

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Волошкина Артёма Александровича
на тему «Методы проектирования и оптимизации автономной
робототехнической системы для сбора фруктов», представленной на
соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности
2.5.4. - Роботы, мехатроника и робототехнические системы.

Актуальность темы исследования

В современных условиях автоматизация сельскохозяйственных процессов становится важным фактором повышения эффективности и устойчивого развития АПК. Особое внимание уделяется внедрению роботизированных технологий, особенно при трудоёмких операциях, таких как сбор фруктов. На данный момент проведено множество исследований, подтверждающих перспективность использования автономных робототехнических систем (РТС) в этой области.

Такие системы позволяют повысить производительность, снизить зависимость от сезонной рабочей силы и минимизировать повреждение плодов. Основной проблемой, препятствующей широкому внедрению, остаётся недостаточный уровень развития технологий, что позволяет пока разрабатывать многочисленные экспериментальные образцы, но не приводит к созданию достаточно эффективного, универсального и экономически целесообразного решения.

Большинство известных разработок представляют собой лабораторные установки, которые решают только отдельные задачи, не предлагая комплексного решения по транспортировке и складированию урожая. Многие решения являются слишком сложными и медленными для того, чтобы быть экономически эффективными. А наиболее близкие к практическому использованию системы ориентированы на массовый сбор фруктов для дальнейшей переработки, что не требует сохранять фрукты неповреждёнными. Таким образом, исследования, направленные на создание новых моделей и методов проектирования, оптимизации и управления РТС для сбора фруктов, являются актуальными.

Работа Волошкина А.А., направленная на комплексное решение этих проблем соответствует существующему мировому научно-техническому уровню, является своевременной и актуальной.

Представленная работа была выполнена на базе научной лаборатории мехатроники и робототехники НИИ робототехники и систем управления с использованием высокотехнологичного оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова при финансовой поддержке Государственного задания Минобрнауки РФ, проект № FZWN-2020-0017, что также подтверждает её актуальность.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных соискателем в диссертационной работе, обеспечивается применением методов и подходов в области механики машин и роботов, математического и имитационного моделирования, оптимизации и проектирования, а также методов планирования экспериментальных исследований и обработки их результатов с учетом специфики автоматизации процесса сбора фруктов. Эти выводы подтверждаются обширным объемом экспериментальных данных и численного моделирования, проведенных с использованием современных методик и программных средств, а также реализацией прикладных программных модулей на языке программирования C++.

Научная новизна исследований

В качестве научных результатов диссертации выдвинуты следующие положения:

- предложена модульная структура робототехнической системы для сбора фруктов, выполненная на базе мобильной колёсной платформы и робота-трипода, в котором для исключения избыточных степеней свободы и повышения управляемости использована пассивная центральная кинематическая цепь с выдвижным телескопическим звеном, а также захватное устройство с гибкой трубой для транспортировки и складирования фруктов; предложена структура и параметризованная модель специального захватного устройства, позволяющего комбинировать методы отрывания и скручивания фруктов за счёт наличия на корпусе винтовой поверхности, по которой перемещается внутренняя труба, имеющая на одном торце пальцы, обеспечивающие захват и отделение фруктов.
- разработана математическая модель кинематики робототехнической системы, описывающая зависимость положения телескопического звена с захватным устройством от углов ориентации подвижной платформы робота-трипода, учитывающая положения шарниров крепления кинематических цепей робота-трипода в виде систем нелинейных уравнений, определяющих ограничения на множество достижимых положений и ориентаций выходного звена и допустимых диапазонов движения линейных приводов.
- синтезирован эвристический алгоритм многокритериальной оптимизации параметров робота-трипода, на первом этапе которого выполняется нормализация критериев, а на втором этапе - итеративная процедура оптимизации на основе однокритериальных эволюционных алгоритмов с использованием свёртки критериев с переменными коэффициентами важности. Использование в качестве критериев компактности конструкции и критерия, зависящего от количества недостижимых ориентаций платформы при заданных ограничениях на

диапазоны приводных штанг, позволяет расширить функциональные и эксплуатационные характеристики.

– синтезирован двухэтапный алгоритм технического зрения для локализации деревьев и распознавания фруктов на основе интеграции нейросетевых алгоритмов и преобразования Хафа; на первом этапе алгоритма выполняется формирование списка заданий на основе идентификации крон деревьев, а на втором - актуализация списка заданий на основе идентификации и сегментации плодов с учётом их спелости, что позволяет на основе визуальных данных комбинировать автономную навигацию и идентификацию координат объектов.

– разработан комбинированный метод проектирования робототехнической системы для сбора фруктов, включающий формализацию всех стадий проектирования: создание математических и электронно-цифровых моделей, цифровых двойников, топологическую оптимизацию распределения материала в конструктивных элементах с использованием CAD/CAE-систем, позволяющий на основе полной динамической и имитационной моделей получить детализированный цифровой двойник робототехнической системы и ее рациональную конструкцию.

Теоретическая и практическая значимость результатов исследований

Теоретическая значимость исследования заключается в разработке методов создания робототехнических систем для сбора фруктов, включая методологию формирования технических требований к системе, методы оптимизации конструкции, методы и подходы к очувствлению робототехнической системы.

Практическая значимость исследования определяется разработкой ряда конструктивных решений, алгоритмов и программно-алгоритмического обеспечения. Разработанное программно-алгоритмическое обеспечение включает в себя как программы оптимизации конструкции, предназначенные для применения на этапе проектирования, так и программы управления робототехнической системой, включая реализацию алгоритмов технического зрения. Соискателем также разработан и испытан полномасштабный экспериментальный образец робототехнической системы для автоматизированного сбора яблок.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается корректным использованием доступных программных комплексов для расчёта, проектирования и динамической симуляции механических систем, а также согласованностью с опубликованными результатами научных исследований других авторов. Подтверждением достоверности являются результаты компьютерного моделирования с проверкой применённых моделей и алгоритмов на задачах, имеющих аналитическое решение, лабораторными и натурными испытаниями

разработанного экспериментального образца автономной робототехнической системы для сбора фруктов.

Результаты диссертации были представлены на достаточно большом количестве российских и международных научных конференций. Все основные положения работы опубликованы в рецензируемых научных изданиях.

Диссертация соответствует паспорту специальности 2.5.4. - Роботы, мехатроника и робототехнические системы.

В автореферате изложены основные идеи и выводы диссертации. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации и удовлетворяет всем пунктам «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 г.

Структура и содержание работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов по работе, списка литературы, приложений. Работа изложена на 176 страницах, включая 10 таблиц, 82 рисунка, список литературы из 128 наименований и 5 приложений.

Диссертация изложена доступным языком и оформлена в соответствии с требованиями государственных стандартов и ВАК РФ. Структура и содержание соответствует поставленной цели исследования и решаемым задачам. Работа содержит рисунки и таблицы, наглядно демонстрирующие полноту экспериментальных данных и достоверность полученных результатов

В первой главе выполнен обзор и анализ существующих робототехнических систем для сбора фруктов. Представлены основные технические аспекты в области автоматизации сельскохозяйственных процессов. Выявлены ключевые требования к разрабатываемой автономной робототехнической системе для сбора фруктов. Робототехническая система должна обладать высокими показателями структурной жёсткости, маневренности, компактности и точности позиционирования, а также быть адаптированной к работе в условиях неструктурированной внешней среды.

Во второй главе представлена математическая модель предлагаемой автономной робототехнической системы для сбора фруктов, описывающая зависимость положения выходного звена манипулятора от параметров мобильной платформы, длин приводных штанг и выдвигания телескопического звена с учетом особенностей конструкции робота-трипода. Получены условия достижимости рабочего пространства, исключая возможные особые положения и пересечения звеньев механизма с учётом сформированных уровней параметрических ограничений, зависящих от компактности конструкции и функциональной эффективности. Описан разработанный метод параметрического синтеза робототехнической системы,

учитывающий сформированные уровни параметрических ограничений по компактности и технологичности конструкции. Представлен алгоритм многокритериальной оптимизации геометрических параметров, реализующий двухэтапный эвристический поиск оптимальных конфигураций.

В третьей главе разработана инновационная конструкция захватного устройства, обеспечивающего комбинированный метод отделения плодов — отрывание и скручивание. Это позволило повысить скорость сбора и минимизировать повреждения фруктов. С применением метода проектирования на основе CAD/CAE-систем была создана детальная электронно-цифровая модель автономной робототехнической системы, обладающая высокой степенью соответствия реальному механизму. Это позволило автоматизировать процесс проектирования и значительно ускорить его реализацию. На основе разработанной имитационной модели проведён динамический анализ робототехнической системы при заданных траекториях движения, что обеспечило полное понимание взаимосвязей между кинематическими и динамическими параметрами мобильной платформы, робота-трипода и захватного устройства.

В четвёртой главе для подтверждения теоретических результатов разработан экспериментальный образец автономной робототехнической системы для сбора фруктов. Для изготовления опытного образца выполнено детальное проектирование узлов и компонентов, разработана конструкторская документация и реализована система управления приводными механизмами для выполнения требуемых операций. Выполнена интеграция системных компонентов, датчиков, контроллера и экспериментального образца робототехнической системы. Проведены экспериментальные исследования. Результаты исследований позволили определить уровень точности распознавания зрелых плодов, скорость реакции системы и качество выполнения операции отделения фруктов. Также были изучены траектории перемещения манипулятора при сборе яблок в зависимости от освещённости и расположения кроны дерева. Анализ полученных данных позволил выявить ошибки позиционирования и предложить пути повышения надёжности и производительности системы.

Главы диссертации заканчиваются соответствующими выводами, в заключении работы представлены основные результаты и рекомендации. Материалы диссертационной работы и автореферата изложены грамотным техническим языком.

Автореферат полностью раскрывает содержание диссертационной работы.

Замечания по диссертационной работе

1. Работа является комплексной и охватывает очень большое количество крайне разнородных задач: разработка методов оптимизации конструкции робототехнической системы, проектирование экспериментального образца, изготовление экспериментального образца,

разработку программного обеспечения для системы управления, разработку системы технического зрения, экспериментальные исследования в лабораторных и полевых условиях. Поэтому не удивительно, что некоторые нюансы исследования в работе описаны без подробностей. Например, не раскрыты детали имитационного моделирования динамики системы, а в ряде случаев автор не даёт почти никакой информации о применяемом подходе, ограничиваясь только ссылками на публикации других авторов. Более целесообразно было бы пойти на увеличение объёма диссертации, но представить достаточно подробно все части работы.

2. В описании модели кинематики (раздел 2.1) остаётся не ясным с какой точкой системы связана подвижная система координат $X_2Y_2Z_2$. Описанная модель выглядит удобной для анализа рабочей зоны манипулятора, но остаётся неясным как автор решает задачу кинематики для задачи управления манипулятором. Не представлена также модель дифференциальной кинематики, и остаётся неясным как соискатель задавал скорости движения приводов манипулятора.

3. Представленные на рисунках 2.3 и 2.4 графические изображения рабочей области, во-первых, выглядят не информативно. Более целесообразно было бы дополнить эти изображения проекциями рабочей области на координатные плоскости. Во-вторых, эти рисунки показывают форму рабочей области платформы, однако более интересно было бы сделать фокус на рабочей области захватного устройства. В-третьих, использованная матрица Якоби вырождается в центральной зоне не потому, что центральная зона кинематически недоступна, а потому, что выбранная система эйлеровых углов не подходит для её описания. При выборе другого набора углов или при использовании других способов представления ориентации платформы, можно было бы легко избежать этой проблемы с центральной зоной.

4. В разделе 2.3 не хватает анализа полученных решений: целесообразно было бы показать конкретные наборы параметров, соответствующие нескольким точкам на границе Парето. Кроме того, раздел выглядит несколько незавершённым с точки зрения анализа применяемых методов. Применение нескольких алгоритмов для одних и тех же значений параметров является интересным решением, способным увеличить вероятность нахождения экстремума. Но, возможно тех же результатов удалось бы добиться, проведя вычисления одним и тем же алгоритмом несколько раз для разных наборов исходной популяции. А систематическое отставание одного из алгоритмов может быть связано с тем, что для него было выбрано недостаточное количество поколений или недостаточно большой коэффициент мутаций.

5. При разработке системы технического зрения отфильтровываются плоды, цвет которых не соответствует критериям зрелости. Это решение выглядит сомнительным для такой сельскохозяйственной культуры, как яблоки. Цвет яблок на одном и том же дереве может сильно варьироваться не по причине их незрелости, а по причине нахождения в густой листве. И как правило, урожай яблок собирается весь сразу, даже если отдельные плоды не

созрели, дозревать их не оставляют. Можно говорить о том, что это универсальное решение, но такой аргумент тоже не выдержит критики, поскольку для других типов фруктов будут другие критерии зрелости и другие правила уборки урожая.

6. В разделе 3.4 предлагается оценивать силу удара яблок друг об друга с помощью «известной», как выразился соискатель, формулы. Однако эта «известная» формула представляет собой типичную ошибку, связанную с подменой понятий среднего ускорения и мгновенного ускорения. Формально эта формула даёт существенно заниженный результат, а фактически её просто невозможно использовать из-за невозможности корректно определить время контакта. Там же приводится значение силы, с которой яблоко определённой массы ударяется о другой фрукт. Как соискатель получил это значение силы остаётся не ясным, поскольку даже для вычислений по упомянутой формуле он не приводит достаточных данных. Однако самое главное, что вычисление этой силы, даже если его произвести абсолютно корректно, ничего не даёт в практическом смысле. Потому что повреждение плода определяется не силой, а давлением взаимодействующих объектов.

7. Ни в результатах имитационного моделирования, ни в результатах натуральных экспериментов не описаны характеристики скорости работы робототехнической системы. Хотя изначально именно обеспечение высокой скорости сбора фруктов заявлялось как один из самых важных мотивов к разработке таких систем.

8. В некоторых случаях соискатель допускает неточности в формулировках. Например, в разделе 3.4 написано, что якобы скорость свободно падающего фрукта зависит от массы фрукта, что явно не соответствует контексту, в котором не рассматривается сопротивление воздуха или другие эффекты, связанные с массой и способные повлиять на скорость свободного падения. В работе встречаются неточности в терминологии. Например, использование слова «сустав» вместо термина «шарнир». Соискателю не удалось также избежать значительного количества опечаток.

Замечания и отмеченные недостатки не снижают общей положительной оценки диссертации. Диссертационная работа Волошкина А.А., является законченной работой, выполненной самостоятельно на должном уровне.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней

Диссертационная работа Волошкина Артёма Александровича «Методы проектирования и оптимизации автономной робототехнической системы для сбора фруктов» соответствует областям исследований, указанным в пунктах 1, 4 и 11 паспорта специальности 2.5.4. Роботы, мехатроника и робототехнические системы: п. 1. Развитие теоретических основ и методов

анализа, автоматизированного проектирования роботов и робототехнических систем; п. 4. Математическое и полунатурное моделирование мехатронных и робототехнических систем, включая взаимодействие со средой, анализ их характеристик, оптимизация и синтез по результатам моделирования; п. 11. Методы и средства автоматизированного проектирования, анализа и оптимизации роботизированных систем, комплексов, ячеек и линий. Исследование, повышение эффективности и безопасности эксплуатации автоматизированных технологических процессов, создаваемых на базе робототехнических и мехатронных систем.

Диссертационная работа имеет научную и практическую значимость в рассматриваемой области исследований, является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком уровне. Основные ее результаты опубликованы в 22 статьях и прошли апробацию на международных и всероссийских научных конференциях.

Диссертационная работа соответствует пунктам 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 г., а ее автор, Волошкин Артём Александрович, достоин присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.4. Роботы, мехатроника и робототехнические системы.

Официальный
оппонент

Малолетов Александр Васильевич, доктор физико-математических наук (специальность 01.02.01 – «Теоретическая механика»), научный руководитель Центра автоматизации роботизации, директор Института робототехники и компьютерного зрения, профессор АНО ВО «Университет Иннополис».

420500, Российская Федерация, Республика Татарстан, Верхнеуслонский муниципальный район, город Иннополис, улица Университетская, д. 1. Автономная некоммерческая организация высшего образования «Университет Иннополис». Тел.: +7 (843) 203-92-53, e-mail: a.maloletov@innopolis.ru

Согласен на обработку персональных данных.

Александр Васильевич Малолетов

11.05.2025

Подпись Малолетова Александра Васильевича заверяю:
Директор по развитию и кадровой политике
АНО ВО «Университет Иннополис»



Валиев Р.Ф.