

АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ КОНФИГУРАЦИИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО ЗАХВАТА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ

ALGORITHMIC MODEL FOR CHOOSING CONFIGURATION PARAMETERS FOR ROBOTIC GRIPPING OF AGRICULTURAL PRODUCTS OPERATION ON THE QUALITY AND YIELD OF GRAIN

Д.К. ВУ
А.Л. РОНЖИН

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия, ronzhin@iias.spb.su

D.K. VU
A.L. RONZHIN

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia, ronzhin@iias.spb.su

Обсуждается решение проблемы автоматизации процесса сбора сельскохозяйственной продукции на основе моделей, алгоритмов и многокритериального синтеза конфигурации робототехнического захвата и управления его программно-аппаратными компонентами при физических манипуляциях с объектами агропродукции. Выполнение монотонных физически тяжелых операций в сельскохозяйственном производстве ведет к риску расстройства опорно-двигательного аппарата работников, поэтому применение робототехнических средств для физического контакта и манипуляций с объектами в сельскохозяйственном производстве является актуальной задачей, обеспечивающей снижение себестоимости продукции, повышение качества выполняемых операций и безопасности труда привлекаемых специалистов. Вариативность физических и геометрических характеристик плодов и способов их сбора не позволяет создать универсальные робототехнические захваты, поэтому на текущий момент ведутся активные исследования по проектированию робототехнических захватов для манипуляций с плодами отдельных культур, различающимися по весу, плотности, геометрии, шероховатости поверхности и другим параметрам.

В статье описана разработанная концептуальная модель управления робототехническим захватом, включающая описание манипулятора, захвата, сенсорной системы и манипулируемого объекта сельскохозяйственной продукции с разнообразными формами, физико-механическими свойствами. Проанализированы физико-механические свойства некоторых овощей и фруктов, способы их отрезания плода, которые следует учитывать при разработке робототехнических захватов. Обсуждается четырехэтапная методика определения параметров робототехнического захвата, включающая определение характеристик объекта манипуляции, характеристик рабочей среды, определение особенностей манипулятора, на котором планируется установить захват, и оценивание эффективности проектируемого захвата по ряду критериев. Приведена разработанная алгоритмическая модель выбора параметров конфигурации робототехнического захвата сельскохозяйственной продукции, обеспечивающая на основе анализа свойств манипулируемого объекта разработку требований, предъявляемых к конфигурации и системе управления захватом.

Ключевые слова: робототехнический захват, агрозахват, антропоморфные захваты, манипуляторы, агророботы, сельскохозяйственная продукция.

Для цитирования: Ву Д.К., Ронжин А.Л. Алгоритмическая модель выбора параметров конфигурации робототехнического захвата сельскохозяйственной продукции // Тракторы и сельхозмашины. 2020. № 6. С. 78–90. DOI: 10.31992/0321-4443-2020-6-78-90.

The solution to the problem of automating the process of collecting agricultural products based on models, algorithms and multicriteria synthesis of the configuration of robotic capture and control of its software and hardware components during physical manipulations with objects of agricultural products is discussed. Performing monotonous physically difficult operations in agricultural production leads to the risk of disorders of the musculoskeletal system of workers, therefore, the use of robotic means for physical contact and manipulation with objects in agricultural production is an urgent task that ensures a reduction in the cost of production, an increase in the quality of operations performed and the labor safety of involved specialists.

The variability of the physical and geometric characteristics of the fruits and the methods of their collection does not allow the creation of universal robotic grippers, therefore, active research is currently underway on the design of robotic grippers for manipulating the fruits of individual crops, differing in weight, density, geometry, surface roughness and other parameters. The article describes the developed conceptual model of robotic gripper control, including the description of the manipulator, gripper, sensor system and the manipulated object of agricultural products with various forms, physical and mechanical properties. The article analyzes the physical and mechanical properties of some vegetables and fruits, methods of cutting off the fruit, which should be taken into account when developing robotic grippers. There were discussed a four-stage technique for determining the parameters of robotic gripping,

including determining the characteristics of the manipulated object; characteristics of the working environment; determination of the features of the manipulator on which the gripper is planned to be installed, and evaluation of the efficiency of the projected gripper according to a number of criteria. The developed algorithmic model of the choice of configuration parameters for robotic gripping of agricultural products is presented. It provides, based on the analysis of the properties of the manipulated object, the development of requirements for the configuration and gripping control system.

Keywords: robotic gripper, agro-gripper, anthropomorphic grippers, manipulators, agro-robots, agricultural products.

Cite as: D.K. Vu, A.L. Ronzhin Algorithmic model for choosing configuration parameters for robotic gripping of agricultural products. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2020. No 6, pp. 78–90 (in Russ.). DOI: 10.31992/0321-4443-2020-6-78-90.

Введение

Теоретические и прикладные исследования по роботизированной уборке фруктов и овощей привели к созданию прототипов роботов для различных видов сельскохозяйственной продукции: томаты [1–5], огурцы [6–9], клубника [10–13], томаты черри, сладкий перец, баклажаны и фруктовый сад: яблоко [14–15], цитрусовые [16].

Томаты являются наиболее популярными овощами, ежегодно в мире их производится 177,04 млн тонн. Поэтому автоматическая уборка томатов стала перспективной альтернативой ручной уборке, и были инициированы исследования по разработке роботов для уборки томатов. В работе [1] разработан роботизированный сборщик томатов для непрерывного селективного сбора зрелых томатов. Цель этого проекта состояла в том, чтобы разработать сенсорный блок и роботизированный ручной блок, который можно было бы интегрировать с коммерческим роботизированным манипулятором для автоматизированного сбора урожая томатов. 6-осевой шарнирный робот-манипулятор URJ имеет внутреннюю схему электрических и пневматических линий. В среднем время цикла сбора и размещения одного томата составило приблизительно 3 мин 47 с, включая время, необходимое для машинного зрения. Показатели успешности распознавания и сбора плодов томатов были выше 95 и 85 % соответственно.

В работе [2] описан робот для сбора фруктов, состоящий из подвижной платформы, системы технического зрения, манипулятора и захвата. Результаты исследования показали, что в 73 % случаев робот успешно автоматически определял объект для захвата на основных стеблях гроздей томатов из 100 %, которые были визуально идентифицированы человеком.

В работе [3] спроектирован и разработан автономный робот для уборки томатов, который состоит из ротационного захватного устрой-

ства, манипулятора 6-DOF, стереокамеры и наземной платформы с всенаправленными колесами. При неудачной уборке томатов выделяются три основных типа проблемных случаев: 1) томат не оказался в захвате, 2) томат успешно собран, но частично поврежден, 3) несколько томатов одновременно оказались в захвате. Средняя длительность одного цикла наведения, захвата и съема томата составляла 23 с, а общий процент успешной работы – 60 %.

Робот с двумя манипуляторами был разработан в работе [4] для уборки томатов в теплице. Робот содержит следующие модули: сменные захваты модульного типа, система видеонаблюдения со стереоскопической камерой, система связи и управления и пользовательский интерфейс. Результаты полевых испытаний показали эффективность разработанной робототехнической системы, но также были обнаружены некоторые недостатки робота.

В работе [5] рассмотрен робот для уборки томатов, который состоит из независимой системы рулевого управления с четырьмя колесами, системы сбора урожая с 5-DOF, навигационной системы и бинокулярной системы стереозрения. Из-за ограниченного рабочего пространства в теплице выбранный манипулятор 5-DOF состоит из механической штанги 4-DOF и захвата 1-DOF. Точность системы бинокулярного зрения при распознавании спелых томатов составила 99,3 %. При расстоянии менее 600 мм ошибка позиционирования составляла менее 10 мм. Время, необходимое для распознавания спелых томатов и захвата, составляло около 15 с на томат с вероятностью успешного сбора около 86 %.

По сравнению с уборкой томатов задача робототехнической уборки плодов огурца является более сложной. Зеленый цвет зрелого огурца соответствует цвету листьев и стеблей и затрудняет распознавание плодов. Кроме того, огурец – это вид культуры, который растет в подвешенном состоянии и плоды ко-

того обычно колеблются в воздухе, поэтому его трудно захватить при сборе урожая. В тоже время плод обладает достаточной твердостью, и поэтому огурец является одной из наиболее типичных культур среди фруктов и овощей для исследований робототехнических захватов.

В работе [7] создана концепция автономного робота для уборки огурцов в теплицах. Он состоит из автономного транспортного средства, манипулятора с 7-DOF, рабочего органа, двух систем видеонаблюдения и различного электронного и пневматического оборудования. Рабочий орган включает в себя захват и всасывающий стакан для схватывания фруктов, а также устройство термической резки для отделения плодов от растения. На испытаниях в теплицах в 74,4 % случаев робот успешно снимал плоды [8]. В среднем один успешный цикл сбора плода занимал 65,2 с. Также испытания подтвердили способность собирать более одного огурца с использованием одного набора изображений, что позволило сократить время цикла успешного сбора урожая до 56,7 и 53,0 с, если было собрано два или три огурца соответственно.

В работе [9] описано исследование в области роботизированной техники для уборки огурцов, включая схему выращивания огурцов, конструирование и производство роботов, анализ кинематики роботов и систему управления роботами. Робот состоит из манипулятора с 6-DOF и захвата с одной степенью свободы для срезания плода. Испытания по сбору огурцов показали удовлетворительную точность позиционирования уборочного робота, успешное отрезание и захват огурцов в 93 % случаев.

Представленный в работе [8] робот для сбора огурцов состоит из автономной подвижной платформы, системы распознавания плодов, манипулятора, гибкого захвата и энергетической системы. Робот использует компактный интеллектуальный шарнирный манипулятор с 4-DOF. Тепличные испытания показали, что робот может динамически распознавать, определять пространственное положение и собирать зрелые огурцы; успешная уборка была достигнута в 85 % случаев. Среднее время сбора одного огурца составило 28,6 с.

Сбор урожая клубники является трудной физической работой, которая часто приводит к серьезным проблемам со здоровьем рабочих

и составляет более половины общих затрат производства данной сельскохозяйственной культуры. Поэтому автоматический сбор урожая является актуальной задачей для клубничной промышленности. Исследования роботов по уборке клубники привели к практическим результатам во многих странах, таких как Япония [10, 12, 13], Китай [17], Корея [18], Россия [19, 20].

В 2000 г. Университет Миядзаки (Miyazaki University) запустил проект по разработке автоматического робота для уборки клубники [10]. Робот состоит из каркаса с установленными на нем четырьмя выщипывающими манипуляторами с захватами, двух цветных ПЗС-камер для управления системой наведения захватов. Каждый захват использует пневматический механизм, который перемещает параллельные пальцы. Для процессов выщипывания и отрезания пальцами применяется сжатый воздух разного давления. Оптимальное давление воздуха составляло от 0,09 до 0,17 МПа для процесса выщипывания и более 0,23 МПа для процесса отрезания. При тестировании робота точность сбора клубники достигала 100 %.

В работе [12] апробирован робот для уборки клубники, состоящий из цилиндрического манипулятора с 3-DOF, захвата, блока технического зрения, блока хранения и блока перемещения собранной продукции. При проведении уборочных испытаний в полевых условиях средний показатель успешности составил 41,3 % для сбора клубники путем всасывания. В работе [13] разработана уборочная робототехническая платформа для сбора клубники, оснащенная модульными системными блоками, которые можно индивидуально настраивать. При эксплуатационном тестировании в теплице дополнительно автоматически оценивалась зрелость плода, а установка параметра зрелости на уровне 70–80 %, необходим для снятия клубники, привела к более высоким показателям успешного сбора (97,3 %), чем при настройке зрелости на уровне 60 %.

В работе [17] разработан автономный робот для уборки клубники, выращенной в настольных системах. Уборочный робот состоял из четырех основных компонентов: автономного транспортного средства, манипулятора с четырьмя степенями свободы, захвата с двумя степенями свободы и системы цветного компьютерного зрения. Для повышения скорости работы системы был разработан многофункци-

ональный захват с ножницами. Максимальная скорость робота составляла 1000 мм/с и снижалась примерно до 250 мм/с, чтобы предотвратить повреждение плода. Время сбора урожая на одну единицу составляло около 7 с.

Робот с 6-DOF манипулятором для уборки клубники, представленный в работе [18], состоит из мобильной платформы с четырьмя колесами, манипулятора, захвата, блока бинокулярного зрения, контейнера для собранной продукции. Манипулятор Denso VS-6556G был установлен на транспортном средстве на высоте 500 мм от земли. Пневматический захват содержит два пальца для захватывания плодоножки и электрический термический нож для разрезания плодоножки. Функциональное испытание в теплице показало, что роботизированная система сбора урожая успешно собрала 86 из 100 зрелых плодов; для сбора одной клубники требовалось в среднем 31,3 с.

Разработка робота для уборки яблок связана с анализом сложных уличных условий, сложной структурой дерева, необходимой деликатностью при манипуляциях с продукцией, разнообразием форм и размеров плодов.

В работе [14] разработан робот для уборки яблок, состоящий из мобильного транспортного средства, манипулятора, захвата и системы технического зрения. Манипулятор со структурой 5-DOF был спроектирован так, чтобы избежать препятствий при движении к объекту. Захват в форме ложки сконструирован в соответствии с биологическими характеристиками сферических плодов, которые собираются путем разрезания плодоножки. Результаты полевых испытаний показали, что среднее время распознавания и снятия плода составило 15,4 с, а показатель успешности – 77 %.

В работе [15] спроектирована роботизированная система уборки яблок для современных систем яблоневых садов с V-решетчатой архитектурой плодоносящей стены в штате Вашингтон, США. Система включает в себя манипулятор с 6-DOF степенями свободы, систему видеонаблюдения с одной цветной ПЗС-камерой и времяпролетной камерой (ToF). Результаты экспериментов в лаборатории показали, что успешная уборка была произведена в 56 % случаев, а время цикла составляло 8 с на яблоко, что значительно медленнее, чем при ручной сборке плодов.

Робот для сбора яблок, разработанный в рамках проекта CROPS (www.crops-robots.eu)

в ЕС [21], состоит из платформы, манипулятора с 9 степенями свободы, захвата и системы наблюдения. Для уборки яблок в саду, где была сделана специальная обрезка для облегчения функционирования робота, были получены следующие результаты: 100 % точности обнаружения, 90 % успешности захвата и 72 % успешности уборки. Время цикла составляло 15–30 с на яблоко, в зависимости от применяемой транспортной системы для собранных фруктов.

Робот SWEEPER для сбора сладкого перца, описанный в работе [22], имеет 6 степеней DOF-манипулятор, установленный на мобильной платформе; показал успешный сбор спелых плодов в 49 % случаев. Время сбора одного плода составляло от 18 до 25 с, включая в среднем 4,73 с для перемещения платформы, 3,71 с для локализации плода, 3,02 с для локализации препятствий, 4,03 с для наведения захвата, 2,22 с для отделения плода и 7,77 с для переноса плода в контейнер.

Робот Harvey [23] для уборки сладкого перца состоит из мобильной платформы, манипулятора 7-DOF и RGB-D камеры, установленной на захвате. Положение каждого перца рассчитывается с использованием сегментированного трехмерного облака точек. Специальный захват использует всасывающий механизм и нож для срезания плода. Время сбора составляло 30–40 с, включая общее время выполнения сканирования сладкого перца (приблизительно 15 с), корректировку модели плода, планирование движения манипулятора и захвата (5–10 с), реализацию уборки одного плода (10–15 с).

Другие робототехнические решения для уборки томатов черри, баклажанов, цитрусовых представлены в работах [24–26] и сведены в табл. 1. Робот для уборки томатов черри в работе [25] состоит из автономной транспортной платформы, манипулятора с 6 степенями свободы, захвата, блока стереозрения, сборщика фруктов и его контроллера. Результаты полевых испытаний показали, что робот может успешно собрать 83 % зрелой продукции со временем одного успешного цикла уборки в 8 с без учета времени на перемещение транспортной платформы.

Робот для уборки баклажанов, описанный в работе [21], использует манипулятор 7-DOF. Точность обнаружения плодов составила 69,3 %. Ошибки обнаружения были связаны с определением плодов на соседнем растении, наличием низкорослых плодов, сливающихся по цвету

Оценка эффективности роботов для уборки фруктов
Table 1. Evaluation of the effectiveness of robots for harvesting fruits

Фрукты	Исследования	Показатели эффективности		Технические характеристики	
		Время цикла, с	Успешный сбор плодов, %	DOF	Сенсоры
Томат	Япония [2]	–	72	6	Цветная TV-камера
	США [1]	227	85	6	Цветная миникамера DXC-LS1
	Япония [3]	23	60	6	3D-стереокамера
	Китай [4]	–	–	5	Стереоскопическая камера
	Китай [5]	15	86	5	LMS151 лазерный сканер
Огурец	Нидерланды [7], [8]	65,2	74,4	7	CCD-камера
	Китай [9]	28,6	85	4	UM-300 CCD-камера
Клубника	Япония [10]	–	100	4	CCD-камера
	Япония [12]	32,3	80	3	CCD-камера
	Корея [17]	7	–	4	Цветная ПЗС-камера
	Китай [18]	31,3	86	6	Биноккулярная камера
Яблоко	ЕС [21]	30	72	9	TOF-камера
	Китай [14]	15,4	77	5	CCD-камера
	США [15]	8	56	6	CCD-камера, ToF-камера
Сладкий перец	ЕС [22]	25	49	6	RGB-D камера
	Бельгия [23]	45	92	6	RGB-Dкамера
	ЕС [21]	94	33	9	RGB- и TOF-камеры
Томат черри	Китай [25]	8	83	6	Камера, лазерный дальномер
Баклажан	Япония [26]	–	–	7	Цветная CCD-камера
Цитрусовые	США [16]	–	–	7	Цветная CCD-камера

с грунтом, и теней. Время уборки, которое включает перемещение, обработку изображения и движение манипулятора в пределах 4 м в длину и 1,7 м в высоту, составило 317 с.

Робот для уборки цитрусовых с манипулятором 7-DOF был разработан и испытан в Флориде, США [16]. Среди российских исследований в области роботизации сельскохозяйственного производства следует отметить результаты, описанные в работах [27, 28].

Цель исследований

Автоматизация процесса сбора сельскохозяйственной продукции за счет разработки моделей, алгоритмов и многокритериального синтеза конфигурации робототехнического захвата и систем управления его программно-аппаратными компонентами при физических манипуляциях с объектами агропродукции.

Материалы и методы

Определение параметров конфигурации и системы управления захватом является сложной многофакторной задачей. При про-

ектировании конфигурации захвата следует учитывать положение и ориентацию объекта, с которым будут производиться манипуляции. При составлении спецификации производимых манипуляций определяют максимальные ускорения движения элементов захватов в зависимости от местоположения объекта, а также давление, необходимое и допустимое для его манипулирования. Во многих случаях необходимо учитывать и другие факторы, влияющие на защиту захвата от столкновений, перегрузок и повреждение объекта из-за чрезмерного сжатия или выпадения из захвата. Все эти соображения влияют не только на захват, но и на выбор манипулятора.

Механическое повреждение фруктов в основном наносится во время уборки урожая в полевых условиях, но также происходит на линиях сортировки и упаковки, во время транспортировки и при обработке в конце цепочки поставок, например во время демонстрации и отбора продуктов розничными продавцами и потребителями [29]. Механическое повреждение может привести к структурному,

тканевому и клеточному повреждению плодов, вызванному ударом, сжатием, истиранием, прокалыванием, тестированием или несколькими действиями в сочетании. Структурные повреждения могут увеличить восприимчивость к распаду и росту микроорганизмов [30].

В табл. 2 представлен анализ механических повреждений сельскохозяйственной продукции и их причины.

Для определения параметров захвата и их значений, необходимо проанализировать ряд факторов, таких как: 1) характеристики объекта манипуляций; 2) рабочая среда в которой находится объект и производятся операции; 3) особенности манипулятора, на котором планируется установить захват; 4) критерии по которым следует оценивать эффективность практических операций, выполняемых посредством робототехнического захвата.

На рис. 1 представлены основные шаги разработанной методики проектирования захвата для манипуляций с сельскохозяйственной продукцией.

Первым шагом в разработке захвата является определение физических и механических свойств захватываемого объекта. Физические свойства являются основным фактором, определяющим габариты и тип привода захвата. Масса объекта используется для расчета сил и моментов, действующих на захват и манипулятор, а габариты объекта используются для расчета размеров элементов конфигурации

захвата. Объект также может быть очень разнообразен по форме и свойствам поверхности, поэтому выбор метода манипуляции должен основываться на характеристиках конкретного объекта. Механические свойства плодов играют важную роль в расчете сил, действующих на фрукты и овощи во время сбора урожая, помогая избежать их повреждения.

На втором этапе проектирования захвата необходимо определить среду, в которой он будет работать, – на закрытом или открытом грунте. Рабочая среда на открытом грунте намного сложнее, чем в условиях теплиц; например, влажность и освещение меняются с течением времени, что снижает качество получаемого изображения и, соответственно, производительность сбора. При стабильных условиях освещения робот может круглосуточно работать в теплице. Следовательно, при изготовлении захвата, а также всего робота в целом необходимо учитывать конкретные условия внешней среды, в которой выполняется агротехнологическая задача.

На следующем этапе необходимо определить рабочие параметры манипулятора, подходящие для характеристик растения и собираемых плодов. Для культур с распределением плодов на разной высоте и с множеством препятствий на пути к ним манипулятору требуется совершать более сложное движение, и его конструкция должна содержать большее число степеней свободы. Однако с увеличением числа степеней свободы возрастают вычислительные затра-

Таблица 2

Виды механических повреждений сельскохозяйственной продукции при манипуляциях

Table 2. Types of mechanical damage to agricultural products during handling

Вид	Описание причины	Тип повреждения
Ударное повреждение (повреждение при ударе)	Ударное повреждение возникает во время сбора урожая, когда объект ударяется о некоторую поверхность с достаточной силой	Вмятина или трещина плодов
Сжатое повреждение (повреждение от сжатия)	Сжатое повреждение возникает, когда силы захватывания механического сбора урожая превышают порог разрушения ткани	Вмятина или трещина плодов
Абразивное повреждение (повреждение от истирания)	Истирание происходит при транспортировке одного объекта с чрезмерной скоростью против другого объекта, например, на конвейерах	Разрушение поверхностных слоев плодов
Проколотое повреждение (прокол)	Прокол может произойти во время сбора урожая и манипулирования сыпучими фруктами, когда стебли собранных фруктов перфорируют кожу соседних фруктов	Разрушение поверхностных слоев плодов
Резаное повреждение (порез)	Резаные повреждения могут произойти во время сбора урожая в случае неточного наведения инструментов или несоответствия размеров обрабатываемого плода и инструментов	Разрушение поверхностных слоев плодов



Рис. 1. Методика проектирования захвата для манипуляций сельскохозяйственной продукцией

Fig. 1. Gripper design technique for handling agricultural products

ты на расчет его движения и стоимость самого манипулятора. Например, в табл. 1 показано, что количество степеней свободы в манипуляторах, используемых при уборке томатов, выбирается 5 или 6.

После анализа и выбора конфигурации захвата последним шагом является оптимизация размера захвата. Проблема многокритериальной оптимизации конфигурации захвата осложняется тем, что следует удовлетворить противоречивые требования по физико-механическим, энергетическим, вычислительным и другим аспектам проектируемого манипулятора.

В табл. 3 представлены физико-механические свойства некоторых овощей и фруктов, которые по анализу современных публикаций собираются робототехническими захватами.

На рис. 2 представлена общая концептуальная модель выбора параметров захвата. Факторы окружающей среды, такие как расположение объекта среди других, плотность распределения объектов, также напрямую влияют на производимые манипуляции. Использование в сенсорной системе комбинации гетерогенных датчиков увеличивает производительность обнаружения и распознавания объектов.

Таблица 3

Физико-механические свойства овощей и фруктов
Table 3. Physical and mechanical properties of vegetables and fruits

Объекты	P_0					M_0					
	m_0 , г	V_0 , см ³	D_0			f_0^r , Н	E , МПа	$c_0^{s,f}$		$c_0^{d,f}$	
			D , мм	L , мм	W , мм			сталь	резина	сталь	пластик
Яблоко											
Redspar	228,7	275,1	79,5	74,7	83,8	–	2,53	0,28	0,31	–	–
Delbarstival	118,4	143,1	63,3	58,3	67,0	–	1,77	0,34	0,44	–	–
Гранат	227,5	–	80,1	87,4	80,8	40,7	–	–	–	–	–
Абрикос											
Nasiry	43,3	23,3	34,8	36,9	35,4	–	0,32	–	–	–	–
Ghavami	27,7	26,2	35,4	36,9	34,1	–	0,51	–	–	–	–
Raja Bali	53,6	45,6	44,0	48,5	43,3	–	0,53	–	–	–	–
Опунция	109,5	89,9	59,6	71,9	57,5	–	–	0,24	0,29	–	–
Devsci	289,8	256,0	85,1	87,5	83,9	39,5	–	0,48	–	–	–
Santa Maria	190,3	189,6	76,1	107,2	64,2	23,0	–	0,41	–	–	–
Перец											
Желтый	122,2	271,1	75,6	71,5	78,6	38,2	–	0,26	–	0,81	0,99
Красный колокол	217,9	382,6	85,0	95,3	82,0	85,0	–	0,19	–	0,73	0,82
Зеленый колокол	112,8	194,3	69,3	74,4	70,4	85,0	–	0,29	–	0,76	0,93
Красный чили	91,0	194,3	68,0	155,3	70,4	68,0	–	0,48	–	0,99	0,90
Зеленый чили	61,2	194,3	57,3	139,5	38,2	57,3	–	0,35	–	0,89	0,97
Авокадо	217,2	36,6	88,7	132,5	80,7	49,8	0,63	0,36	0,47	0,34	0,45
Киви	98,6	83,1	54,0	68,0	50,2	–	–	0,43	–	–	–
Сладкая вишня											
Иранская	4,5	3,9	18,6	20,1	18,9	–	–	0,21	0,29	–	–
Турецкая	72,0	66,5	49,0	59,4	46,2	–	–	0,15	0,16	–	–
Томат	100,7	98,9	56,2	61,9	53,8	42,8	–	0,43	0,39	0,51	0,43
Томаты черри	–	–	–	–	–	–	0,25	0,16	0,185	0,156	0,177
Апельсин	214,7	213,2	76,2	83,0	76,2	–	–	76,2	–	–	–
Огурец	351,3	343,7	61,8	210,5	–	–	–	–	–	–	–
Баклажан	280,3	–	71,2	185,2	–	11,7	–	0,44	–	–	–

В промышленной робототехнике на захватных механизмах широко применяются электрические, гидравлические, пневматические приводы для реализации линейных или вращающихся движений.

Гидравлические приводы нуждаются в сложной внешней системе управления, позволяющей регулировать скорость и давление, но являются тяжелыми и слишком медленными. Поэтому гидравлические приводы используются на захватах, когда необходимы большие силы при манипуляциях с крупными тяжелыми объектами. Пневматические приводные системы используются преимущественно для роботов малого типа, которые имеют менее пяти степеней свободы. Они обладают способностью обеспечивать высокую точ-

ность и скорость. Эта система привода может производить вращательные движения за счет приведения в действие поворотных приводов. Поступательные движения шарниров также могут быть обеспечены за счет приведения в действие поршня. Стоимость таких систем меньше по сравнению с гидравлическим приводом, а недостатком этой системы является невысокая скорость операций. Электрические приводы оснащаются датчиками положения, ускорения и усилия, что увеличивает возможности управления захватом, но они дороже, чем пневматические системы.

При манипуляции с сельскохозяйственной продукцией не требуется большой мощности для привода, учитывая ее относительно небольшие размеры и вес, но необходимы ком-

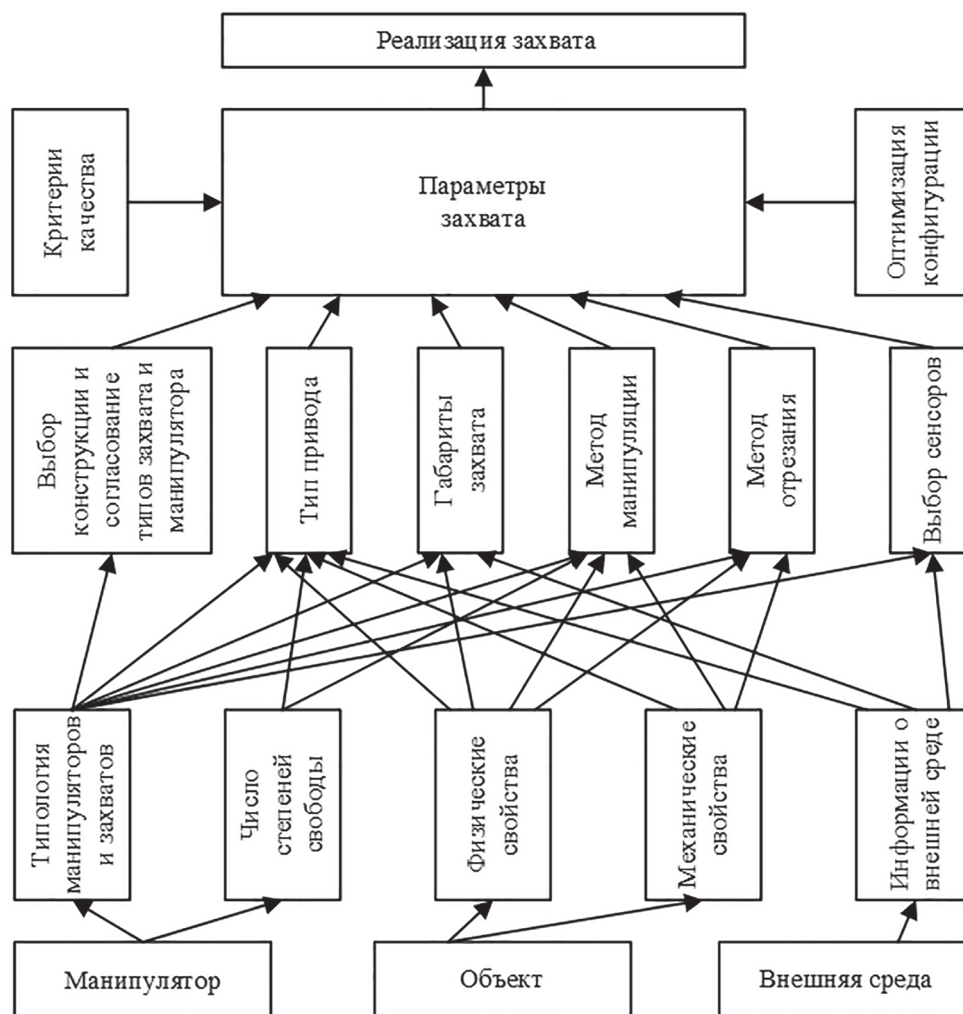


Рис. 2: Общая концептуальная модель выбора параметров захвата

Fig. 2. General conceptual model for the selection of capture parameters

Таблица 4

Методы и устройства для отрезания плодов при сборе

Table 4. Methods and devices for cutting off fruits during collection

Объекты	Способы снятия плода		Рекомендуемые типы устройства отрезания			
	разделка плодоножки	выщипывание плодов	механический	тепловой	лазерный	всасывающее сопло
Яблоко	–	х	х	–	–	х
Гранат	–	х	х	–	–	х
Абрикос						
Опунция		х	х	–	–	–
Перец	х	х	х	–	–	х
Авокадо		х	х	–	–	х
Киви		х	х	–	–	х
Сладкая вишня	х	–	х	–	–	–
Томат	х	х	х	х	х	х
Томаты черри	х	х	х	х	х	х
Апельсин		х	х	–	–	х
Огурец	х	–	х	х	х	х
Баклажан	х	х	х	–	–	х

пактность и точность управления, обеспечивающие захват и снятие продукции без ее повреждения. Одним из решающих элементов в захвате является привод, обеспечивающий его функционирование.

Мягкие робототехнические захваты являются новым направлением в этой области, и они оказались достаточно эффективными для решения задач манипуляции объектов со сложными геометрическими и физическими свойствами [31]. Это происходит из-за их способности к манипуляциям с неровными и неструктурированными объектами и возможности рассеивать импульсные силы, возникающие во время захвата. При проектировании мягких захватов возможно использование 5 видов двигателей, таких как: 1) сплав с памятью формы; 2) эластомерный привод; 3) полимер с памятью формы; 4) диэлектрический

полимер с электроприводом и 5) магнитные / электромагнитные приводы. Текущие проблемы исследований мягких робототехнических захватов связаны с их низкой скоростью, сложностью интеграции сенсорной и активационной систем.

Способы отрезания плода, реализуемые в захватах для сбора фруктов и овощей, можно классифицировать на разрезание плодоножки и выщипывание плодов. В табл. 4 приведены способы отрезания плодов и типы отрезных устройств, используемых на сборочных агро-роботах.

Результаты и обсуждение

От корректности формулировки требований конфигурации механизма захвата зависит качество и скорость проектирования, поскольку при синтезе структурно-функциональных моделей и принципов системы управления захватом важны характеристики плода, а также с какой целью производится манипуляция. На рис. 3 представлена общая блок-схема алгоритмической модели процесса проектирования робототехнического захвата.

По результатам анализа характеристик захватываемых объектов в первом блоке осуществляется выбор подходящего типа механизма захвата, описываются его конструктивные ограничения и эксплуатационные характеристики на основе кинематической схемы мехатронной системы захвата поведения и показателей ее производительности, в том числе сила захвата. Во втором блоке производится формулировка основных характеристик захвата, которые влияют на определение целевых функций, используемых при оптимизации, в том числе с использованием уравнений равновесия сил и моментов, действующих на захват. В следующем блоке анализируются критерии оптимизации, влияющие на выбор параметров конфигурации захвата, в том числе длину звеньев, углы между звеньями захвата и манипулятора. По результатам оптимизации захвата производится формирование проектной документации и последующее изготовление.

На основе анализа свойств объекта производится разработка требований, предъявляемых к конфигурации и системе управления захватом. В частности, анализ геометрических параметров объекта позволяет сформулировать требования к структурной модели захвата.

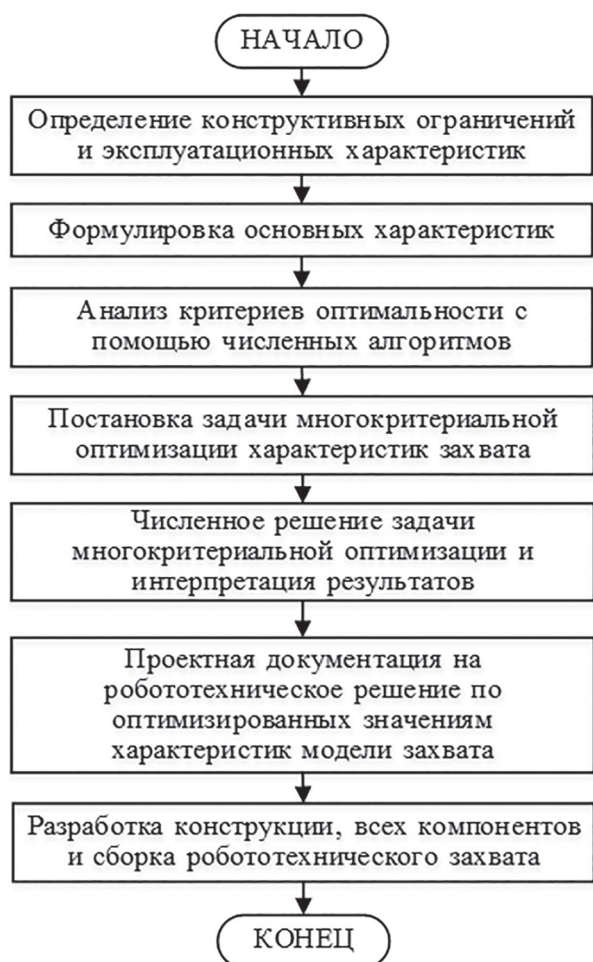


Рис. 3. Алгоритмическая модель процесса проектирования робототехнического захвата

Fig. 3. Algorithmic model of the robotic gripper design process

Выводы

Выполнение монотонных физически тяжелых операций в сельскохозяйственном производстве ведет к риску расстройства опорно-двигательного аппарата работников, а в некоторых случаях – заражению химическими препаратами. Поэтому применение робототехнических средств для физического контакта и манипуляций с объектами в сельскохозяйственном производстве является актуальной задачей, обеспечивающей снижение себестоимости продукции, повышение качества выполняемых операций и безопасности труда привлекаемых специалистов. Вариативность физических и геометрических характеристик плодов и способов их сбора не позволяет создать универсальные робототехнические захваты, поэтому на текущий момент ведутся активные исследования по проектированию робототехнических захватов для манипуляций с плодами отдельных культур, различающимися по весу, плотности, геометрии, шероховатости поверхности и другим параметрам.

Предложена концептуальная модель управления робототехническим захватом, включающая описание манипулятора, захвата, сенсорной системы и манипулируемого объекта сельскохозяйственной продукции с разнообразными формами, физико-механическими свойствами.

Предложена четырехэтапная методика определения параметров робототехнического захвата, включающая определение характеристик объекта манипуляции, характеристик рабочей среды, особенностей манипулятора, на котором планируется установить захват, и оценивание эффективности проектируемого захвата по ряду критериев.

Дальнейшее исследование будет ориентировано на реализацию разработанных моделей, алгоритмов и программных средств при проектировании захватов в сельском хозяйстве и других отраслях с применением дополнительных типов датчиков для увеличения точности и качества захвата манипулируемых объектов.

Литература

1. Peter L., Reza E., Ting K.C. Sensing and end-effector for a robotic tomato harvester // 2004 ASAE Annual Meeting. 2004.
2. Naoshi K., Kazuya Y., Hiroshi S., Koki Y. A machine vision system for tomato cluster harvesting

robot // Engineering in Agriculture, Environment and Food. 2009. Vol. 2. № 2. С. 60–65.

3. Hiroaki Y., Kotaro N., Takaomi H., Masayuki I. Development of an autonomous tomato harvesting robot with rotational plucking gripper // 2016 IEEE. RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2016.
4. Yuanshen Z., Liang G., Chengliang L., Yixiang H. Dual-arm robot design and testing for harvesting tomato in greenhouse // IFAC-PapersOnLine. 2016. Vol. 49. №. 16. С. 161–165.
5. Wang L. L., Zhao B., Fan J. W., Hu X. A., Wei S. Development of a tomato harvesting robot used in greenhouse // International Journal of Agricultural and Biological Engineering. 2017. Vol. 10. №. 4. С. 140–149.
6. Ji C. Feng Q., Yuan T., Tan Y., Li W. Development and performance analysis on cucumber harvesting robot system in greenhouse // Robot. 2011. Vol. 33. №. 6.
7. Van Henten E., Hemming J., van Tuijl B., Kornet J.G., Meuleman J., Bontsema J., E. van Os A. An autonomous robot for harvesting cucumbers in greenhouses // Autonomous Robots. 2002. Vol. 13. С. 241–258.
8. Van Henten E. J., Van Tuijl B. A., Hemming J., Kornet J. G., Bontsema J., Van Os E. A. Field test of an autonomous cucumber picking robot // Biosystems Engineering. 2003. Vol. 86. №. 3. С. 305–313.
9. Xiuying T., Tiezhong Z., Ling L., Dan X., Yizhe C. A new robot system for harvesting cucumber // Reno. 2008.
10. Masateru N., Kenji H., Qixin C., Shinji M., Kanshi O. Basic study on strawberry harvesting robot (Part II): Design and development of harvesting mechanism // IFAC Proceedings Volumes. 2000. Vol. 33. №. 29. С. 55–59.
11. Qingchun F., Xiu W., Wengang Z., Quan Q., Kai J. A new challenge of robot for harvesting strawberry grown on table top culture // Int J Agric & Biol Eng. 2012. Vol. 5. №. 2. С. 1.
12. Shigehiko H., Kenta S., Satoshi Y., Ken K., Yasushi K., Junzo K., Mitsutaka K. Evaluation of a strawberry-harvesting robot in a field test // Biosystems Engineering. 2010. Vol. 105. №. 2. С. 160–171.
13. Shigehiko H., Satoshi Y., Sadafumi S., Yoshiji O., Junzo K., Mitsutaka K., Kazuhiro Y. Field operation of a movable strawberry-harvesting robot using a travel platform // Japan Agricultural Research Quarterly. 2014. Vol. 48. №. 3. С. 307–316.
14. Zhao D.A., Lv J., Ji W., Zhang Y., Chen Y. Design and control of an apple harvesting robot // Biosystems Engineering. 2011. Vol. 110. №. 2. С. 112–122.

15. Joseph R. D., Abhisesh S., Cameron H. J, Manoj K., Changki M., Qin Z. Proof-of-concept of a robotic apple harvester // 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2016.
16. Mehta S. S., Burks T. F. Vision-based control of robotic manipulator for citrus harvesting // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2014. Vol. 102. С. 146–158.
17. Han K.S., Kim S. C., Lee Y.B., Kim S.C., Im D.H., Choi H.K., Hwang H. Strawberry harvesting robot for bench-type cultivation // *Journal of Biosystems Engineering*. 2012. Vol. 37. №. 1. С. 65–74.
18. Feng Q., Wang X., Zheng W., Qiu Q., Jiang K. New strawberry harvesting robot for elevated-trough culture // *Int J Agric & Biol Eng*. 2012. Vol. 5. №. 2. С. 1.
19. Филиппов Р.А., Д. Хорт О., Кутырев А.И. Роботы для уборки урожая земляники садовой // *Journal of advanced research in technical science*. 2019. Vol. 13. С. 63–68.
20. Хорт Д.О., Терешин А.Н. Анализ конструктивных параметров и классификация рабочих органов для машинной уборки ягодных культур // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2019. Vol. 2. №. 31. С. 62–69.
21. Stanley B., Jurg B., Ola R., Roberto O. CROPS: Clever Robots for Crops // *Engineering & Technology Reference*. 2015. С. 11.
22. Sweet Pepper Harvesting Robot. URL: <http://sweeper-robot.eu>.
23. Lehnert C., English A., McCool C., Tow A.W., Perez T. Autonomous sweet pepper harvesting for protected cropping systems // *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2017. Vol. 2. №. 2. С. 872–879.
24. Bac C.W., Van Henten E.J., Hemming J., Edan Y. Harvesting robots for high-value crops: State-of-the-art review and challenges ahead // *Journal of Field Robotics*. 2014. Vol. 31. №. 6.
25. Feng Q.C., Zou W., Fan P.F., Zhang C.F., Wang X. Design and test of robotic harvesting system for cherry tomato // *Int J Agric & Biol Eng* 2018. Vol. 11. №. 1. С. 96–100.
26. Shigehiko H., Katsunobu G., Hidehito K., Seiichi A., Mitsuji M. Robotic harvesting system for eggplants trained in V-shape (Part 2) – Harvesting experiment for eggplants // *Shokubutsu Kojo Gakkai-shi*. 2003. Vol. 15. №. 4. С. 211–216.
27. Измайлов А.Ю., Годжаев З.А., Афанасьев Р.А. Перспективы роботизации агрохимических работ // *Плодородие*. 2016. Т. 5. № 92. С. 9–13.
28. 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. Т. 5. С. 2–4.
29. Margarita R.A. Engineering research to improve fruit quality // *Land Technology*. 1996. С. 8–9.
30. Li Z., Thomas C. Quantitative evaluation of mechanical damage to fresh fruits // *Trends in Food Science & Technology*. 2014. Vol. 35. №. 2. С. 138–150.
31. Shimoga K.B., Goldenberg A.A. Soft robotic fingertips: Part I: A Comparison of construction materials // *The International Journal of Robotics Research*. 1996. Vol. 15. Vol. 4. С. 320–334.

References

1. Peter L., Reza E., Ting K.C. Sensing and end-effector for a robotic tomato harvester. 2004 ASAE Annual Meeting. 2004.
2. Naoshi K., Kazuya Y., Hiroshi S., Koki Y. A machine vision system for tomato cluster harvesting robot. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*. 2009. Vol. 2. No 2, pp. 60–65.
3. Hiroaki Y., Kotaro N., Takaomi H., Masayuki I. Development of an autonomous tomato harvesting robot with rotational plucking gripper. 2016 IEEE. RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2016.
4. Yuanshen Z., Liang G., Chengliang L., Yixiang H. Dual-arm robot design and testing for harvesting tomato in greenhouse. *IFAC-PapersOnLine*. 2016. Vol. 49. No. 16, pp. 161–165.
5. Wang L.L., Zhao B., Fan J.W., Hu X.A., Wei S. Development of a tomato harvesting robot used in greenhouse. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2017. Vol. 10. No. 4, pp. 140–149.
6. Ji C. Feng Q., Yuan T., Tan Y., Li W. Development and performance analysis on cucumber harvesting robot system in greenhouse. *Robot*. 2011. Vol. 33. No. 6.
7. Van Henten E., Hemming J., van Tuijl B., Kornet J.G., Meuleman J., Bontsema J., E. van Os A. An autonomous robot for harvesting cucumbers in greenhouses. *Autonomous Robots*. 2002. Vol. 13, pp. 241–258.
8. Van Henten E. J., Van Tuijl B. A., Hemming J., Kornet J. G., Bontsema J., Van Os E. A. Field test of an autonomous cucumber picking robot. *Biosystems Engineering*. 2003. Vol. 86. No. 3, pp. 305–313.
9. Xiuying T., Tiezhong Z., Ling L., Dan X., Yizhe C. A new robot system for harvesting cucumber. *Reno*. 2008.
10. Masateru N., Kenji H., Qixin C., Shinji M., Kanshi O. Basic study on strawberry harvesting

- robot (Part II): Design and development of harvesting mechanism. IFAC Proceedings Volumes. 2000. Vol. 33. No. 29, pp. 55–59.
11. Qingchun F., Xiu W., Wengang Z., Quan Q., Kai J. A new challenge of robot for harvesting strawberry grown on table top culture. *Int J Agric & Biol Eng*. 2012. Vol. 5. No. 2, pp. 1.
 12. Shigehiko H., Kenta S., Satoshi Y., Ken K., Yasushi K., Junzo K., Mitsutaka K. Evaluation of a strawberry-harvesting robot in a field test. *Biosystems Engineering*. 2010. Vol. 105. No. 2, pp. 160–171.
 13. Shigehiko H., Satoshi Y., Sadafumi S., Yoshiji O., Junzo K., Mitsutaka K., Kazuhiro Y. Field operation of a movable strawberry-harvesting robot using a travel platform. *Japan Agricultural Research Quarterly*. 2014. Vol. 48. No. 3, pp. 307–316.
 14. Zhao D.A., Lv J., Ji W., Zhang Y., Chen Y. Design and control of an apple harvesting robot. *Biosystems Engineering*. 2011. Vol. 110. No. 2, pp. 112–122.
 15. Joseph R. D., Abhishesh S., Cameron H. J., Manoj K., Changki M., Qin Z. Proof-of-concept of a robotic apple harvester. 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2016.
 16. Mehta S. S., Burks T. F. Vision-based control of robotic manipulator for citrus harvesting. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2014. Vol. 102, pp. 146–158.
 17. Han K.S., Kim S. C., Lee Y.B., Kim S.C., Im D.H., Choi H.K., Hwang H. Strawberry harvesting robot for bench-type cultivation. *Journal of Biosystems Engineering*. 2012. Vol. 37. No. 1, pp. 65–74.
 18. Feng Q., Wang X., Zheng W., Qiu Q., Jiang K. New strawberry harvesting robot for elevated-trough culture. *Int J Agric & Biol Eng*. 2012. Vol. 5. No. 2, pp. 1.
 19. Filippov R.A., D. Khort O., Kutyrev A.I. Robots for harvesting garden strawberries. *Journal of advanced research in technical science*. 2019. Vol. 13, pp. 63–68 (In Russ.).
 20. Khort D.O., Tereshin A.N. Analysis of design parameters and classification of working bodies for machine harvesting of berry crops. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*. 2019. Vol. 2. No. 31, pp. 62–69 (In Russ.).
 21. Stanley B., Jürg B., Ola R., Roberto O. CROPS: Clever Robots for Crops. *Engineering & Technology Reference*. 2015, pp. 11.
 22. Sweet Pepper Harvesting Robot. URL: <http://sweeper-robot.eu>.
 23. Lehnert C., English A., McCool C., Tow A.W., Perez T. Autonomous sweet pepper harvesting for protected cropping systems. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2017. Vol. 2. No. 2, pp. 872–879.
 24. Bac C.W., Van Henten E.J., Hemming J., Edan Y. Harvesting robots for high-value crops: State-of-the-art review and challenges ahead. *Journal of Field Robotics*. 2014. Vol. 31. No. 6.
 25. Feng Q.C., Zou W., Fan P.F., Zhang S.F., Wang X. Design and test of robotic harvesting system for cherry tomato // *Int J Agric & Biol Eng* 2018. Vol. 11. No. 1, pp. 96–100.
 26. Shigehiko H., Katsunobu G., Hidehito K., Seiichi A., Mitsuji M. Robotic harvesting system for eggplants trained in V-shape (Part 2) - Harvesting experiment for eggplants. *Shokubutsu Kojo Gakkai-shi*. 2003. Vol. 15. No. 4, pp. 211–216.
 27. Izmaylov A.YU., Godzhayev Z.A., Afanas'yev R.A. Prospects for robotization of agrochemical works. *Plodorodiye*. 2016. Vol. 5. No 92, pp. 9–13 (In Russ.).
 28. Sychev V.G., Afanas'yev R.A., Yermolov I.L., Kladko S.G., Voronchikhin V.V. Diagnostics of nitrogen nutrition of plants using unmanned aerial vehicles. *Plodorodiye*. 2017. Vol. 5, pp. 2–4 (In Russ.).
 29. Margarita R.A. Engineering research to improve fruit quality. *Land Technology*. 1996, pp. 8–9.
 30. Li Z., Thomas C. Quantitative evaluation of mechanical damage to fresh fruits. *Trends in Food Science & Technology*. 2014. Vol. 35. No. 2, pp. 138–150.
 31. Shimoga K.B., Goldenberg A.A. Soft robotic fingertips: Part I: A Comparison of construction materials. *The International Journal of Robotics Research*. 1996. Vol. 15. Vol. 4, pp. 320–334.