

РОБОТЫ-СБОРЩИКИ УРОЖАЯ ФРУКТОВ, ЯГОД, ОВОЩЕЙ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Лэй Чжан

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Москва*

Ключевые слова: урожай фруктов, ягоды, овощи, робот-сборщик урожая, распознавание спелых плодов, планирование точки захвата плода.

Аннотация. Обсуждается современное состояние и перспективы развития роботов-сборщиков урожая фруктов, ягод и овощей. Акцентируется внимание на трех ключевых компонентах данных роботов: процесс распознавания спелых плодов с помощью видеокамер и алгоритмов машинного зрения, манипулятор с управляемыми приводами в виде механической «руки» и захватывающий механизм с приводом для движения захвата, позволяющий собирать плоды, не повреждая их.

ROBOTS-HARVESTERS OF FRUITS, BERRIES, VEGETABLES: STATE AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT

Lei Zhang

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: harvest of fruits, berries, vegetables, robot harvester, recognition of ripe fruits, planning of the point of capture of the fruit.

Abstract. The current state and prospects for the development of fruit, berry and vegetable harvesting robots are discussed. Attention is focused on three key components of these robots: the process of recognizing ripe fruits with the help of video cameras and machine vision algorithms, a manipulator with controlled drives in the form of a mechanical "hand" and a gripping mechanism with a drive for the capture movement, which allows you to collect fruits without damaging them.

Введение

Автоматизация и роботизация охватывают практически все сферы жизнедеятельности современного человека. Совершенствование аграрной сферы в современных условиях связано с переходом к безлюдному автоматизированному сельскохозяйственному производству на основе все более широкого внедрения робототехники. Одной из наиболее ответственных и трудоемких работ в сельскохозяйственном производстве является сбор урожая в теплицах или на открытом грунте. С привлечением роботов-сборщиков (РС) для избирательной, быстрой и бережной уборки урожая заметно повысилось качество и количество урожаев, уменьшились затраты по времени и нагрузки на человека.

Типовые РС урожая плодов приведены на рисунке 1. Роботизированный сбор урожая плодов, как правило, включает в себя три компонента: сложный процесс распознавания спелых плодов с помощью видеокамер и алгоритмов машинного зрения, манипулятор с управляемыми приводами в виде механической «руки» и захватывающий механизм с приводом для движения захвата, позволяющий собирать плоды, не повреждая их (срывать плоды в нужном месте с применением правильной силы).



Рис. 1. Типовые РС урожая плодов

В 1968 г. американские ученые Schertz и Brown впервые предложили идею применения машинной технологии для сбора фруктов и овощей, что считается учеными началом исследований сельскохозяйственных РС. Однако первоначальные методы сбора урожая, использовавшиеся при разработке уборочных машин, были в основном механическими и пневматическими вибрационными встряхиваниями, которые не были очень автоматизированными и интеллектуальными [1]. С середины 1980-х гг. на основе промышленной робототехники, технологии обработки зрения и графики, а также технологии искусственного интеллекта стали более зрелыми, Европа, Америка, Япония и другие страны начали разработку различных РС [2]. В настоящем обзоре основными объектами роботизированного сбора урожая являются (см. рис. 2) фрукты (яблоки и киви), ягоды (клубника и малина) и овощи (помидоры и перец).

Роботы-сборщики яблок

В конце 20-го века РС яблок, разработанный Университетом Кёнпук в Южной Корее, имел 4 степени свободы, в том числе три вращающихся и одно подвижное соединение [3]. Робот использует ПЗС-камеру и фотоэлектрический датчик, которые могут более точно идентифицировать яблоки. В то же время робот использует трех-пальцевый захват со встроенным датчиком давления в качестве конечного эффектора, что позволяет эффективно избежать повреждения яблока. Хотя проблема узнавания и схватывания решена, все еще трудно избежать препятствий в работе из-за ограниченной степени свободы.

В 2008 г. РС яблок может быть автоматическим роботом хватательного типа, использующим адсорбцию отрицательного давления, разработанную Baeten и др. [4]. Комбайн можно разместить на платформе, установленной за сельскохозяйственным трактором. В комбайне используется промышленный роботизированный манипулятор с шестью степенями свободы. Рабочий орган имеет типичную конструкцию, похожую на всасывающую насадку в пылесосе. Цель состоит в том, чтобы избежать повреждения яблока, обеспечивая при этом устойчивую силу всасывания. Внутри комбайна также установлена видеочкамера. Как только камера обнаруживает, что яблоко находится в пределах рабочего диапазона всасывающей насадки, может быть активировано отрицательное давление для поглощения яблока, и, таким образом, всасывающая насадка может захватывать и собирать яблоко посредством вращения и плавного наклона. Таким образом, РС яблок может потребоваться в среднем 8-10 с, чтобы собрать яблоко,

а вероятность успешного сбора составляет около 80%. Тем не менее, некоторые яблоки невозможно собрать, что особенно трудно обнаружить и достать роботизированной рукой в этом эксперименте.

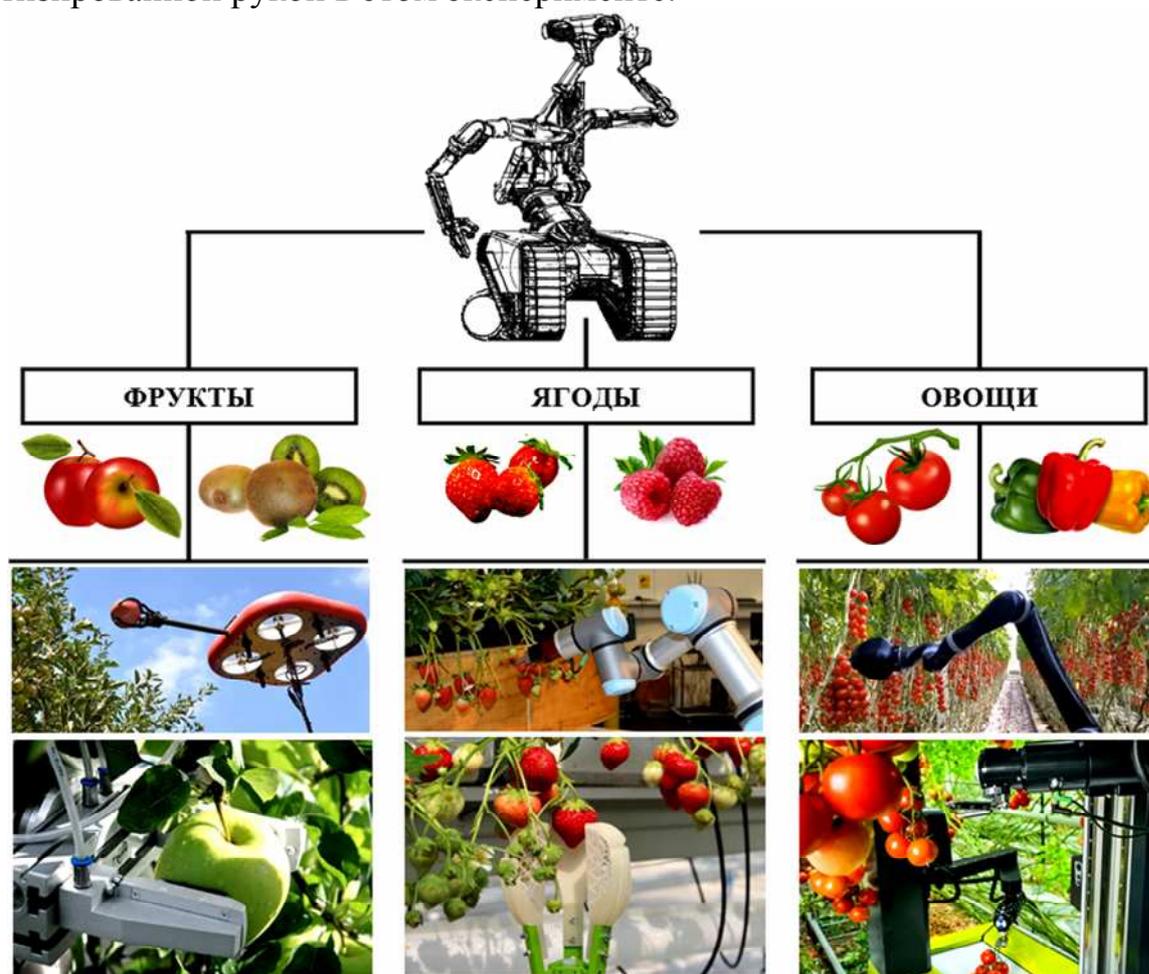


Рис. 2. Роботизированный сбор фруктов, ягод и овощей

РС яблук, разработанный Gu Baoxing и др. в Нанкинском сельскохозяйственном университете для стандартного карликового яблоневого сада, использует автономную навигацию DGPS с легкой гусеничной интеллектуальной мобильной платформой с манипулятором РС для идентификации и позиционирования плодов путем обработки изображения модели разности цветов плодов и ветвей для завершения сбора [5]. Nguyen и др. разработали робота-сборщика с 9 степенями свободы, который можно установить на трактор. В верхней части робота установлена камера RGB, а на концевом исполнительном органе установлена камера TOF, так что распознавание изображений и данные трехмерного позиционирования могут быть интегрированы. Робот управляет рукой, чтобы выровняться с фруктами, и, наконец, собирает яблоки через конец. Оснащенный более высокой осью Z и более длинными руками, робот может проникать выше и глубже в кронах деревьев для сбора фруктов [6].

Среди РС яблук наибольшие рыночные перспективы имеют стартапы FF Robotics из Израиля и Abundant Robotics из США. Они все еще вносят технические усовершенствования, исходя из реальных условий сбора урожая в саду, и в 2019 г. они запустили конкурс технологий сбора яблок и оценку

производительности в саду в Вашингтоне, США. Компания FFRobotics [7] разработала телескопический концевой эффектор с тремя пальцами, который приближается к цели сбора, телескопически захватывает и скручивает плодоножки для обеспечения быстрого сбора плодоножек с помощью последовательного PPP (prismatic–prismatic–prismatic) метода. Компания Abundant Robotics [8] разработала параллельного робота с концевым эффектором на основе вакуумного отсоса. Оба используют камеры глубины для идентификации и определения местоположения яблок. Преимущество серийных роботов заключается в том, что они могут охватывать большие кроны яблони и позволяют им проникать в крону из-за их небольшого радиального размера; Преимущества параллельных РС заключаются в том, что они быстрые и эффективные, а процесс упаковки можно завершить прямо во время сбора урожая, что значительно сокращает время сбора урожая яблок. FFRobotics утверждает, что эффективность сбора высококачественных фруктов в 10 раз выше, чем при ручной работе, но среднее время сбора одного фрукта не приводится. Abundant Robotics утверждает, что может собирать яблоко каждую секунду.

Роботы-сборщики клубники

Японская компания Kondo N и др. разработали манипулятор прямоугольного координатного робота с 3-мя степенями свободы, установленный на мобильной платформе порталного типа для выращивания клубники в помещении, который является первым прототипом РС клубники [9]. Здесь робот использует цветную ПЗС-камеру для обнаружения плодов клубники, использует всасывающий вращающийся режущий концевой эффектор для отрезания плодоножки и собирает плоды. Тест показал, что метод всасывания очень эффективен для мелких плодов. Впоследствии Kondo N и др. разработали второе поколение РС клубники на основе прототипа первого поколения, усовершенствовав механизм концевых рычагов [10]. Робот второго поколения использовал преимущества роторного всасывающего типа и крючкового типа, а также добавил дополнительную челюсть к вакуумному всасывающему типу с концевым эффектом для захвата стеблей и их отрезания, эффективно увеличивая процент успешного сбора.

AGROBOT Robotics [11], испанская начинающая компания, разработала селективного РС для культивации на высоких гребнях и культивации стеллажей, который работает по беспроводной связи с помощью 24 независимых роботизированных манипуляторов, каждый со встроенной цветной камерой. Инфракрасный датчик глубины и блок обработки изображений определяют степень зрелости клубники, подлежащей сбору, а концевой эффектор применяет метод зажима сломанного стебля для сбора клубники, не касаясь непосредственно плодов и избегая повреждений. Американская компания-стартап Harvest CROO разработала селективный РС с четырьмя рядами одновременных операций для наземной и грядовой обработки клубники [12]. Учитывая окклюзию клубники и стеблей и листьев в режиме высокогорной обработки поля, развернутое устройство для стеблей и листьев предназначено для временного отделения плодов земляники от стеблей и листьев, а затем с

помощью оптической камеры, которая вращается вокруг растения, чтобы идентифицировать и найти плоды клубники. Конструкция уборочного колеса, состоящая из 6 захватов из пищевого силикона в каждом ряду, сокращает время сбора урожая. Собранная клубника по очереди переносится на верхний конвейер для завершения операций сбора и упаковки.

De Preter и др. [13] разработали РС, представляющего собой полностью автономную систему, не требующую какого-либо взаимодействия или вмешательства человека во время своей работы. Независимость и эффективность системы зависят от семи компонентов: электромобиля, системы локализации, системы обнаружения камер, специально разработанного робота-манипулятора, захвата, модуля логистической обработки и программного обеспечения для контроля качества. Положение транспортного средства определяется колесными энкодерами, гироскопами и сверхширокополосной (UWB) внутренней системой позиционирования. Клубнику сначала обнаруживают тремя RGB-камерами в зависимости от цвета изображения. Конечный эффектор также представляет собой напечатанный на 3D-принтере палец с мягкой структурой. Таким образом, процесс сбора может имитировать сбор человеком. В процессе захвата нет ни разрезания, ни прожигания, только легкое натяжение при применении вращательного движения. Прототип системы был создан в 2017 г. бельгийской компанией Octinion. Время сбора составляет 4 с.

Роботы-сборщики помидоров

Разработанный РС помидоров Kondo N из Университета Окаямы, использует визуальную систему, состоящую из цветной камеры и карты обработки изображений, для идентификации и определения местоположения спелых помидоров, а для обхода препятствий используется манипулятор с 7 степенями свободы. А присоска используется, чтобы схватить и выбрать плод. Цикл подбора робота составляет около 15 с, а вероятность успеха может достигать 70% [14].

Позже Kondo N и др. разработали нового РС помидоров в соответствии с характеристиками роста помидоров. В работе используется промышленный робот Mitsubishi RH-6SH5520, концевой эффектор использует отрезной тип для обрезки плодоножки и оснащен захватом для удержания целой грозди собранных томатов. РС SCARA в операции захвата (слева) и поза захвата и резки концевым эффектором (справа). Его максимальное качество сбора составляет 6 кг, цикл сбора составляет около 15 с, а вероятность успеха низкая, всего около 50% [15]. Но считается, что этот показатель улучшится, если концевой эффектор будет использоваться для высокопроводных систем обучения растений томата в голландских системах, где длина узлов растений достаточно велика, чтобы свободно удерживать главные стебли.

Taqi F и др. в Кувейте разработали РС помидоров черри в теплицах и домах. Робот распознает плоды помидоров, делая снимки с камеры, и может самостоятельно определить, созрели ли помидоры, повреждены или гнилые, и завершить сортировку [16]. Двухрукий робот для сбора томатов, разработанный Zhao Y.S. и др. в Шанхайском университете Цзяотун, оснащен двумя трехгранными роботизированными манипуляторами типа PRR, использует

роликовые лезвия и картридж с присосками, а также бинокулярную систему видения для идентификации и позиционирования плодов [17].

Компания RootAI разработала небольшого робота Virgo для отбора отдельных плодов помидоров, который осуществляет автоматическое движение по линии посадки на объекте, использует информацию о пространственном изображении, полученную с помощью 3D-камеры и технологии глубокого обучения, определяет степень зрелости плодов и делает вывод о целевом помидоре. Небольшой концевой эффектор с тремя когтями [18], изготовленный из материалов, пригодных для пищевых продуктов, может быстро завершить сбор мелких плодов томатов, не повреждая помидоры.

Роботы-сборщики киви

Новозеландский стартап RoboticsPlus разработал многорукий РС для селективного сбора урожая киви [19-20] для автономной работы в решетчатом саду. Робот состоит из четырех манипуляторов с тремя степенями свободы, предназначенных для уборки киви, и рабочего органа с параллельным четырехзвенным механизмом для обеспечения вертикального положения рабочего органа, который использует два гибких пальца-манипулятора для быстрого скручивания и отделения киви от плодоножки без повреждений. Система технического зрения использует глубокие нейронные сети и информацию о стереозрении со структурированным светом для надежного обнаружения и позиционирования киви. Показатель успешности сбора урожая в роботизированном тесте сбора урожая в саду составил 86,0%, при этом время цикла сбора урожая составило 2,78 с на киви для 55,8% собранных киви.

Роботы-сборщики малины

С малиной очень сложно работать, так как требуется правильное давление, чтобы отделить каждую ягоду, не повредив ее. Чтобы преодолеть это, технология, разработанная Fieldwork Robotics, использует комбинацию 3D-камер, датчиков и машинного обучения, чтобы определить, достаточно ли созрел фрукт, чтобы его можно было срывать. Затем четыре захватных рычага робота движутся к фруктам и оказывают давление на плодоножку каждого фрукта, а не на саму ягоду. Это гарантирует, что малина не будет повреждена, а тесты показали, что качество собранных плодов такое же, как и у собранных людьми. Каждый робот может собирать более 25000 ягод малины в день, что намного превышает среднюю нагрузку рабочего, собирающего 15000 ягод малины за 8-и часовую смену.

Роботы-сборщики перца

В Израиле разработан автоматический РС сладкого перца Sweeper, головка которого состоит из четырех светодиодных световых полос и системы визуального распознавания расстояния. Этот робот может автономно патрулировать назад и вперед в теплице, где выращивают сладкий перец, наблюдать, созрели ли сладкие перцы, и собирать спелые сладкие перцы в корзину. Поскольку Sweeper имеет собственный источник света, он может нормально работать даже ночью. Однако в настоящее время среднее время,

оценки зрелости перца составляет 24 с, а показатель точности пока не превышает 61%.

Многофункциональные роботы-сборщики

Израильская компания Tevel Aerobotics Technologies разработала летающих автономных роботов (FAR), которые взлетают с базовой станции, собирают с дерева только спелые плоды и аккуратно опускают их для сбора. РС Tevel способны определять такие показатели, как спелость фруктов, тип фруктов, дефекты фруктов и качество фруктов. В то время как текущая версия РС может собирать только яблоки и апельсины, Tevel работает над расширением возможностей своих дронов для сбора других фруктов, таких как авокадо и манго. В дополнение к серии дронов-сборщиков Tevel также планирует разработать программное обеспечение для управления кластером дронов, которое может собирать и отслеживать данные, такие как урожай фруктов, качество фруктов и планирование траектории движения для каждого дерева в саду, для последующего повышения эффективности сбора фруктов.

Заключение

В настоящее время большинство РС урожая плодов все еще находятся на стадии исследований и до их практической реализации еще далеко. При этом обзор современного состояния РС показывает необходимость следующих внедрений:

- оснащение технологиями машинного зрения, обеспечивающего высокую степень обработки изображений и использование алгоритмов машинного обучения для точного определения зрелости, размера плодов;

- оснащение высокоточными манипуляторами, позволяющими выбрать лучший способ захвата плодов в сложной среде;

- оснащение платформой для автономного вождения, реализующего управление рабочим органом робота, навигационное движение, быстрый поиск поля зрения, корректное пространственное позиционирование.

Необходимы дальнейшие исследования в области интеллектуальной идентификации плодов и позиционирования РС, планирования пути и управления движением.

Список литературы

1. Schertz C.E., Brown G.K. Basic considerations in mechanizing citrus harvest // Transactions of the ASAE. 1968, vol. 11(3), pp. 343-346.
2. Zhang J., Li Y. Research status, problems and countermeasures of fruit and vegetable picking robots // Journal of machine design. 2010, vol. 27(6), pp. 1-5.
3. Kondo N., Ting K.C., Robotic for bio-production systems // ASAE Publisher. 1998, pp. 5-98.
4. Baeten J., Donné K., Boedrij S., Beckers W., Claesen E. Autonomous fruit picking machine: A robotic apple harvester // Field and Service Robotics: Results of the 6th International Conference. 2008, pp. 531-539.
5. Gu B., Ji C., Wang H. et al. Design and experiment of intelligent mobile fruit picking robot // Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery. 2012, vol. 43(6), pp. 153-160.
6. Nguyen T.T., Kayacan E., De Baedemaeker J., Saeys W. Task and Motion Planning for Apple Harvesting Robot // IFAC Proceedings Volumes. 2013, vol. 46, pp. 247-252.
7. FFRobotics [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.ffrobotics.com>

8. Abundant Robots [Electronic resource]. – Access mode: <https://waxinvest.com/projects/abundant-robots/>
9. Kondo N., Hisaeda K., Hatou K., et al. Harvesting robot for strawberry grown on annual hill top. Part 1. Manufacture of the first prototype robot and fundamental harvesting experiment // Journal of Society of High Technology in Agriculture. 2000, vol. 12(1), pp. 23-29.
10. Kondo N., Hisaeda K., Hatou K. Harvesting robot for strawberry grown on annual hill top. Part 2. Manufacture of the second prototype robot and fundamental harvesting experiment // Journal of Society of High Technology in Agriculture. 2001, vol. 13(4), pp. 231-236.
11. Trinidad J.B. Machine for automatically harvesting fruits cultivated in rows // U.S. Patent Application, 13/124. 2011-10-20, pp. 577.
12. Harvest Croo Robotics [Electronic resource]. – Access mode: <https://harvestcroo.com/>
13. De Preter A., Anthonis J., De Baerdemaeker J. Development of a Robot for Harvesting Strawberries // IFAC-PapersOnLine. 2018, vol. 51(17), pp. 14-19.
14. Kondo N., Monta M., Fujiura T. Fruit harvesting robot in Japan // Advances in Space Research. 1996, vol. 18(1-2), pp. 181-184.
15. Knodo N., Yata K., Shiigi T., et al. Development of an end effector for a tomato cluster harvesting robot // Engineering in Agriculture, Environment and Food. 2010, no. 3(1), pp. 20-24.
16. Taqi F., Al-Langawi F., Abdurraheem H., et al. A cherry-tomato harvesting robot // 18th Internat. Conf. on Advanced Robotics, IEEE. 2017, pp. 463-468.
17. Zhao Y., Gong L., Liu C., et al. Dual-arm robot design and testing for harvesting tomato in greenhouse // IFAC Paperson line. 2016, vol. 49(16), pp. 161-165.
18. Knopf R.R., Lessing J.A., Chrisos J.A., Gripper with tunable compliance for dexterous object manipulation // U.S. Patent Application 16/453. 2019, vol. 12-26, pp. 415.
19. Williams H., Ting C., Nejati M., et al. Improvements to and large - scale evaluation of a robotic kiwifruit harvester // Journal of Field Robotics. 2020, vol. 37(2), pp. 187-201.
20. Williams H.A.M., Jones M.H., Nejati M., et al. Robotic kiwifruit harvesting using machine vision, convolutional neural networks, and robotic arms // Biosystems engineering. 2019, vol. 181, pp. 140-156.

Сведения об авторах:

Чжан Лэй – аспирант.