

УДК 631.358:634.11

4.3.1 Технологии машины и оборудование для агропромышленного комплекса.

АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ВАКУУМНЫХ ЗАХВАТОВ ДЛЯ РОБОТИЗИРОВАННОЙ УБОРКИ ПЛОДОВ ЯБЛОНИ

Филиппов Ростислав Александрович
кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник лаборатории машинных технологий для возделывания и уборки плодово-ягодных культур
SPIN-код: 4742-7353
AuthorID: 682584
Web of Science ResearcherID: Q-2722-2017
Scopus ID: 57206783036
ORCID: 0000-0003-3586-3634
E-mail: rostislav-filippov@yandex.ru
Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия

Коломейченко Алексей Александрович
магистрант, инженер лаборатории машинных технологий для возделывания и уборки плодово-ягодных культур
SPIN-код: 7999-0630
AuthorID: 1106851
E-mail: a.kolomeychenko@mail.ru
Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия

Автоматизация сбора плодов является важной задачей для снижения трудоёмкости уборочных процессов в садоводстве и требует разработки эффективных роботизированных систем. Вакуумные захваты рассматриваются как один из наиболее перспективных типов рабочих органов для таких систем. Цель работы – проанализировать существующие конструкции вакуумных захватов для роботизированной уборки яблок и обосновать технологические требования к их проектированию. Объектом исследования выступили конструкции вакуумных захватов, представленные в открытых научных публикациях, патентах и технической документации. В работе представлена классификация контактных вакуумных захватов, а также анализ технологических особенностей и сравнительная оценка рабочих органов данного типа. Установлено, что гофрированные и мягкие захваты обладают наилучшей адаптивностью к криволинейной поверхности и углам наклона плода, в то время как комбинированные захваты эффективны для плодов с жесткой плодоножкой, однако отличаются конструктивной сложностью. Сформулированы требования к проектированию, учитывающие необходимость демпфирования, применения эластомерных материалов. На основе

UDC 631.358:634.11

4.3.1 Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex

DESIGN ANALYSIS OF VACUUM SUCTION GRIPPERS INTENDED FOR ROBOTIC APPLE PICKING SYSTEMS

Filippov Rostislav Alexandrovich
Candidate of Agricultural Sciences, Leading Researcher of the laboratory of machine technologies for cultivation and harvesting of fruit and berry crops
Author SPIN: 4742-7353
AuthorID: 682584
Web of Science ResearcherID: Q-2722-2017
Scopus ID: 57206783036
ORCID: 0000-0003-3586-3634
E-mail: rostislav-filippov@yandex.ru
Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia

Kolomeychenko Aleksey Aleksandrovich
Master's student, Engineer of the laboratory of machine technologies for cultivation and harvesting of fruit and berry crops
Author SPIN: 7999-0630
AuthorID: 1106851
E-mail: a.kolomeychenko@mail.ru
Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia

Automation of fruit harvesting is an important task for reducing the labor intensity of harvesting processes in horticulture, which requires the development of effective robotic systems. Vacuum grippers are regarded as one of the most promising types of end effectors for such systems. The aim of this work is to analyze existing designs of vacuum grippers for robotic apple harvesting and to substantiate the technological requirements for their design. The object of the study was the designs of vacuum grippers presented in open scientific publications, patents, and technical documentation. The article presents a classification of contact vacuum grippers, as well as an analysis of technological features and a comparative assessment of working elements of this type. It has been established that bellows-type and soft elastomeric grippers possess the best adaptability to the curved surface and angles of fruit orientation, while combined grippers are effective for fruits with a rigid stem but are characterized by design complexity. Design requirements are formulated, taking into account the need for damping, the use of elastomeric materials, and ensuring sufficient vacuum flow. Based on the conducted research, the initial technical requirements for the development of a robotic device are determined: the fruit detachment force is 20–50 H, the

проведенного исследования определены исходные технические требования для разработки роботизированного устройства: усилие отрыва плода составляет 20–50 Н, оптимальный диаметр присоски варьируется от 30 до 50 мм, рабочее разрежение должно находиться в пределах от -60 до -90 кПа. Полученные результаты определяют направления дальнейших исследований по оптимизации геометрических параметров захватов и служат базой для проектирования эффективных средств при автоматизированной уборке урожая плодов

Ключевые слова: ВАКУУМНЫЙ ЗАХВАТ, ЯБЛОКО, РОБОТИЗИРОВАННАЯ УБОРКА УРОЖАЯ, АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ

optimal suction cup diameter varies from 30 to 50 mm, and the working vacuum pressure should be in the range of -60 to -90 kPa. The obtained results define directions for further research on optimizing the geometric parameters of grippers and serve as a basis for designing effective means for automated fruit harvesting

Keywords: VACUUM GRIPPER, APPLE, ROBOTIC HARVESTING, DESIGN ANALYSIS

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-218-030>

Введение. Современное садоводство сталкивается с острым дефицитом квалифицированной рабочей силы в периоды сбора урожая, что способствует активному внедрению роботизированных технологий. Автоматизация уборочных процессов в садоводстве является одной из приоритетных задач для снижения доли ручного труда и повышения эффективности производства. Наибольшую сложность представляет сбор плодов, чувствительных к механическим повреждениям. Роботизированные системы, оснащенные манипуляторами и специализированными концевыми захватами, рассматриваются как основное решение данной проблемы. Однако для качественного проведения уборочной операции без повреждений плодов необходимо подобрать такие параметры исполнительного рабочего органа, которые будут соответствовать параметрам растений и плодов [1, 2]. Механические повреждения, такие как вмятины и проколы, резко снижают товарную ценность и лёжкость продукции.

Среди широкой номенклатуры захватных устройств (механические пальцевые, камерные, вакуумные) особое место занимают вакуумные рабочие органы. Они характеризуются простотой конструкции, высокой скоростью срабатывания и возможностью распределения усилия по

<http://ej.kubagro.ru/2026/04/pdf/30.pdf>

значительной площади поверхности плода, что минимизирует риск травмирования [3]. Однако существующие конструкции отличаются большим разнообразием форм, материалов и принципов отделения плода, что затрудняет выбор оптимального решения для конкретных условий эксплуатации.

Цель исследования – заключается в проведении анализа и классификации современных конструкций вакуумных захватов для роботизированной уборки плодов яблони, а также обосновании технологических требований к их проектированию.

Материалы и методы. Объектом исследования являлись конструкции вакуумных захватов, предназначенных для съема плодов яблони в составе роботизированных систем. Информационную базу составили научные статьи в рецензируемых журналах, материалы конференций, патентная документация и технические описания коммерческих разработок за период с 2008 по 2023 год. В работе применялись методы системного и сравнительного анализа для выявления общих и отличительных признаков конструкций. Классификация выполнена на основе функционально-конструктивных особенностей рабочего органа. Анализ технических характеристик включал сбор и обобщение данных по диаметру, материалу рабочих органов и рабочим параметрам (давление/разрежение, усилие удержания, угол компенсации перекоса) и др.

Результаты и обсуждение. Американская компания Abundant Robotics разработала рабочий орган в виде вакуумного захвата яблок [4]. После вычисления координат плода в пространстве к нему подводится вакуумная трубка (рисунок 1). В процессе приближения яблоко постепенно перекрывает отверстие трубки, что приводит к резкому увеличению силы всасывания, достаточной для аккуратного отделения плода от плодоножки. Благодаря отсутствию сложных механических

элементов конструкция отличается высокой надежностью и устойчивостью к износу при интенсивной эксплуатации. Проведённые полевые испытания подтвердили, что роботизированная система успешно справляется со сбором, не оставляя на яблоках вмятин и повреждений.



Рисунок 1 – Общий вид рабочего органа вакуумного типа

Одной из наиболее технически проработанных конструкций является разработка бельгийских исследователей из Katholieke Hogeschool Limburg (KU Leuven) – автономная машина для сбора плодов (Autonomous Fruit Picking Machine, AFPM) [5]. Особенностью рабочего органа данной системы является запатентованный эластичный захват, выполненный в виде силиконовой воронки диаметром 10,5 см, в центре которой расположена видеокамера системы технического зрения, что значительно упрощает калибровку системы и позволяет с большой точностью позиционировать рабочий орган по центру плода (рисунок 2).

Функция захвата и удержания плода осуществляется с использованием эффекта разряжения, при котором воронкообразный рабочий орган прочно удерживает плод.

Многочисленные экспериментальные исследования показали, что длительное воздействие вакуумного разрежения для удержания плода не повреждает его, при этом полнота сбора находилась на уровне 80% при диаметре плодов от 60 до 110 мм. Время цикла сбора одного плода составляло 8-10 секунд. Отрыв плодоножки зафиксирован в 30 % случаев, иных повреждений в ходе сбора не обнаружено.



Рисунок 2 – Общий вид вакуумного захвата

Исследователями из Колледжа механической и электронной инженерии Северо-Западного университета A&F (Китай) был разработан захват вакуумного типа для роботизированного манипулятора для сбора яблок. Захват оснащен вакуумным наконечником с тремя гофрированными слоями, подключенным к вакуумному насосу производительностью 125 л/мин и максимальным разрежением в 93 кПа [6]. По результатам сравнительных испытаний с 30-мм аналогом при различных углах наклона для обеспечения максимальной силы всасывания была выбран вакуумный захват (присоска) диаметром 40 мм. Сервопривод захвата обеспечивает два

режима съема плода – простое вытягивание и вытягивание с вращением (рисунок 3). Экспериментально установлено, что сочетание вращения и вытягивания позволяет снизить общее усилие при отделении плода, что влияет на полноту съёма. Полнота съёма плодов в режиме с вращением достигла 91,67%, а в режиме простого вытягивания данный показатель составил лишь 75,76%.



Рисунок 3 – Исследование работы вакуумного захвата

В 2019 году на базе департамента машиностроения технологического университета штата Мичиган совместно с Исследовательской службой Министерства сельского хозяйства США (USDA-ARS) был разработан

экспериментальный образец робота, предназначенного для уборки яблок [7].

Модуль технического зрения выполнен на основе RGB-D камеры Intel RealSense D435i, а трехстепенной манипулятор имел гибридный пневмо-электрический привод и вакуумный захват сильфонного типа. Обнаружение плодов реализовано с помощью нейросетевой архитектуры Mask R-CNN, обученной на выборке из 1500 изображений, полученных в условиях коммерческого сада (штат Мичиган), что обеспечило точность распознавания плодов до 92,7 %.



Рисунок 4 – Мобильная установка в работе

Кинематическая схема манипулятора включает два вращательных шарнира на базе серводвигателей NEMA 23 (пиковый момент 2 Нм, диапазон рабочих углов $\pm 25^\circ$) и пневматический линейный модуль Lintra с длиной хода 0,61 м. Управление вращательными степенями подвижности реализовано с использованием нелинейного контроллера. Для отделения плодов применяется вакуумный захват диаметром 40 мм с силиконовым

наконечником. Разрежение в системе создаёт электродвигатель мощностью 4,3 кВт (рисунок 4). Такая конструктивная конфигурация позволяет компенсировать остаточные погрешности при наведении манипулятора на плод.

Полевые испытания прототипа, проведенные на базе Мичиганского учебно-научного центра, показали полноту сбора на уровне 82,47 %. Средняя продолжительность рабочего цикла составила 8,8 с при точности позиционирования рабочего органа в 2 см. Полученные результаты подтверждают применимость разработанного подхода в условиях структурированных садовых насаждений [7].

Исследователями Северо-Западного университета сельского и лесного хозяйства (Китай) совместно с коллегами из Харбинского технологического института разработан вакуумный захват для яблок, функционирующий за счет энергии отрицательного давления [8]. Лабораторный прототип представляет собой захватное устройство, на котором равномерно расположены четыре силиконовые вакуумные присоски сильфонного типа (рисунок 5).



Рисунок 5 – Вариант рабочего органа с 4 вакуумными захватами

При контакте с плодом под действием вакуума присоски деформируются, плотно облекая поверхность яблока. Последующее отделение плода осуществляется за счет комбинированного движения – поворота звена манипулятора с одновременным вытягиванием.

Принцип работы захвата основан на том, что при контакте с плодом под воздействием разрежения присоски деформируются, обеспечивая плотное прилегание к поверхности плода. Последующее отделение от плодоножки осуществляется комбинированным движением – поворотом рабочего органа манипулятора вокруг своей оси в сочетании с вытягиванием. Для определения оптимальных конструкционных параметров захвата был проведен многофакторный эксперимент, результаты которого показали, что наилучшие показатели работы достигаются при использовании четырех присосок диаметром 25 мм, расположенных под углом 27° . Повреждений плодов отмечено не было.

Для систематизации существующих технических решений в области вакуумных захватов, применяемых в сельскохозяйственной робототехнике, разработана классификационная схема (рисунок 6).

подавляющее большинство известных конструкций относится к категории контактных захватов. Внутри этой группы основным классификационным признаком выступает тип рабочего органа – вакуумные захваты (присоски). Выделены четыре основных класса. Первый класс представляют плоские вакуумные захваты, характеризующиеся ровной рабочей поверхностью. Данные элементы обеспечивают максимальную силу сцепления исключительно при строго перпендикулярном контакте с гладкой поверхностью плода. Ввиду жестких требований к ориентации и неспособности адаптироваться к геометрии яблока, плоские захваты (присоски) в плодуборочных машинах практически не используются, однако могут применяться в составе

комбинированных систем в качестве вспомогательных фиксирующих элементов.

Второй, наиболее распространенный класс – гофрированные (сильфонные) вакуумные захваты. Отличительной особенностью их конструкции является наличие волнообразных складок на боковой поверхности. Такое исполнение обеспечивает способность компенсировать углы отклонения оси плода от оси захвата за счет деформации складок, а также выполняет амортизирующую функцию и позволяет смягчить воздействие рабочего органа в момент контакта.

Третий класс образуют мягкие (эластомерные) захваты. В отличие от гофрированных аналогов с заданной формой, данные устройства изготавливаются из высокоэластичных материалов (например, силикона) в виде «чаши» или «воронки». Принцип их действия основан на эффекте облегания плода и под воздействием вакуумного разрежения стенки рабочего органа плотно прижимаются к плоду, адаптируясь к его форме. Это позволяет равномерно распределить усилие по поверхности контакта и минимизировать риск повреждения кожицы плода.

Четвертый класс составляют комбинированные захваты. В таких системах вакуумный элемент выполняет функцию лишь одного из компонентов сложной конструкции. Как правило, вакуум используется для первичной фиксации и подтягивания плода, в то время как окончательное удержание и отделение плодоножки производятся механическими пальцами или режущими элементами, что особенно актуально для плодов с прочным креплением плодоножек к ветвям.

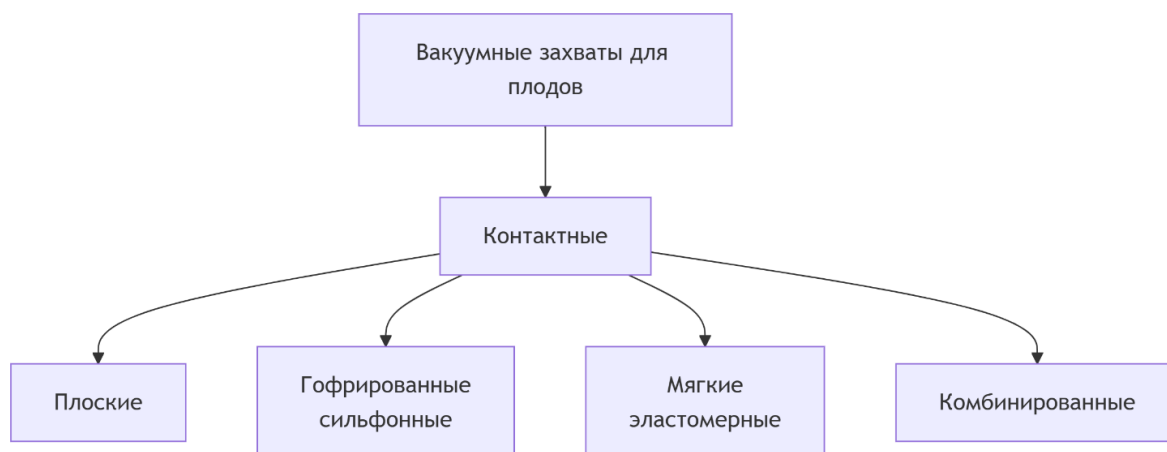


Рисунок 6 – Классификация вакуумных захватов для сбора плодов

Каждый из перечисленных классов захватов может быть дополнительно охарактеризован по материалу изготовления (резина, полиуретан, силикон) и по способу создания вакуума (централизованная вакуумная система либо встроенные эжекторы). Предложенная иерархическая структура позволяет однозначно определить место каждой конструкции в общей системе и обоснованно выбрать наиболее подходящий тип захвата для конкретных условий эксплуатации.

На основе анализа литературных источников [1–8] сформулированы технологические требования к вакуумному захвату, предназначенному для роботизированной уборки яблок.

Геометрические параметры рабочего органа определяются размерным рядом плодов, например, яблоки большинства промышленных сортов имеют диаметр от 55 до 95 мм при массе от 100 до 250 г. Для обеспечения эффективного удержания плода, диаметр присоски должен составлять от 30 до 50 мм. Силовые характеристики захвата определяются усилием, необходимым для отрыва плодоножки от ветви, которое варьируется в пределах от 2 до 5 кгс (20 – 50 Н) с учетом возможных неблагоприятных углов захвата и обеспечения надежного отделения, целесообразно проектировать систему с запасом по усилию [5]. Рабочее

разрежение в вакуумной системе должно поддерживаться в диапазоне от 60 до 90 кПа, при этом расход воздуха должен составлять не менее 100 – 150 л/мин для обеспечения быстрого нарастания усилия удержания в момент контакта с плодом. Конструктивно-эксплуатационные требования включают применение эластомеров с низкой твердостью (силикон, полиуретан), которые не травмируют кожицу плода и обеспечивают высокий коэффициент трения; предпочтительной является гофрированная или воронкообразная форма рабочего органа, позволяющая компенсировать углы отклонения оси плода от оси захвата в пределах 20–30°. Кроме того, конструкция должна предусматривать наличие упругого элемента для демпфирования кинетической энергии при контакте с плодом, а также исключать возможность попадания пыли, листьев и посторонних предметов в вакуумную магистраль, что обеспечивает надежность и бесперебойность функционирования захватного устройства.

Выводы. Проведенный анализ современных конструкций вакуумных захватов для роботизированной уборки яблок подтвердил, что вакуумные рабочие органы являются одним из наиболее перспективных типов захватных устройств для сбора плодов, чувствительных к механическим повреждениям, поскольку они объединяют в себе простоту конструкции, высокое быстродействие и возможность распределения усилия по поверхности плода, что сводит к минимуму риск травмирования. Установлено, что большинство разработок базируется на использовании гофрированных (сильфонных) или мягких силиконовых присосок. Они демонстрируют эффективность применения таких материалов и форм для адаптации к сложной геометрии плода и компенсации погрешностей позиционирования.

На основе функционально-конструктивных особенностей была предложена классификация вакуумных захватов, которая выделяет плоские (вспомогательные), гофрированные (наиболее распространенные),

мягкие эластомерные (воронкообразные) и комбинированные (с механическими элементами), что позволяет систематизировать существующие технические решения и упрощает выбор прототипа для конкретных условий эксплуатации.

Обобщение результатов исследований позволило сформулировать основные технологические требования к проектированию вакуумных захватов для плодов яблони: диаметр рабочего органа должен составлять 30–50 мм; система должна развивать усилие удержания и отрыва до 50 Н при рабочем разрежении от 60 до 90 кПа и расходе воздуха не менее 100–150 л/мин; материал должен быть выполнен из эластомеров с низкой твердостью, а гофрированная или воронкообразная форма должна обеспечивать компенсацию углов отклонения до 20–30° и демпфирование контакта. Современные вакуумные захваты способны обеспечить аккуратный и эффективный съём плодов, а дальнейшее совершенствование таких систем должно быть направлено на повышение надежности отделения плодоножки, сокращение времени цикла и улучшение адаптации к изменчивым условиям внешней среды.

Список использованной литературы

1. Разработка автоматизированного манипулятора с системой компьютерного зрения для сбора урожая садовых культур / Д. О. Хорт, Р. А. Филиппов, А. И. Кутырев, Д. С. Пупин // Плодоводство и ягодоводство России. – 2020. – Т. 60. – С. 151-158. – DOI 10.31676/2073-4948-2020-60-151-158.
2. Робототехнические средства для современного садоводства / А. Ю. Измайлов, И. Г. Смирнов, Д. О. Хорт, Р. А. Филиппов // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. – 2016. – № 2. – С. 131-138.
3. Хорт Д. О. Многофункциональное робототехническое средство с системой технического зрения / Д. О. Хорт, Р. А. Филиппов, А. И. Кутырев // Инновации в сельском хозяйстве. – 2015. – № 4(14). – С. 115-121.
4. «Роботизированный сборщик яблок ABUNDANT». Электронный ресурс. – режим доступа: <https://sustainablefoodplatform.eu/en/innovation/abundant-robotic-apple-picker>. Дата обращения: 24.12.2025
5. Baeten, J. Autonomous fruit picking machine: A robotic apple harvester / J. Baeten, K. Donne, S. Boedrij, W. Beckers, E. Claesen // Field and Service Robotics. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2008. – P. 531-539.

6. Hu G., Chen C., Chen J., Sun L., Sugirbay A., Chen Y., Jin H., Zhang S., Bu L. Simplified 4-DOF manipulator for rapid robotic apple harvesting // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2022. – Vol. 199. – Article 107177. - DOI: 10.1016/j.compag.2022.107177

7. Zhang, K., Lammers, K., Chu, P., Li, Z., & Lu, R. (2021). System design and control of an apple harvesting robot. *Mechatronics*, 102644.

8. Wang, M.; Yan, B.; Zhang, S.; Fan, P.; Zeng, P.; Shi, S.; Yang, F. Development of a Novel Biomimetic Mechanical Hand Based on Physical Characteristics of Apples. *Agriculture* 2022, 12, 1871.

References

1. Razrabotka avtomatizirovannogo manipulyatora s sistemoy kompyuternogo zreniya dlya sbora urozhaya sadovykh kultur / D. O. Khort. R. A. Filippov. A. I. Kutyrev. D. S. Pupin // *Plodovodstvo i yagodovodstvo Rossii*. – 2020. – T. 60. – S. 151-158. – DOI 10.31676/2073-4948-2020-60-151-158.

2. Robototekhnicheskiye sredstva dlya sovremennogo sadovodstva / A. Yu. Izmaylov. I. G. Smirnov. D. O. Khort. R. A. Filippov // *Vestnik Michurinskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. – 2016. – № 2. – S. 131-138.

3. Khort D. O. Mnogofunktsionalnoye robototekhnicheskoye sredstvo s sistemoy tekhnicheskogo zreniya / D. O. Khort. R. A. Filippov. A. I. Kutyrev // *Innovatsii v selskom khozyaystve*. – 2015. – № 4(14). – S. 115-121.

4. «Robotizirovanny sborshchik yablok ABUNDANT». Elektronnyy resurs. – rezhim dostupa: <https://sustainablefoodplatform.eu/en/innovation/abundant-robotic-apple-picker>. Data obrashcheniya: 24.12.2025

5. Baeten, J. Autonomous fruit picking machine: A robotic apple harvester / J. Baeten, K. Donne, S. Boedrij, W. Beckers, E. Claesen // *Field and Service Robotics*. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2008. – P. 531-539.

6. Hu G., Chen C., Chen J., Sun L., Sugirbay A., Chen Y., Jin H., Zhang S., Bu L. Simplified 4-DOF manipulator for rapid robotic apple harvesting // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2022. – Vol. 199. – Article 107177. - DOI: 10.1016/j.compag.2022.107177

7. Zhang, K., Lammers, K., Chu, P., Li, Z., & Lu, R. (2021). System design and control of an apple harvesting robot. *Mechatronics*, 102644.

8. Wang, M.; Yan, B.; Zhang, S.; Fan, P.; Zeng, P.; Shi, S.; Yang, F. Development of a Novel Biomimetic Mechanical Hand Based on Physical Characteristics of Apples. *Agriculture* 2022, 12, 1871.