоминаются задачи направленного опрыскивания сорняков или обрезки ветвей и листьев, в которых тоже участвуют манипуляторы, но объекты воздействия не захватываются роботом. Приведены примеры существующих исследовательских сельскохозяйственных роботов, которые оснащены комбинированными захватами по предложенной классификации, относящимися к различным типам: вакуумный захват с видеокамерой для захвата томатов, шестипалый пневматический захват с видеокамерой, двухпалый захват с датчиками давления и столкновения для сбора яблока, трехпалый захват с видеокамерой для захвата цитрусовых и другие. Дальнейшая работа будет посвящена исследованию проблем физического взаимодействия агроботов с обрабатываемыми объектами, различающимися по весу, плотности, геометрии, шероховатости поверхности и другим параметрам. Также будет исследован вопрос совместного взаимодействия группы гетерогенных наземных и летательных роботов при выполнении целевой аграрной задачи в автономной миссии.

**Ключевые слова:** агрозахваты, агроботы, коллаборативная робототехника, точное земледелие, антропоморфные захваты, манипуляторы, автономные роботизированные системы.

An overview of agro-grips used to control weeds and harvesting is presented. The relevance of the study is justified by the possibility of improving the quality of fresh fruit and vegetable products, reducing production costs, decreasing the labor shortage by developing and introducing agricultural robots. The classification of the grippers, which are installed on robotic agricultural machines for manipulating fruits, weeds and other objects, is compiled. There are 22 types of grip depending on 6 selected criteria: drive type, the presence of the drive in the grip, the number of fingers, the type of grip movement, the type of mechanism, the type of sensors. In this classification, we mainly consider the characteristics of the gripper, which is installed at the end of the manipulator and is responsible for physical contact with the object. Therefore, the main attention is paid to problems requiring direct capture of objects by the agro robot. The problems of direct spraying of weeds or pruning of branches and leaves, in which manipulators also participate, but the objects of influence are not captured by the robot are mentioned. Examples of existing agricultural research robots equipped with combined grippers according to the proposed classification, referring to different types: vacuum gripper with a video camera for capturing tomatoes, six-finger pneumatic gripper with a video camera, a two-fingered gripper with pressure and collision sensors for picking up an apple, three-fingered capture with a video camera for capturing citrus fruits and others are shown. Further work will be devoted to the study of the problems of physical interaction of agro robots with processed objects, differing in weight, density, geometry, surface roughness and other parameters. The issue of joint interaction of a group of heterogeneous terrestrial and airborne robots in the performance of the target agrarian task in an autonomous mission will also be investigated.

**Keywords:** agroforestry, agrobots, collaborative robotics, precision farming, anthropomorphic grippers, manipulators, autonomous robotic systems.

## Введение

Прецизионные технологии точного земледелия, направленные на повышение урожайности культур, улучшение качества свежих и обработанных пищевых продуктов, снижение вредного воздействия на окружающую среду, разрабатываются с 1990-х годов. С учетом этих технологий продуктивность опытных сельскохозяйственных участков значительно возросла. Концепция точного земледелия включает в себя оценку пространственной изменчивости в полевых условиях различных факторов, таких как плодovitость, тип и характеристики почвы, содержание воды на поле, а также последующее управление созреванием урожая в соответствии с полученными картограммами.

С развитием науки и техники различные датчики и сенсорные системы все чаще используются в точном земледелии при решении целого ряда важных задач, таких как мониторинг угодий, обнаружение плодов, сорняков, заболеваний и т.д. Например, за последнее десятилетие были предприняты серьезные усилия по разработке технологий мониторинга и управления культурами на опытных участках растениеводства во Флориде в США. Производство цитрусовых в США серьезно пострадало от появления экзотических заболеваний, таких как цитрусовое озеленение, цитрусовый ящер и черное пятно цитрусовых. Было подсчитано, что только цитрусовое озеленение стоило около 3,63 млрд долл. США потерянных доходов [1]. Когда болезнь быстро распространяется из одной области в другую, она становится одной из самых серьезных проблем в сельском хозяйстве. При управлении заболеванием растений обнаружение является одним из наиболее важных этапов. Разведка, выполняемая вручную, является монотонной, трудоемкой и недостаточно точной задачей из-за ограничений органов чувств. Использование недорогих беспилотных летательных аппаратов с сенсорными системами – многообещающий подход, который обеспечивает возможность постоянного наблюдения за растениями с малой высотой. Среди разработанных зондирующих систем во Флориде наибольшее внимание фермеров и потенциал к внедрению получили следующие технологии: определение зеленых незрелых цитрусовых, обнаружение и очистка от мусора, картографирование урожая черники и силоса, обнаружение цитрусового озелене-

ния, поиск насекомых, выявление сброшенных плодов цитрусовых на землю.

Основными этапами сельскохозяйственного цикла являются: обработка почвы, посадка, производство и сбор урожая. Обработка относится к механической обработке почвы, которая изменяет ее структуру и прочность, чтобы обеспечить и поддерживать оптимальные почвенные условия для прорастания, роста и развития растений, тем самым демонстрируя их производственную мощность. В наружных условиях процесс посадки состоит из сброса семян или помещения их в почву. В случае интенсивных культур в процессе посадки используются автоматизированные машины, которые выполняют эту задачу. Обычно используют услуги питомников, которые посеяли семена в данном субстрате в лотках для полостей, и когда сеянцы достигают определенного состояния, их пересаживают в конечное место в теплице. Производство включает период между пересадкой или появлением первых истинных листьев и последним сбором урожая в случае однолетних культур. Оно состоит из таких задач, как опрыскивание пестицидами, обрезка (выборочное удаление частей растения), точное опрыскивание, распознавание чумы, удаление сорняков, сбор урожая и удаление урожая. Сбор урожая – это задача, которая требует больших затрат и ресурсов [2].

Появление сельскохозяйственных роботов может повысить качество свежей плодоовощной продукции, снизить затраты на производство, сократить дефицит рабочей силы и компенсировать нехватку работников в некоторых секторах сельского хозяйства. Сельскохозяйственные роботы, как правило, предназначены для выполнения «основной задачи», которая обычно представляет собой конкретную сельскохозяйственную задачу, такую как посадка, прополка, обрезка, сортировка, сбор, упаковка, транспортировка и т.д. [3]. Характер этих задач требует использования мобильных роботов в сочетании с роботами-манипуляторами с различными исполнительными органами (распылительные сопла, ирригационные капельницы, пылесосы, уборочные фрезы, всасывающие прокладки и т.д.). Исполнительные органы могут состоять из захвата или инструмента. Захваты – это подсистемы механизмов обработки, обеспечивающие временный контакт с объектом, который должен быть захвачен [4].

## Цель исследования

Целью исследования является анализ существующих робототехнических решений на более сложных и трудоемких этапах сельскохозяйственного цикла: борьба с сорняками, мониторинг заболеваний и сбор урожая, а также разработка классификации захватов, используемых для манипуляций с аграрными объектами.

## Анализ существующих робототехнических средств в области сельского хозяйства

**Борьба с сорняками и мониторинг заболеваний.** Различные абиотические и биотические стрессы влияют на потенциальный урожай сельскохозяйственных культур. В сельском хозяйстве 40 % мирового производства продуктов питания теряется из-за болезней, насекомых и сорняков. Для достижения высоких урожаев в системах производства сельскохозяйственных культур контроль биотического стресса имеет большое значение. Мониторинг заболеваний и вредителей на этапах выращивания и уборки очень важен для обеспечения производственного потенциала растений, выявления и предотвращения распространения болезни и предотвращения значительных потерь урожая. Борьба с вредителями, болезнями и сорняками – это регулярно выполняемая и трудоемкая задача, которая иногда подвергает человека-оператора опасности заражения опасными химикатами. Разработка систем борьбы с сорняками, включая обнаружение и удаление сорняков, являлась одной из основных областей исследований в сельскохозяйственной робототехнике за последние несколько десятилетий. На сегодняшний день некоторые полностью автономные роботизированные системы (АРС) удаления сорняков протестированы в полевых условиях. Основные этапы борьбы с сорняками включают: обнаружение и идентификацию сорняков, наведение манипулятора, точное внутрирядное удаление сорняков и картографирование. Для выборочного контроля внутрирядных сорняков применяются четыре типа механизмов их удаления: механические, термические, химические и электрические средства [5].

Знание точного положения сельскохозяйственных культур является необходимым условием эффективного механического удаления сорняков при применении роботизированных средств прополки, например, в таких культу-

рах, как сахарная свекла, которая чувствительна к механическим воздействиям. В работе [6] исследован потенциал использования знаний о влиянии регулярности посева семян на качество сенсорных систем. Семена зерновых культур, таких как ячмень и пшеница, помещаются рядами без четкой структуры внутри, в то время, как кукуруза, сахарная свекла и другие высокоценные культуры помещаются рядами с четко определенным межкорневым интервалом между растениями. При применении роботизированных средств прополки распознавание растений основано на машинном зрении, анализе спектральных свойств или морфологии, формы поверхностей. Классификация растений является сложной задачей, на которую влияет вариативность внешнего вида растений. Результаты предыдущих исследований доказали, что априорная информация о расположении растений может использоваться для распознавания посевных культур. Экспериментальная модель оценки контекстно-зависимого распознавания урожая была основана на моделировании положения культур и сорняков в искусственном поле. Список всех позиций использовался в качестве входных данных для основанного на анализе контекста устройства распознавания культур. Результаты испытаний показали, что надежность обнаружения позиционированных растений по известной геометрии посева зависит от плотности сорняков и погрешности посадки растений в соответствии с неравенством:

$$PPV \leq (1 + 2\pi\rho\sigma_x\sigma_y)^{-1},$$

где  $\rho$  – плотность сорняков;  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  – неопределенность положения модели растениеводства.

В экологически чистом производстве культур запрещается использование обычных пестицидов, что увеличивает заинтересованность большинства ферм в системах механической уборки сорняков. Сельскохозяйственные работники, которые выполняют ручную прополку, подвергаются риску устройства опорно-двигательного аппарата, особенно при продолжительных сгибаниях. Ручная прополка, например, листьев салата составляет примерно 95 % от общих затрат на борьбу с сорняками. В настоящее время реализованы некоторые коммерческие машины для внутрирядной прополки, такие как травочиститель в виде механических пальцев, торсионный травочиститель, травочиститель в

виде воздуходувки, травочиститель с использованием огня и передовые интеллектуальные системы. Коллаборативные роботизированные системы, работающие совместно с людьми, с использованием автоматизированных механических, электронных и компьютерных технологий, позволяют выбирать степень автономности, производя большую часть монотонной физически тяжелой работы в автоматическом режиме и привлекая ручной труд в случае принятия решений и выполнения операций в сложном контексте. В работе [7] представлены разработка и экспериментальная оценка в полевых условиях автоматической внутрирядной коллаборативной роботизированной системы для прополки на основе мотыги с применением пневматического привода и технологий локализации на основе одометрических датчиков. Вместо систем машинного зрения или глобальной навигации человек-оператор визуально производит обнаружение урожая. Для снижения физических нагрузок и риска скелетно-мышечного расстройства оператор ездит в сидячем положении на платформе робота-культиватора, оснащенной парой мелких мотыг (~7 см в ширину, формой треугольника) для борьбы с сорняками во внутрирядной зоне, и стандартным культиватором для работы в междурядной зоне. Получены следующие результаты испытаний коллаборативного робота на поле томатов: средняя скорость движения составляет 1,2 км/ч, время на обработку сорняков в внутрирядной зоне снизилось на 57,5 % по сравнению с ручной обработкой. Из расчета стоимости затрат производства брокколи в 2012 году средняя стоимость ручного труда в сельском хозяйстве оценивалась в размере 12,33 долл. США. Расчетная экономия затрат на борьбу с сорняками с применением коллаборативного робота составляет 170,15 долл. США на гектар поля.

В последние десятилетия значительно улучшились исследования технологий обнаружения сорняков, интеграции данных с гетерогенных датчиков и селективного управления посевами с помощью гербицидов или других методов лечения. Особо следует отметить улучшение навигационных возможностей беспилотных транспортных средств и сельскохозяйственного инвентаря путем объединения информации с датчиков глобальной навигационной спутниковой системы и с локальных измерительных устройств. Тем не менее, многие из этих иссле-

дований были сосредоточены исключительно на специализированных задачах, в которых изучались, тестировались и оценивались только отдельные компоненты робототехнических систем в узком контексте. Идея использования коллективов гетерогенных роботизированных систем для сельскохозяйственных приложений начали обсуждаться несколько лет назад, но первые реальные попытки их применения были осуществлены только недавно [8].

В испытаниях по полевой устойчивости картофеля к фитофторозу оценка тяжести заболевания проведена путем визуальных осмотров степени поражения листьев. Однако визуальная оценка, как правило, – трудоемкая задача, а результаты достаточно субъективны. В работе [9] предлагается использовать новый метод оценки степени поражений растений в поле, используя видеосъемку и анализ изображений, полученных с беспилотного летательного аппарата (БЛА). Фитофтороз картофеля является одним из самых серьезных заболеваний, влияющих на производство картофеля в Японии. Болезнь быстро разрушает листья и, следовательно, приводит к снижению урожайности и ухудшению качества клубней. Результаты исследований, проведенные на основе анализа изображений с БЛА, подтвердили возможность высокопроизводительной оценки тяжести заболевания по фенотипическим данным о полевых растениях. При мониторинге поля БЛА широко применяются для аэрофотосъемки за счет низкой себестоимости, высокого разрешения изображений по сравнению со спутниковыми, благодаря низкой высоте полета, возможности перемещаться в любом направлении, зависать, поддерживать стабильное положение в полете и т.д. В работе [9] изображения картофельного поля снимались с БЛА (HiSystems GmbH Mikrokopter, Германия) с четырьмя противоположащими вращающимися пропеллерами и восемью бесколлекторными двигателями. Испытательное поле состояло из 36 рядов, расположенных вдоль длинной стороны поля в области размерами 53,8 x 27,0 м, а пространство между рядами составляло 0,75 м. Площадь 42,2 x 22,5 м, расположенная в центре поля, была разделена на 360 экспериментальных участков. Поэтапная обработка изображений включала геометрическую коррекцию изображения, параметрическую обработку, пороговую оценку тяжести заболевания с использованием разработанного алгоритма.



Результаты испытаний в 2012 году показали: расчетная среднеквадратическая ошибка тяжести заболевания на основе обработки изображений составила 14,7 %, точность определения – 0,77 %. В 2013 году результаты остались примерно на том же уровне – соответственно, 17,1 и 0,73 %, что подтверждает перспективность применения метода обработки изображений, полученных с БЛА, для оценки заболеваний растений и устойчивости к фитофторозу.

В работе [10] проанализирована интеллектуальная система нанесения гербицидов на основе распылителя с прямым впрыском, используемым для точного уничтожения сорняков. Реализованный роботизированный опрыскиватель состоит из системы точного распыления и автоматического наземного транспорта. Основным преимуществом системы интеллектуального управления нанесением гербицидов является использование технологии машинного зрения в режиме реального времени, обнаруживающей сорняки, или применение точных карт заражения полей сорняками, полученных с камеры, установленной на БЛА. В результате интеллектуальная система управления позволяет селективно применять гербициды после всходов только к нежелательному растительному материалу. Основными элементами системы точного распыления являются 12 высокоскоростных электромагнитных клапанов, система прямого впрыска, емкость с водой на 200 л и контейнер для гербицида на 15 л. Трактор CNHi Boomer-3050 был использован в качестве автоматического наземного транспорта, оснащен различными сенсорными системами, включая видеокамеры и лазерный детектор препятствий, глобальной системой позиционирования в реальном времени для точной локализации, а также набором специализированных усилителей и исполнительных механизмов для автоматизации трактора. Система управления выполняет следующие функции:

- 1) интерпретация информации, поступающей от базовой станции;
- 2) оценка надежности датчиков и исполнительных механизмов;
- 3) генерация плана действий, который должен быть выполнен исполнительной системой (в данном случае системой интеллектуального распыления);
- 4) общение с внешними пользователями (кто может взять контроль и другие устройства);
- 5) контроль за исполнением общей миссии.

Предварительно тестирование системы проводилось на твердой, вымощенной поверхности с тремя имитированными пятнами сорняков, ограниченными прямыми линиями, которые были нарисованы на тротуаре. При использовании результатов испытаний для оценки эффективности удаления сорняков на поле озимой пшеницы (со средним покрытием сорняков от 0 до 66 %, площадью 10 000 м<sup>2</sup>) расчетная необработанная площадь сорняков составила приблизительно 0,5 %. То есть система распыления обеспечила бы обработку приблизительно 99,5 % зараженной сорняками площади, с экономией гербицида на 76,9 % меньше, чем обычная система с равномерным распылением. Тестирование, проведенное на реальном пшеничном поле, показало, что транспортное средство полностью соответствовало определенным маршрутам с максимальным отклонением до 7 см. При этом было обработано более 95 % площади пятен с сорняками.

В работе [11] проведено исследование по точному и дозированному применению пестицидов в необходимых зонах с помощью модульного сельскохозяйственного робота, разработанного в рамках проекта Европейского союза CROPS, на виноградных лозах. Цель проекта – сокращение использования пестицидов – была достигнута с помощью комбинированных подходов, включая выбор устойчивых сортов, методов управления посевами, методов мониторинга культур, применение биоцидов и полезных организмов, а также регулярное техническое обслуживание и оптимальную установку оборудования для распыления. В отличие от наиболее распространенного подхода по роботизации сельского хозяйства на основе адаптации немодульных, тяжелых стандартных промышленных манипуляторов к обработке конкретных видов продукции и операционным задачам, в проекте CROPS исследована возможность автоматического обнаружения симптомов мучнистой росы, крупной грибковой болезни виноградной лозы и выборочного напыления пораженных участков с помощью модульного робота, оснащенного прецизионным опрыскивателем. Роботизированная система, используемая для экспериментов, включает: манипулятор CROPS с 6-степенями свободы; точный опрыскивающий механизм и контейнер с жидкими пестицидами; систему обнаружения болезни; электронно-коммуника-

ционные средства. Опрыскивающий механизм создает спрей из жидких пестицидов и воздушного потока для нанесения на целевые участки с размером приблизительно 100–200 мм. Система обнаружения болезней основана на мультиспектральной визуализации виноградной лозы при диффузной подсветке. Роботизированная система была протестирована на четырех различных препаратах для обработки виноградной лозы с различным уровнем симптомов заболевания мучнистой росой и плотностью ее распространения в листе. Результаты показали, что робот CROPS смог вылечить от 85 до 100 % пораженных областей; ограничить здоровую зону непреднамеренно распыленными пестицидами от 5 до 20 % от общей площади; уменьшить количество пестицидов на 65–85 % (в зависимости от уровня пораженности и их пространственного распределения) по сравнению с обычным равномерным распылением.

**Сбор урожая.** В настоящее время ручной труд по сбору плодов составляет более 50 % от общих производственных издержек и около 71 % – от общего объема человеческого труда, необходимого для сельскохозяйственного производства. С ростом конкуренции возможность снижения себестоимости производства за счет механизации уборки урожая становится все более актуальной. Вариативность физических и геометрических характеристик плодов и способов их сбора не позволяет создать универсальные роботизированные системы, поэтому на текущий момент ведутся исследования по проектированию механизмов обработки плодов отдельных культур. Например, черешня/вишня характеризуется множеством мелких плодов, расположенных близко вокруг ствола дерева, поэтому сбор урожая с использованием механических шейкеров может быть более практичным, чем роботизированная система, собирающая отдельные плоды. Одним из преимуществ метода механического встряхивания является то, что не все фрукты нуждаются в обнаружении, если определены их концентрированные области в ветвях. Для автоматической уборки вишни с использованием механических шейкеров система машинного зрения должна обнаруживать и локализовать фрукты, а также ветви. В работе [12] приведена система машинного зрения для обнаружения ветвей вишневого дерева с полной листвой даже в случае, когда были видны только пре-

рывистые сегменты ветвей. Конкретными задачами в этой работе являлись:

1) попиксельное сегментирование областей ветвей на изображениях купола вишневого дерева, снятых на фоне листьев и плодов, в том числе других деревьев, растущих в саду;

2) обнаружение отдельных ветвей с использованием сегментированных областей ветвей, определение их местоположения и ориентации в 2D-изображениях и оценка точности обнаружения.

Метод обнаружения ветвей вишневого дерева включал в себя 4 основных этапа: сбор изображений, предварительную обработку изображений, попиксельную классификацию изображений и обнаружение отдельных ветвей. Байесовский классификатор использовался для распознавания пикселей изображения по четырем классам: ветви, плоды, листья и фон. Алгоритм показал 89,6 % точности при идентификации пикселей ветвей. Морфологические свойства сегментированных участков ветвей использовались для фильтрации шумов, а также для группировки сегментов одной и той же ветви в заданной области. Затем был использован метод восстановления скрытых участков ветвей через обнаруженные сегменты. Общая точность обнаружения отдельных ветвей составила 89,2 %.

В работе [13] рассматривается метод обнаружения томатов на основе изображений, полученных с БЛА при дистанционном зондировании. Плоды томатов растут группами и, как правило, частично скрыты их листьями и стеблями. На этапе сбора изображений использовался квадрокоптер с массой 2,1 кг и полезной нагрузкой до 0,1 кг. На основе спектрально-пространственной сегментации и классификации производился поиск томатов на общем фоне изображений, полученных с разных высот с различными разрешениями – 293 x 415 пикселей и 1080 x 1920 пикселей с точностью до 92 %.

Сбор фруктов является одной из самых сложных сельскохозяйственных задач для автономных робототехнических систем. Эта задача состоит из нескольких различных стадий и характеризуется: физическим контактом манипулятора и плода с высокой точностью места и ориентации захвата; принятием решений в реальном времени; отрывом плодов от растения без повреждения; необходимостью временного хранения плодов в безопасных условиях. Необ-

ходимость использования роботизированных уборочных машин связана с недостатком рабочей силы в сельском хозяйстве и жесткой конкуренцией, требующей снижения стоимости производства. Например, затраты на уборку цитрусовых плодов в США в настоящее время превышают себестоимость самой продукции и стоимость уборки плодов в Бразилии в четыре раза. Согласно экономическим исследованиям, затраты на уборку должны быть уменьшены на 50 % для поддержания глобальной конкурентоспособности [14].

В работе [15] разработана система управления и оценки эффективности роботизированной системы уборки плодов. Разработан совместный визуальный сервоконтроллер для регулирования конечного эффектора робота до целевого местоположения плода. Представлен анализ устойчивости манипулятора на основе критерия Ляпунова для обеспечения глобальной устойчивости замкнутой системы сервоприводов. Роботизированная система включает в себя манипулятор, неподвижную камеру и камеру в захвате, установленную на конце захвата манипулятора. Неподвижная камера обеспечивает общий вид дерева, в то время как камера в захвате, благодаря близости к плоду, обеспечивает съемку изображения с высоким разрешением фрукта. Для повышения скорости и точности использован кинематически избыточный манипулятор с семью электромоторами. Для того чтобы управлять захватом робота в процессе сбора плодов, разработаны контроллер вращения для ориентации манипулятора и контроллер перемещения захвата в точку физического контакта с плодом. При оценке производительности манипулятора получено, что ошибки оценки глубины на изображении зависят от расстояния между плодом и подвижной камерой. При расстоянии от подвижной камеры до кроны дерева более 450 мм обнаруживается небольшая погрешность (<2 %). В целом при тестировании ошибка управления манипулятором была меньше, чем радиус плода. Система позиционирования манипулятора показала точность в размере около 15 мм в трехмерной системе координат, что подходит для сбора урожая больших сортов цитрусовых фруктов.

Планирование движения робота на поле является одной из важных и не до конца решенных задач при автономном сборе урожая. В работе [16] проведен анализ этой проблемы с учетом

специфики производства сладкого перца. Чтобы достичь плода в среде с препятствиями, роботизированная система сборки фруктов должна осуществлять движение без столкновений, в том числе, манипулятора и конечного захвата. Разработанный робот состоял из наземной платформы, манипулятора с 9 степенями свободы, конечного захвата на основе вакуумной присоски и ножа, отрезающего участок стебля, соединяющего плод и ветвь растения. Тестирование робота-уборщика перца производилось в теплице с заранее известным числом плодов и местом посадки растения. Во время предварительных испытаний в теплице было установлено, что можно успешно отсоединить плод, если для захвата правильно выбрать угол азимута, тогда как угол наклона захвата и плода не оказывают существенного влияния. Также было экспериментально подтверждено, что на эффективность функционирования робота-уборщика перца положительно влияют увеличение междурядного расстояния и уменьшение размеров захвата.

### **Классификация захватов для роботизированных агроманипуляторов**

По результатам проведенного анализа публикаций последних лет была составлена классификация захватов (рис. 1), которые применяются на роботизированных сельскохозяйственных средствах для манипуляций с плодами, сорняками и другими объектами.

Дальность действия, точность, скорость и другие характеристики захвата также зависят от параметров применяемого манипулятора. В данной классификации в основном рассмотрены характеристики захвата, который устанавливается на конце манипулятора и отвечает за физический контакт с объектом. Также следует заметить, что на рисунке показаны задачи, требующие непосредственного захвата объектов агророботом, поэтому задачи направленного опрыскивания сорняков или обрезки ветвей и листьев, в которых тоже участвуют манипуляторы (но объекты воздействия чаще всего не захватываются потом), также актуальны, но отражены здесь не в полной мере. Кроме того, существуют примеры, когда после обрезки объекты падают в трубный канал и доставляются в контейнер на роботизированную платформу. Например, в работе [15] манипулятор оснащен ножом и трубным каналом, в который

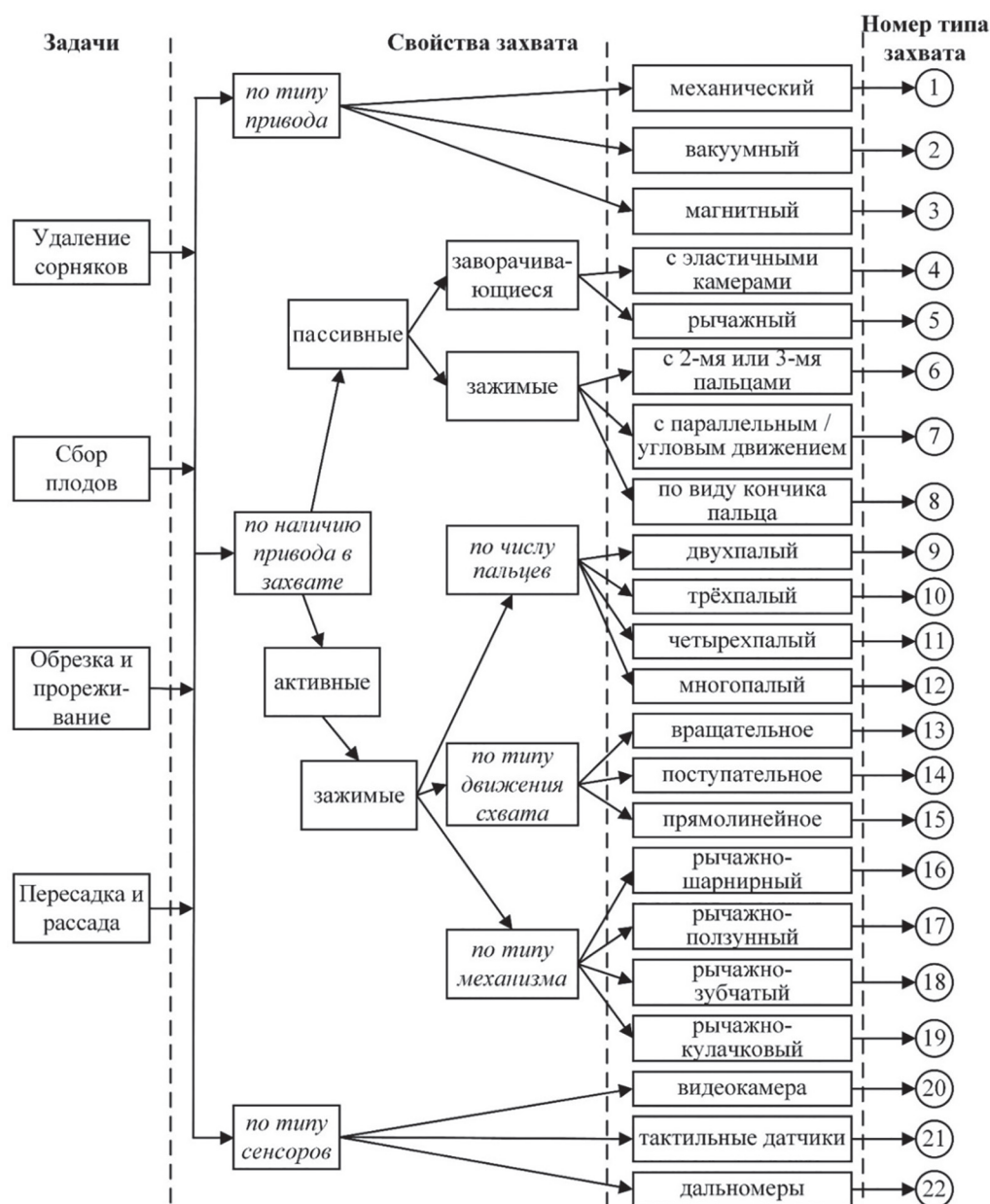


Рис. 1. Классификация агрозахватов

попадают отрезанные плоды сладкого перца под силой своей тяжести.

В правой части рис. 1 выделены 22 типа захвата в зависимости от 6 выбранных критериев: тип привода, наличие привода в захвате, число пальцев, тип движения захвата, тип механизма, тип сенсоров. На рис. 2 приведены примеры существующих исследовательских сельскохозяйственных роботов, оснащенных комбинированными захватами по предложенной классификации, которые относятся к различным типам.

## Выводы

1. Выполнение монотонных физически тяжелых операций в сельскохозяйственном про-

изводстве ведет к риску расстройства опорно-двигательного аппарата работников, а в некоторых случаях – заражению химическими препаратами. Поэтому применение роботизированных средств для физического контакта и манипуляций с объектами в сельскохозяйственном производстве является актуальной задачей, обеспечивающей снижение себестоимости продукции и повышение качества выполняемых операций.

2. Операции по удалению сорняков, обрезке ветвей, сбору плодов требуют точного трехмерного определения положения всех объектов, участвующих во взаимодействии. Задача осложняется тем, что анализ изображений





**Рис. 2. Примеры захватов, используемых в сельском хозяйстве**

производится на сложном фоне с присутствием аналогичных (сад деревьев, ряд растений) и перекрывающихся объектов (листья, ветви, плоды) [22–23]. Для составления картограмм почвы и урожая, необходимых для работы наземных роботизированных средств, в настоящее время уже активно используются беспилотные летательные аппараты [24, 25].

3. Вариативность физических и геометрических характеристик плодов и способов их сбора не позволяет создать универсальные роботизированные системы, поэтому на текущий момент ведутся исследования по проектированию механизмов обработки плодов отдельных культур. В предложенной классификации приведены основные типы захватов, применяемых для сбора фруктов и овощей.

4. Дальнейшая работа будет посвящена исследованию проблем физического взаимодействия агроботов с обрабатываемыми объектами, различающимися по весу, плотности, геометрии, шероховатости поверхности и другим параметрам. При разработке захвата и конструкции манипулятора будет использован накопленный ранее опыт разработки программно-аппаратного обеспечения антропоморфных роботов [26–28]. Также будет исследован вопрос совместного взаимодействия группы гетерогенных наземных и летательных роботов при выполнении целевой аграрной задачи в автономной миссии [29].

## Литература

1. Lee W.S., Ehsani R. Sensing systems for precision agriculture in Florida // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2015. Vol. 112. P. 2–9. DOI: 10.1016/j.compag.2014.11.005.
2. Rodriguez F., Moreno J.C., Sanchez J.A., Berenguel M. Grasping in Agriculture: State-of-the-Art and Main Characteristics // *Grasping in Robotics*. Springer. P. 385–409. DOI: 10.1007/978-1-4471-4664-3\_15.
3. Bechar A. Robotics in horticultural field production // *Stewart Postharvest Review*. 2010. Vol. 6 (3). P. 1–11. DOI: 10.2212/spr.2010.3.11.
4. Monkman G.J., Hesse S., Steinmann R., Schunk H. Robot grippers. Wiley-VCH, Weinheim. 2007, 463 p.
5. Bechar A., Vigneault C. Agricultural robots for field operations. Part 2: Operations and systems // *Bio-system engineering*. 2017. Vol. 153. P. 110–128. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2016.11.004.
6. Midtiby H.S., Astrand B. Upper limit for context based crop classification in robotic weeding applications // *Biosystems engineering*. 2016. Vol. 146. P. 183–192. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2016.01.012.
7. Perez-Ruiz M., Slaughter D.C. Co-robotic intra-row weed control system // *Biosystems engineering*. 2014. Vol. 126. P. 45–55. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2014.07.009.
8. RHEA Project: A robot fleet for highly effective agriculture and forestry management. <http://www.rhea-project.eu>. (Дата обращения 01.09.2017).
9. Sugiura R., Tsuda S. Field phenotyping system for the assessment of potato late blight resistance using RGB imagery from an unmanned aerial vehicle // *Biosystems engineering*. 2016, Vol. 148. P. 1–10. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2016.04.010.
10. Gonzalez-de-Soto M., Emmi L. Autonomous systems for precise spraying- Evaluation of a robotised patch sprayer // *Biosystems engineering*. 2016. Vol. 146. P. 165–182. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2015.12.018.
11. Oberti R., Marchi M. Selective spraying of grapevines for disease control using a modular agricultural robot // *Biosystems engineering*. 2016. Vol. 146. P. 203–215. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2015.12.004.
12. Amatya S., Karkee M. Detection of cherry tree branches with full foliage in planar architecture for automated sweet-cherry harvesting // *Biosystems engineering*. 2016. Vol. 146. P. 3–15. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2015.10.003.
13. Senthilnath J., Dokania A. Detection of tomatoes using spectral-spatial methods in remotely sensed

- RGB images captured by UAV // *Biosystems engineering*. 2016. Vol. 146. P. 16–32. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2015.12.003.
14. Brown G.K. New mechanical harvesters for the Florida citrus juice industry // *HortTechnology*. 2005. Vol. 15. Issue 1. P. 69–72.
  15. Bac C. W., Roorda T. Analysis of a motion planning problem for sweet pepper harvesting in a dense obstacle environment // *Biosystems engineering*. 2016. Vol. 146. P. 86–97. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2015.07.004.
  16. Mehta S.S., MacKunis, W., Burks T.F. Robust visual servo control in the presence of fruit motion for robotic citrus harvesting // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2016. Vol. 123. P. 362–375. DOI: 10.1016/j.compag.2016.03.007
  17. Feng Q., Wang X., Wang G., Li Z. Design and test of tomatoes harvesting robot // *IEEE International Conference on Information and Automation*. Lijiang, 2015, P. 949–952.
  18. Hayashi S., Ganno K., Ishii Y., Tanaka K. Robotic harvesting system for eggplants // *Japan Agricultural Research Quarterly*. 2002. Vol. 36 (3). P. 163–168.
  19. De-An Z., Jidong L., Wei J., Ying Z., Yu C. Design and control of an apple harvesting robot // *Biosystems engineering*. 2011. Vol. 110. P. 112–122. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2011.07.005
  20. Kompano P. Deleaf-Line robot for deleafing of tomato crops. Режим доступа: <https://www.priva.com/discover-priva/news-and-stories/priva-kompano-deleaf-line>. (Дата обращения 01.09.2017).
  21. Foglia M.M., Reina G. Agricultural robot for radichio harvesting // *Journal of Field Robotics*. 2006. Vol. 23 (6/7). P. 363–377. DOI: 10.1002/rob.20131.
  22. Башилов А.М., Королев В.А. Техническое зрение в роботизированных технологиях аграрного производства // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2016. № 6. С. 2.
  23. Сычев В.Г., Афанасьев Р.А., Ермолов И.Л., Кладко С.Г., Ворончихин В.В. диагностика азотного питания растений с использованием беспилотных летательных аппаратов // *Плодородие*. 2017. № 5. С. 2–4.
  24. Башилов А.М., Королев В.А., Можасев К.Ю. Перспективы использования дронов в реализациях новейших агротехнологий // *Вестник ВИЭСХ*. 2016. № 4 (25). С. 68–75.
  25. Краусп В.Р., Королев В.А. Электророботизированные агрегаты полеводства // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2016. № 6 (21). С. 122–130.
  26. Кодяков А.С., Павлюк Н.А., Будков В.Ю., Исследование устойчивости конструкции антропоморфного робота Антарес при воздействии внешней нагрузки // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2017. Т. 18. № 5. С. 321–327. DOI: 10.17587/mau.18.321-327.
  27. Павлюк Н.А., Будков В.Ю., Бизин М.М., Ронжин А.Л. Разработка конструкции узла ноги антропоморфного робота Антарес на основе двухмоторного колена // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2016. № 1 (174). С. 227–239.
  28. Мотиенко А.И., Тарасов А.Г., Дорожко И.В., Басов О.О. Проактивное управление робототехническими системами спасения пострадавших // *Труды СПИИРАН*. 2016. Вып. 46. С. 174–195. DOI: 10.15622/sp.46.12.
  29. Нго К.Т., Солсая О.Я., Ронжин А.Л. Анализ подвижных роботизированных платформ для обслуживания аккумуляторов беспилотных летательных аппаратов // *Труды МАИ*. 2017. № 95. Режим доступа: <http://trudymai.ru/published.php?ID=84444> (дата обращения 01.09.2017).

## References

1. Lee W.S., Ehsani R. Sensing systems for precision agriculture in Florida // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2015. Vol. 112. P. 2–9. DOI: 10.1016/j.compag.2014.11.005.
2. Rodriguez F., Moreno J.C., Sanchez J.A., Berenguel M. Grasping in Agriculture: State-of-the-Art and Main Characteristics // *Grasping in Robotics*. Springer. P. 385–409. DOI: 10.1007/978-1-4471-4664-3\_15.
3. Bechar A. Robotics in horticultural field production // *Stewart Postharvest Review*. 2010. Vol. 6 (3). P. 1–11. DOI: 10.2212/spr.2010.3.11.
4. Monkman G.J., Hesse S., Steinmann R., Schunk H. Robot grippers. Wiley-VCH, Weinheim. 2007, 463 p.
5. Bechar A., Vigneault C. Agricultural robots for field operations. Part 2: Operations and systems // *Biosystem engineering*. 2017. Vol. 153. P. 110–128. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2016.11.004.
6. Midtiby H.S., Astrand B. Upper limit for context based crop classification in robotic weeding applications // *Biosystems engineering*. 2016. Vol. 146. P. 183–192. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2016.01.012.
7. Perez-Ruiz M., Slaughter D.C. Co-robotic intra-row weed control system // *Biosystems engineering*. 2014. Vol. 126. P. 45–55. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2014.07.009.
8. RHEA Project: A robot fleet for highly effective agriculture and forestry management. URL: <http://www.rhea-project.eu>. (accessed 01.09.2017).
9. Sugiura R., Tsuda S. Field phenotyping system for the assessment of potato late blight resistance using

- RGB imagery from an unmanned aerial vehicle // *Biosystems engineering*. 2016, Vol. 148. P. 1–10. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2016.04.010.
10. Gonzalez-de-Soto M., Emmi L. Autonomous systems for precise spraying- Evaluation of a robotised patch sprayer // *Biosystems engineering*. 2016. Vol. 146. P. 165–182. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2015.12.018.
  11. Oberti R., Marchi M. Selective spraying of grapevines for disease control using a modular agricultural robot // *Biosystems engineering*. 2016. Vol. 146. P. 203–215. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2015.12.004.
  12. Amatya S., Karkee M. Detection of cherry tree branches with full foliage in planar architecture for automated sweet-cherry harvesting // *Biosystems engineering*. 2016. Vol. 146. P. 3–15. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2015.10.003.
  13. Senthilnath J., Dokania A. Detection of tomatoes using spectral-spatial methods in remotely sensed RGB images captured by UAV // *Biosystems engineering*. 2016. Vol. 146. P. 16–32. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2015.12.003.
  14. Brown G.K. New mechanical harvesters for the Florida citrus juice industry // *HortTechnology*. 2005. Vol. 15. Issue 1. P. 69–72.
  15. Bac C. W., Roorda T. Analysis of a motion planning problem for sweet pepper harvesting in a dense obstacle environment // *Biosystems engineering*. 2016. Vol. 146. P. 86–97. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2015.07.004.
  16. Mehta S.S., MacKunis, W., Burks T.F. Robust visual servo control in the presence of fruit motion for robotic citrus harvesting // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2016. Vol. 123. P. 362–375. DOI: 10.1016/j.compag.2016.03.007
  17. Feng Q., Wang X., Wang G., Li Z. Design and test of tomatoes harvesting robot // *IEEE International Conference on Information and Automation*. Lijiang, 2015. P. 949–952.
  18. Hayashi S., Ganno K., Ishii Y., Tanaka K. Robotic harvesting system for eggplants // *Japan Agricultural Research Quarterly*. 2002. Vol. 36(3). P. 163–168.
  19. De-An Z., Jidong L., Wei J., Ying Z., Yu C. Design and control of an apple harvesting robot // *Biosystems engineering*. 2011. Vol. 110. P. 112–122. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2011.07.005
  20. Kompano P. Deleaf-Line robot for deleafing of tomato crops. URL: <https://www.priva.com/discover-priva/news-and-stories/priva-kompano-de-leaf-line>. (accessed 01.09.2017).
  21. Foglia M.M., Reina G. Agricultural robot for radichio harvesting // *Journal of Field Robotics*. 2006. Vol. 23 (6/7). P. 363–377. DOI: 10.1002/rob.20131.
  22. Bashilov A.M., Korolev V.A. Machine vision in robotics technologies of agricultural production. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva*. 2016. No 6, pp. 2 (in Russ.).
  23. Sychev V.G., Afanas'ev R.A., Ermolov I.L., Kladko S.G., Voronchikhin V.V. Diagnostics of nitrogen nutrition of plants using unmanned aerial vehicles. *Plodorodie*. 2017. No 5, pp. 2–4 (in Russ.).
  24. Bashilov A.M., Korolev V.A., Mozhaev K.Yu. Prospects for the use of drones in the implementation of the newest agrotechnologies. *Vestnik VIESKh*. 2016. No 4(25), pp. 68–75 (in Russ.).
  25. Krausp V.R., Korolev V.A. Electro-robotic aggregates of field crop cultivation. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*. 2016. No 6 (21), pp. 122–130 (in Russ.).
  26. Kodyakov A.S., Pavlyuk N.A., Budkov V.Yu. Investigation of the stability of the construction of anthropomorphic robot Antares under the influence of an external load. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2017. Vol. 18. No 5, pp. 321–327 (in Russ.). DOI: 10.17587/mau.18.321-327.
  27. Pavlyuk N.A., Budkov V.Yu., Bizin M.M., Ronzhin A.L. Development of the construction of the foot assembly of the anthropomorphic robot Antares based on the twin-motor knee. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*. 2016. No 1(174), pp. 227–239 (in Russ.).
  28. Motienko A.I., Tarasov A.G., Dorozhko I.V., Basov O.O. Proactive control of robotic rescue systems for victims. *Trudy SPIIRAN*. 2016. Vyp. 46, pp. 174–195 (in Russ.). DOI: 10.15622/sp.46.12.
  29. Ngo K.T., Solenaya O.Ya., Ronzhin A.L. Analysis of mobile robotic platforms for maintenance of unmanned aerial vehicle batteries. *Trudy MAI*. 2017. No 95 (in Russ.). URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=84444> (accessed 01.09.2017).