

## Моделирование конфигурации робототехнического захвата для манипуляций с сельскохозяйственной продукцией

Д.К. Ву<sup>1</sup>, А.Л. Ронжин<sup>1</sup> ✉

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН)  
14-я линия В.О. 39, г. Санкт-Петербург 199178, Российская Федерация

✉ e-mail: ronzhin@iias.spb.su

### Резюме

**Цель исследования.** Повышение качества и скорости сбора сельскохозяйственной продукции за счёт разработки моделей, алгоритмов управления и многокритериальной оптимизации конфигурации робототехнического захвата.

**Методы.** Для достижения поставленной цели в работе использовались методы математического и компьютерного моделирования, многокритериальной оптимизации, теории объектно-ориентированного проектирования и программирования. Описана математическая модель кинематической схемы прототипа робототехнического захвата, ее геометрические ограничения и целевые функции, используемые при оптимизации.

**Результаты.** Выполнен обзор подходов к роботизированной уборке сельскохозяйственной продукции, подтверждающий актуальность данного исследования конфигураций робототехнического захвата, обеспечивающего надежную без нанесения повреждений фиксацию объекта. Представлены результаты экспериментов по оцениванию разработанных алгоритмов и программной системы оптимизации конфигурации робототехнического захвата. Разработанная программная система AgroGripModeling для моделирования конфигурации робототехнического захвата с использованием трёх апостериорных алгоритмов NSGA-II, MOGWO и MOPSO многокритериальной оптимизации апробирована при проектировании прототипа четырёхпалого захвата с вакуумным сильфоном для сбора томатов.

**Заключение.** При проектировании робототехнического захвата необходимо учитывать разнообразие манипулируемых объектов, сложность их идентификации и наведения манипулятора в сложной естественной среде с препятствиями. Задача оптимизации механизма захвата связана с выполнением ряда противоречивых требований по надёжности, мягкости, точности, скорости, энергоэффективности, формирующих сложное пространство поиска решений. Разработанная программная система AgroGripModeling обеспечивает моделирование конфигурации робототехнического захвата и оценивание ее качества с использованием трёх апостериорных алгоритмов NSGA-II, MOGWO и MOPSO. Апробация системы проведена при многокритериальной оптимизации конфигурации прототипа четырёхпалого захвата с вакуумным сильфоном для сбора томатов.

**Ключевые слова:** робототехнический захват; кинематическая схема; многокритериальная оптимизация; программная система AgroGripModeling.

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Для цитирования:** Ву Д.К., Ронжин А.Л. Моделирование конфигурации робототехнического захвата для манипуляций с сельскохозяйственной продукцией // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(4): 76-90. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-76-90>.

Поступила в редакцию 05.10.2020

Подписана в печать 29.10.2020

Опубликована 30.12.2020

## Modeling the Configuration of a Robotic Gripper for Handling Agricultural Products

Quyen D. Vu<sup>1</sup>, Andrey L. Ronzhin<sup>1</sup> ✉

<sup>1</sup> St.Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIRAS)  
39, 14-th Line V.O., St. Petersburg 199178, Russian Federation

✉ e-mail: [ronzhin@iias.spb.su](mailto:ronzhin@iias.spb.su)

### Abstract

**Purpose of research.** *Improvement of quality and speed of harvesting agricultural products through the development of models, control algorithms and multi-criteria optimization of the robotic gripper configuration.*

**Methods.** *To achieve this goal, we have used the methods of mathematical and computer modeling, multi-criteria optimization, the theory of object-oriented design and programming. The mathematical model of the kinematic scheme of the prototype of the robotic gripper, its geometric constraints and objective functions used for optimization are described.*

**Results.** *It has been performed a review of approaches to robotic harvesting of agricultural products, confirming the relevance of this study of robotic gripper configurations, which provides reliable fixation of an object without causing damage. The results of experiments on evaluating the developed algorithms and a software system for optimizing the configuration of a robotic gripper are presented. The developed software system AgroGripModeling for modeling the configuration of a robotic gripper using three a posteriori algorithms NSGA-II, MOGWO and MOPSO for multicriteria optimization is tested in the design of a prototype of a four-fingered gripper with a vacuum bellows for picking tomatoes.*

**Conclusion.** *When designing a robotic gripper, it is necessary to take into account the variety of manipulated objects, the complexity of their identification and guidance of the manipulator in a complex natural environment with obstacles. The task of optimizing the capture mechanism is associated with the fulfillment of a number of conflicting requirements for reliability, softness, accuracy, speed, energy efficiency, which form a complex space for finding solutions. The developed AgroGripModeling software system provides modeling of the robotic gripping configuration and its quality assessment using three a posteriori algorithms NSGA-II, MOGWO and MOPSO. The system was tested with multicriteria optimization of the configuration of a prototype of a four-fingered gripper with a vacuum bellows for picking tomatoes.*

**Keywords:** *robotic gripper; kinematic diagram; multi-criteria optimization; AgroGripModeling software system.*

**Conflict of interest.** *The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

**For citation:** Vu Q. D., Ronzhin A. L. Modeling the Configuration of a Robotic Gripper for Handling Agricultural Products. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University.* 2020; 24(4): 76-90 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-76-90>.

Received 05.10.2020

Accepted 29.10.2020

Published 30.12.2020

## Введение

Традиционный сбор фруктов и овощей для свежего рынка является трудоёмкой задачей, требующей перехода от утомительного ручного управления к непрерывно автоматизированному сбору урожая. Чтобы роботизированная уборка была рентабельной, урожай фруктов должен быть максимально увеличен, чтобы компенсировать дополнительные затраты на автоматизацию [1]. Например, труд для сбора урожая составляет более 50% от общих производственных затрат и около 71% от общего человеческого труда, необходимого для производства черешни. С ростом конкуренции возможность снижения себестоимости продукции за счёт механизации уборки становится все более актуальной. Изменчивость механических, физических и геометрических характеристик плодов и методов их сбора не позволяет создавать универсальные робототехнические системы, поэтому в настоящий момент ведутся исследования по проектированию механизмов обработки плодов отдельных культур [2,3].

Теоретические и прикладные исследования по роботизированной уборке фруктов и овощей привели к созданию прототипов роботов для различных видов сельскохозяйственной продукции: томаты, огурцы, клубника, томаты черри, сладкий перец, баклажаны и фруктовый сад: яблоко, цитрусовые [4,5].

Томаты являются наиболее популярными овощами, ежегодно их производится 177 млн тонн в мире. Поэтому автоматическая уборка томатов стала перспективной альтернативой ручной уборке, и были инициированы исследования по разработке роботов для уборки томатов. В работе [6] 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 UPJ имеет внутреннюю схему электрических и пневматических линий. В среднем время цикла сбора и размещения одного томата составляло приблизительно 3 минуты 47 секунд, включая время, необходимое для машинного зрения. Показатели успешности распознавания и сбора плодов томатов были выше 95% и 85% соответственно.

В работе [7] описан робот для сбора томатов, 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 [8] спроектирован и разработан автономный робот для уборки томатов, который состоит из ротационного захватного устройства, манипулятора 6-DOF, стереокамеры и наземной платформы с всенаправленными колёсами. При неудачной уборке томатов выделяются 3 основных типа проблемных случаев: 1) томат не оказался в захвате; 2) томат успешно собран, но частично повреждён; 3) несколько томатов одновременно оказались в захвате. Средняя длительность одного цикла наведения, захвата и съёма томата составляла 23 с, а общий процент успешной работы – 60%.

Робот с двумя манипуляторами был разработан в работе [9] для уборки томатов в теплице. Робот содержит также 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, также были обнаружены некоторые недостатки робота.

В работе [10] рассмотрен робот для уборки томатов, который состоял из независимой системы рулевого управления с четырьмя колёсами, 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%. Когда расстояние составляло 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. Зелёный цвет зрелого огурца соответствует цвету листьев и стеблей и затрудняет распознавание плодов. Кроме того, огурец – это вид культуры, который растёт в подвешенном состоянии, и плоды которого обычно колеблются в воздухе, и поэтому его трудно захватить при сборе урожая. В то же время плод обладает достаточной твёрдостью и поэтому огурец является одной из наиболее типичных культур среди фруктов и овощей для исследований робототехнических захватов.

В работе [11] разработана концепция автономного робота для уборки огурцов в теплицах. Он состоит из автономного транспортного средства, манипулятора с 7-DOF, рабочего органа, 2 систем видеонаблюдения и различного электронного и пневматического оборудования. Рабочий орган включает в себя захват и всасывающий стакан для схватывания фруктов и устройство термической резки для отделения плодов от растения. На испытаниях в теплице в 74,4% случаев робот успешно снимал

плоды [12]. 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 [13] 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 1 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 [10] 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, и успешная уборка была достигнута в 85% случаев. Среднее время сбора одного плода составило 28,6 с.

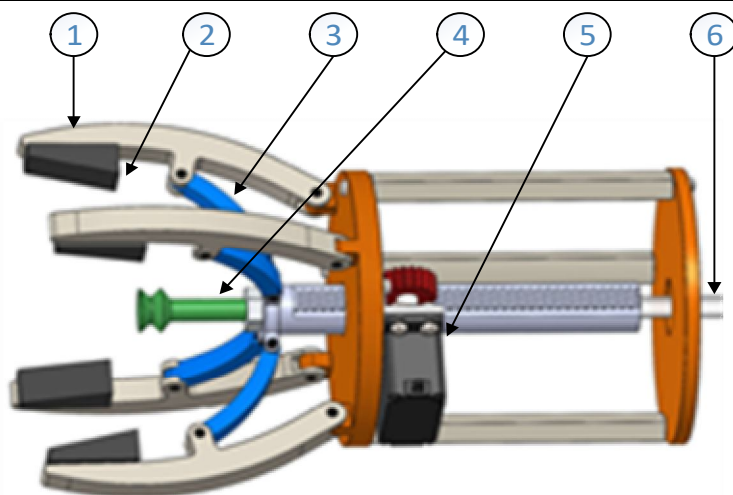
Проведенный обзор технических решений и конструкций робототехниче-

ских захватов сельскохозяйственной продукции доказывает актуальность данного направления и необходимость исследования и других задач, требующих роботизации с привлечением беспилотных летательных аппаратов и систем группового управления роботами [14-17].

## Материалы и методы

В ходе исследования был разработан робототехнический захват для сбора томатов, который состоит из нескольких конструктивных модулей: 1) мехатронная система на основе четырёхпалого захвата; 2) вакуумное всасывающее сопло для фиксации плода; 3) линейный привод вакуумной системы. Отличительной особенностью конфигурации захвата является возможность перемещения вакуумного всасывающего сопла одновременно с действием четырёхпалого механизма. Использование отдельного сервопривода для перемещения всасывающего сопла усложняет конфигурацию и алгоритм управления конечным эффектором. Поэтому в предложенной конфигурации используется один линейный привод для синхронного перемещения пальцев и всасывающего сопла с помощью реечной передачи.

На рис. 1 показана компьютерная модель четырёхпалого захвата со следующими обозначениями: 1 – пальцы захвата; 2 – резиновая прокладка; 3 – стержень; 4 – всасывающее сопло; 5 – привод; 6 – пневмотрубка.



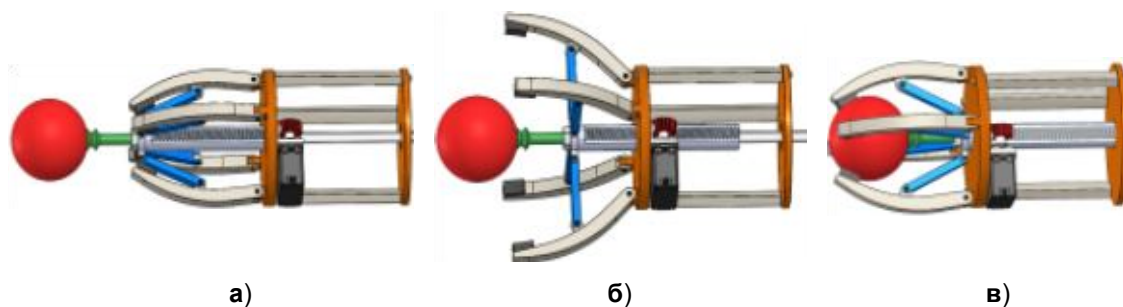
**Рис.1.** Компьютерная модель прототипа четырёхпалого захвата для сбора томата

**Fig. 1.** Computer model of a prototype of a four-toed grab for picking tomato

На рис. 2 показано движение захвата при уборке томатов. Когда манипулятор робота перемещает захват в заданное положение, вакуумная насадка выдвигается вперёд, а пальцы смыкаются, чтобы уменьшить занимаемое пространство, избегая столкновений с препятствиями, такими, как ветви, листья и другие томаты (2,а). Концевой выключатель используется для ограничения движения манипулятора при перемещении вакуумной форсунки вперёд. Максимальное расстояние вытягивания вакуумной системы до 12 см, что упрощает процедуру удаления плодов, покрытых листьями или ветвями на пу-

ти манипулятора. После присасывания плода пальцы расширяются, и всасывающее сопло возвращает томат внутрь (2,б). После максимального расширения пальцы перемещаются обратно внутрь и удерживают плод с регулируемым давлением, измеряемым встроенным датчиком (2,в). Затем манипулятор робота отодвигается назад, чтобы отрезать томат от ветки.

Захватывающий механизм представляет собой четырёхпальный захват, основанный на кривошипно-скользящем механизме. Механизм захвата включает в себя 4 звена, размеры которых обозначены как а, б, с и е, показанные на рис. 3.



**Рис. 2.** Основные этапы движения захвата

**Fig. 2.** The main stages of the gripper movement

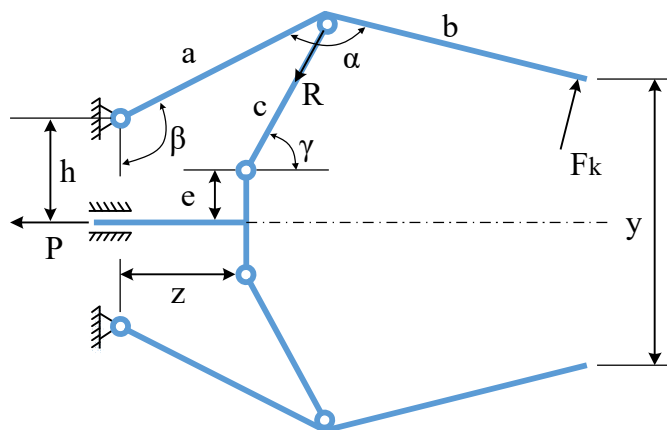


Рис. 3. Кинематическая схема захвата

Fig. 3. Kinematic gripper scheme

Пусть  $X = [a, b, c, e, h, \alpha]^T$  – вектор целевых переменных;

$a, b, c, e, h, \alpha$  – размеры захвата;

$\alpha$  – угол между элементами  $a$  и  $b$  захвата;

$\beta, \gamma$  – углы соединений с горизонтальными линиями;

$P$  – сила привода;

$F$  – сила захвата, оказываемая пальцами захвата в точке контакта.

Геометрические зависимости механизмов захвата представлены в следующих формулах:

$$\gamma = 2 \tan^{-1} \frac{1 - \sqrt{1 + A^2 - B^2}}{B - A};$$

$$\beta = 2 \tan^{-1} \frac{C + \sqrt{1 + A^2 - C^2}}{C + A},$$

где  $A = \frac{z}{h-e}$ ;

$$B = \frac{c^2 - (h-e)^2 + z^2 - a^2}{2c(h-e)};$$

$$C = \frac{a^2 + (h-e)^2 + z^2 - c^2}{2a(h-e)}.$$

Соотношение сил, действующих на захват:

$$F_k (b - a \cos \alpha) = R a \sin (\gamma - \beta);$$

$$P = 4 R \cos \gamma;$$

$$F_k = \frac{P a \cos (\gamma - \beta)}{4 (b - a \cos \alpha) \cos \gamma};$$

$$y(X, z) = 2(h - a \cos \beta) + b \cos (\alpha + \beta).$$

Для оптимизации размеров данного захвата используются следующие основные целевые функции:

1. Функция, которая описывает разницу между максимальным и минимальным усилиями захвата для предполагаемого диапазона перемещения концов захвата:

$$f_1(X) = \max_z F_k(X, z) - \min_z F_k(X, z),$$

где  $\max_z F_k(X, z)$ ,  $\min_z F_k(X, z)$  – соответственно максимальная и минимальная сила захвата для предполагаемого диапазона смещения привода  $z$ , где  $z_{\min} \leq z \leq 2z_{\max}$ .

2. Функция, которая описывает коэффициент передачи силы между концом захвата и приводом захвата:

$$f_2(X) = \frac{P}{\min_z F_k(X, z)} = \frac{4(b - a \cos \alpha) \cos \gamma}{a \cos(\gamma - \beta)},$$

при  $z_{\min} \leq z \leq 2z_{\max}$

3. Функция, которая описывает передаточное отношение сдвига между концами захвата и приводом захвата:

$$f_3(X) = \left| \frac{z_{\max} - z_{\min}}{y(X, z_{\max}) - y(X, z_{\min})} \right|,$$

где  $y(X, 2z_{\max})$ ,  $y(X, z_{\min})$  – расстояния между пальцами в положениях максимального и минимального сдвига привода.

4. Функция, которая описывает сумму всех конструктивных элементов захвата:

$$f_4(X) = \sum_{i=1}^L l_i = a + b + c + e + h.$$

Оптимизация значения этой функции гарантирует, что размер захвата при работе в разных направлениях будет оптимальным.

5. Функция, которая описывает усилие механизма захвата:

$$f_5(X) = \left| \frac{4 \max_z F_k(X, z)}{P} \right|.$$

Далее опишем основные геометрические ограничения:

$$1. g_1(X) = y(X, z_{\min}) - D_{\min} \leq 0;$$

$$2. g_2(X) = D_{\max} - y(X, z_{\max}) \leq 0;$$

$$3. g_3(X) = C^2 - 1 - A^2 \leq 0;$$

$$4. g_4(X) = e - h \leq 0;$$

$$5. g_5(X) = B^2 - 1 - A^2 \leq 0;$$

$$6. g_6(X) = -1 - C \leq 0,$$

где  $D_{\min}$ ,  $D_{\max}$  – минимальный и максимальный диаметр плода, с которым производятся манипуляции.

## Результаты и их обсуждение

Рассмотрим структуру разработанной программной системы AgroGrip-Modeling для многокритериальной оптимизации конфигурации робототехнического захвата на основе алгоритмов, рассмотренных ранее. Данная программа разработана в среде Matlab и имеет графический пользовательский интерфейс для корректировки значений целевых параметров и интерактивного анализа полученной конфигурации робототехнического захвата. Разработанная программная система AgroGripModeling состоит из нескольких модулей, представленных на рис. 4.

Модуль ввода входных данных включает в себя ряд переменных, которые необходимо оптимизировать и параметры выбранного алгоритма оптимизации. Модуль выбора конфигурации захвата содержит 4 типа кинематических схем, используемых на практике.

Модуль выбора алгоритма оптимизации содержит реализованные программно апостериорные методы NSGA-II, MOGWO и MOPSO для решения задач многокритериальной оптимизации и позволяет пользователю выбрать один метод для решения текущей прикладной задачи [18-21].



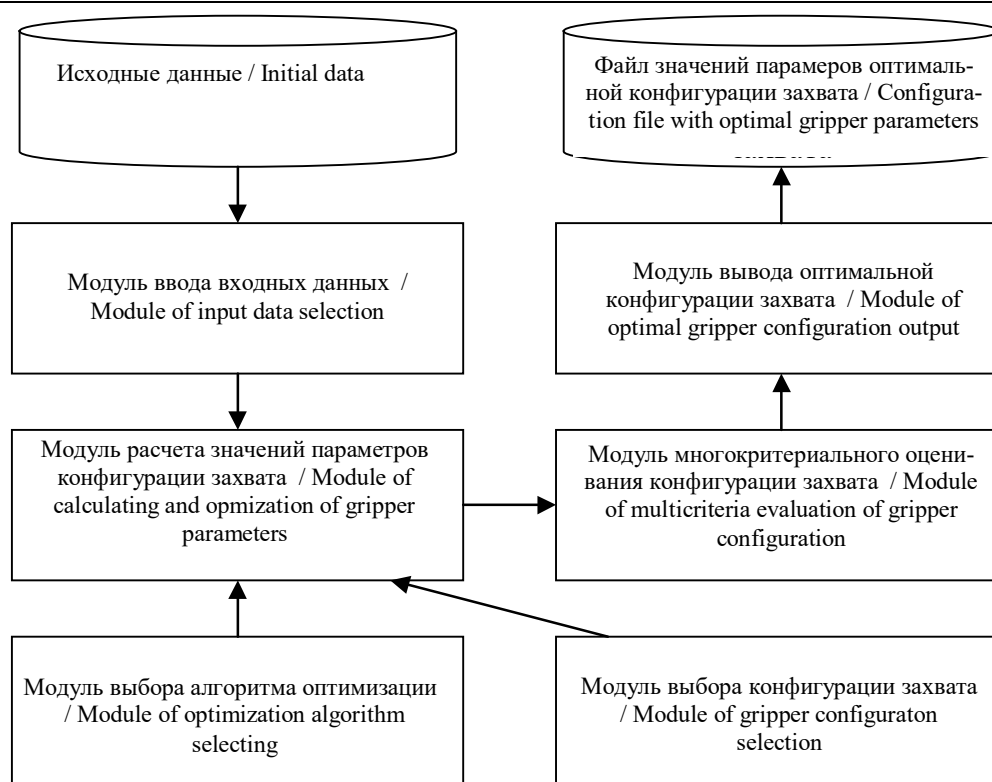


Рис. 4. Общая структура программной системы AgroGripModeling

Fig. 4. General structure of the AgroGripModeling software system

Модуль многокритериального оценивания конфигурации робототехнического захвата производит расчёт показателей качества произведённой оптимизации: доля недоминируемых индивидов ( $RNI$ ), вычислительные затраты алгоритма ( $AE$ ), степень равномерности распределения ( $UD$ ) [18].

На рис. 5 представлен пользовательский интерфейс разработанной программной системы AgroGripModeling, обеспечивающий ввод основных параметров моделирования захвата, выбор конфигурации и алгоритма и параметров оптимизации, отображение кинематической схемы выбранной конфигурации и оптимальные значения параметров по окончании работы алгоритма много-

критериальной оптимизации. Полученные в ходе оптимизации результаты также сохраняются в файл.

На рис. 6 показаны результаты оценивания 20 независимых моделируемых конфигураций робототехнического захвата в виде коробчатых диаграмм.

Результаты моделирования показывают, что MOGWO имеет наименьшее  $AE$ , а  $RNI$  – наибольшее, поэтому это лучший алгоритм, если сравнивать его с двумя другими методами по вышеуказанным показателям производительности. Метод NSGA-II имеет наибольшее время вычислений, что можно объяснить повторяющейся процедурой сортировки элементов нового набора с удвоенным количеством элементов.

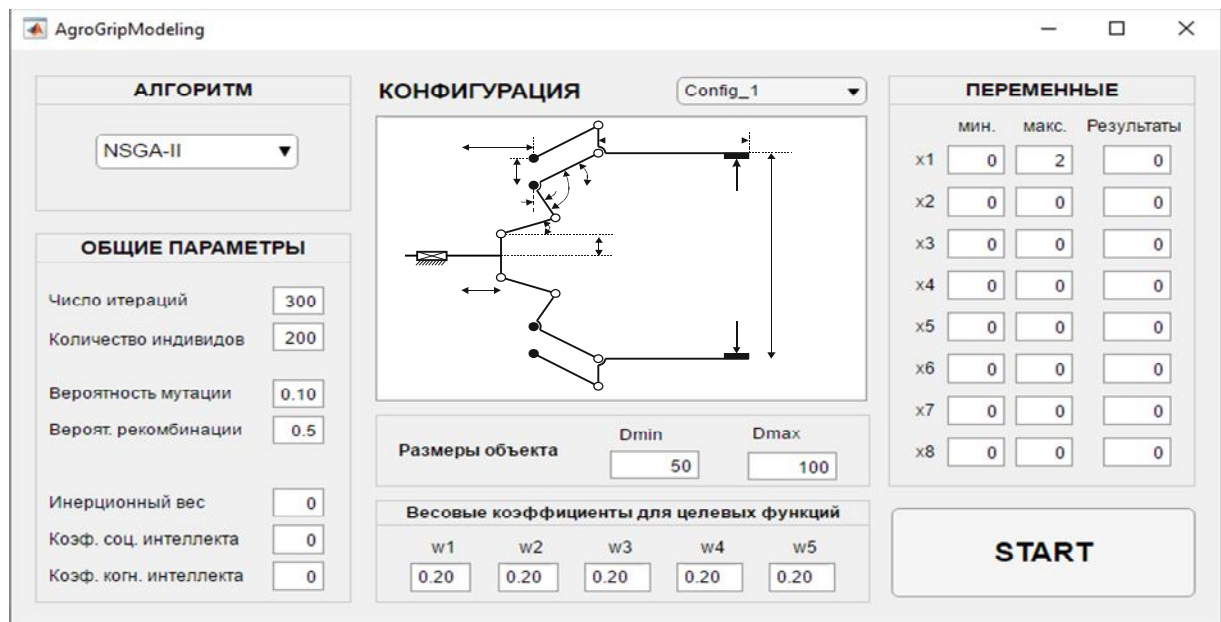


Рис. 5. Пользовательский интерфейс системы AgroGripModeling

Fig. 5. User interface of AgroGripModeling software system

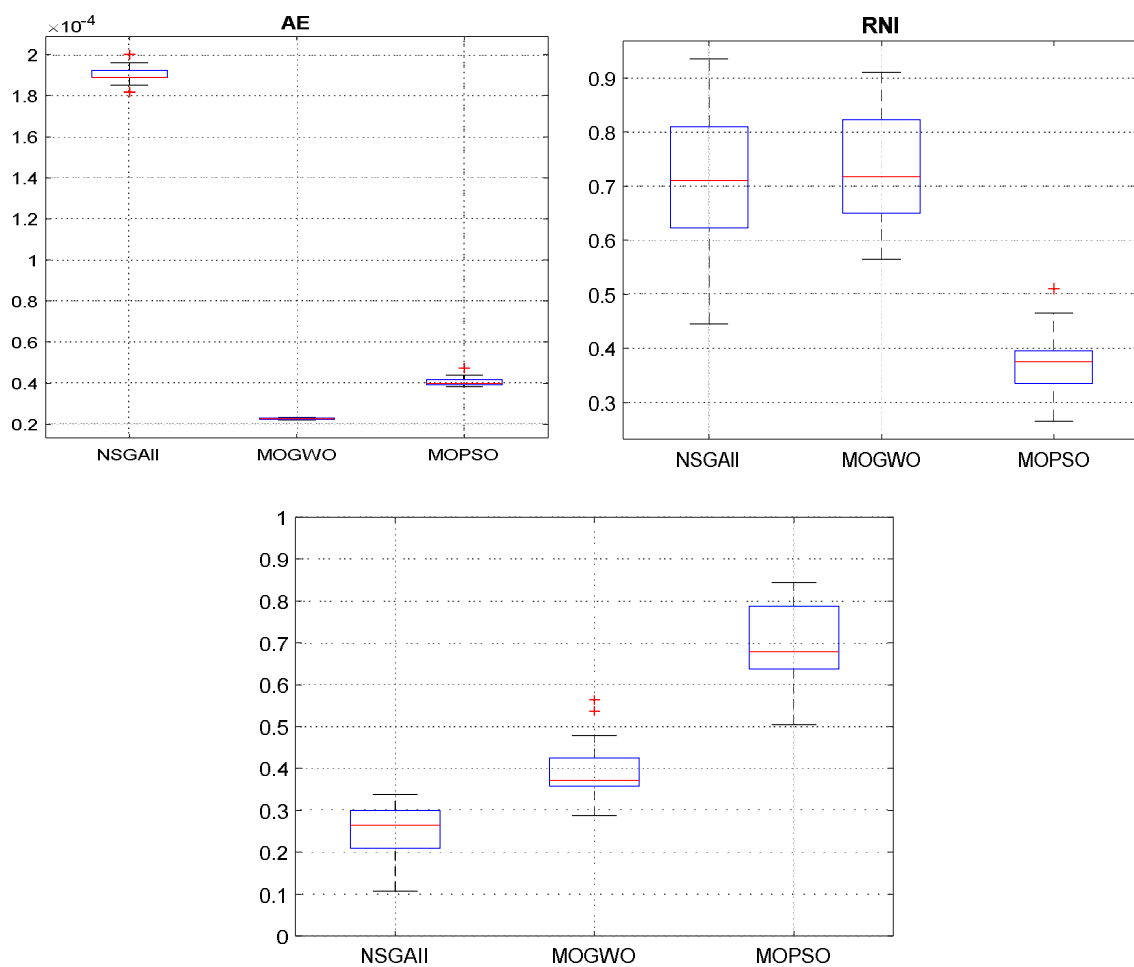


Рис. 6. Оценки AE, RNI и UD моделирования конфигурации робототехнического захвата

Fig. 6. Estimates of AE, RNI and UD of robotic gripping configuration simulation

Преимущество MOPSO перед MOGWO заключается в том, что он расширяет пространство поиска, MOPSO имеет больший показатель распространения недоминируемых индивидов  $UD$ , чем у двух других алгоритмов. Однако эти преимущества не проявляются в двух вышеупомянутых методах оценивания. Дальнейшее исследование будет ориентировано на реализацию рассмотренных алгоритмов при проектировании захватов в сельском хозяйстве и промышленности с использованием различных типов датчиков для точного захвата манипулируемых объектов.

## Выводы

Традиционный сбор и первичная обработка сельскохозяйственной продукции являются наиболее ресурсоёмкими задачами, требующими перехода от утомительных ручных операций к автоматизации технологических процессов и роботизации манипуляций с

физическими объектами. При проектировании робототехнического захвата необходимо учитывать разнообразие манипулируемых объектов, сложность их идентификации и наведения манипулятора в сложной естественной среде с препятствиями. Задача оптимизации механизма захвата связана с выполнением ряда противоречивых требований по надёжности, мягкости, точности, скорости, энергоэффективности, формирующих сложное пространство поиска решений.

Разработанная программная система AgroGripModeling обеспечивает моделирование конфигурации робототехнического захвата и оценивание ее качества с использованием трёх апостериорных алгоритмов NSGA-II, MOGWO и MOPSO. Апробация системы проведена при многокритериальной оптимизации конфигурации прототипа четырёхпалого захвата с вакуумным сильфоном для сбора томатов.

## Список литературы

1. Shamshiri R.R., Weltzien C., Hameed I.A. Research and development in agricultural robotics: A perspective of digital farming // *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2018. № 1(4). P. 1-14. <https://doi.org/10.098.77/j.ijabe.20181104.4278>.
2. West T., Sullivan R., Seavert C. Orchard Economics: Establishing and Producing High-Density Sweet Cherries in Wasco County. *OSU Extension Service Publication*, EM. 2012.
3. Agricultural workforce report. Labor and market performance analysis. Washington State: Employment Security Department; 2012. URL: <https://esd.wa.gov/>.
4. Афанасьев Р.А., Ермолов И.Л. Перспективные направления роботизации точного земледелия // *Робототехника и техническая кибернетика*. 2017. №1 (14). С. 27-32.

5. Шевченко А.В., Мещеряков Р.В., Мигачев А.Н. Обзор состояния мирового рынка робототехники для сельского хозяйства. Ч. 1. Беспилотная агротехника // *Проблемы управления*. 2019. № 5. С. 3-18.
6. Ling P., Ehsani R., Ting K.C. Sensing and End-Effector for a Robotic Tomato Harvester. *2004 ASAE Annual Meeting*. 2004. P. 1-4.
7. Naoshi K., Kazuya Y., Hiroshi S. A. Machine Vision System for Tomato Cluster Harvesting Robot // *Engineering in Agriculture, Environment and Food*. 2009. № 2(2). P. 60-65. <https://doi.org/10.13031/2013.24691>.
8. Hiroaki Y., Kotaro N., Takaomi H. Development of an autonomous tomato harvesting robot with rotational plucking gripper // *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2016.
9. Zhao Y., Gong L., Liu C. Dual-arm Robot Design and Testing for Harvesting Tomato in Greenhouse // *IFAC-PapersOnLine*. 2016. №49(16). P. 161-165. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.030>.
10. Wang L.L., Zhao B., Fan J.W. Development of a tomato harvesting robot used in greenhouse // *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2017. № 10(4). P. 140-149. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20171004.3204>.
11. Van Henten E., Hemming J., van Tuijl B. An autonomous robot for harvesting cucumbers in greenhouses // *Autonomous Robots*. 2002. №13. P. 241–258. <https://doi.org/10.1023/A:1020568125418>.
12. Van Henten E.J., Van Tuijl B.A., Hemming J. Field Test of an autonomous cucumber picking robot. *Biosystems Engineering*. 2003. №86(3). P. 305-313. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.08.002>.
13. Tang X., Zhang T., Liu L. A New Robot System for Harvesting Cucumber. *2009 Reno*. 2008.
14. Диагностика азотного питания растений с использованием беспилотных летательных аппаратов / В.Г. Сычев, Р.А. Афанасьев, И.Л. Ермолов, С.Г. Кладко, В.В. Ворончихин // *Плодородие*. 2017; 5(98): 2-4.
15. Применение кластерного анализа с элементами нечеткой логики для оценки окружающей обстановки группы робототехнических средств / М.П. Кочетков, Д.Н. Корольков, В.Ф. Петров, О.В. Петров, А.И. Терентьев, С.Б. Симонов // *Труды СПИИРАН*. 2020. №4(19). С. 746-773.
16. Нагоев З.В., Денисенко В.А., Лютикова Л.А. Система машинного зрения автономного робота для сельскохозяйственного применения в условиях горных территорий на основе мультиагентных когнитивных архитектур // *Устойчивое развитие горных территорий*. 2018. №10-2(36). С. 289-297.
17. Нго К.Т., Нгуен В.В., Ронжин А.Л. Рекомендующая программная система оценивания состава гетерогенных робототехнических средств для выполнения сельскохозяй-

зайственных операций // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии*. 2019. №4. С. 141-149.

18. Goldberg D. *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. 978-0201157673. Addison-Wesley Professional. 1988.

19. Deb K., Pratap A., Agarwal S. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II // *IEEE Transactions on Evolutionary Computations*. 2002. №6(2). P. 182–197. <https://doi.org/10.1109/4235.996017>.

20. Mirjalilia S., Mirjalili S.M., Lewis A. Grey Wolf Optimizer. *Advances in Engineering Software*. 2014. № 69. P. 46-61. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>

21. Eberhart Shi Y. Particle swarm optimization: developments, applications and resources. *Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation (IEEE Cat. No.01TH8546)*. 2001.

## References

1. Shamshiri R.R., Weltzien C., Hameed I.A. Research and development in agricultural robotics: A perspective of digital farming. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2018, no. 1(4), pp. 1-14. <https://doi.org/10.098.77/j.ijabe.20181104.4278>.

2. West T., Sullivan R., Seavert C. Orchard Economics: Establishing and Producing High-Density Sweet Cherries in Wasco County. *OSU Extension Service Publication*, EM. 2012.

3. Agricultural workforce report. Labor and market performance analysis. Washington State: Employment Security Department; 2012. Available at: <https://esd.wa.gov/>.

4. Afanasiev R.A., Ermolov I.L. Perspektivnye napravleniya robotizatsii tochnogo zemledeliya [Prospective lines of development of precision agriculture robotization]. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika = Robotics and Technical Cybernetics*, 2017, no. 1 (14), pp. 27-32 (In Russ.).

5. Shevchenko A.V., Meshcheryakov R.V., Migachev A.N. Obzor sostoyaniya mirovogo rynka robototekhniki dlya sel'skogo khozyaistva. Ch. 1. Bepilotnaya agrotekhnika. [Review of the world market of agriculture robotics. Part 1. Unmanned vehicles for agriculture]. *Problemy upravleniya = Control Sciences*, 2019, no. 5, pp.3-18 (In Russ.).

6. Ling P., Ehsani R., Ting K.C. Sensing and End-Effector for a Robotic Tomato Harvester. *2004 ASAE Annual Meeting*, 2004, pp. 1-4.

7. Naoshi K., Kazuya Y., Hiroshi S. A Machine Vision System for Tomato Cluster Harvesting Robot. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*. 2009, no. 2(2), pp. 60-65. <https://doi.org/10.13031/2013.24691>.

8. Hiroaki Y., Kotaro N., Takaomi H. Development of an autonomous tomato harvesting robot with rotational plucking gripper. *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2016.

9. Zhao Y., Gong L., Liu C. Dual-arm Robot Design and Testing for Harvesting Tomato in Greenhouse. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, no. 49(16), pp. 161-165. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.030>.
10. Wang L.L., Zhao B., Fan J.W. Development of a tomato harvesting robot used in greenhouse. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2017, no. 10(4), pp. 140-149. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20171004.3204>.
11. Van Henten E., Hemming J., van Tuijl B. An autonomous robot for harvesting cucumbers in greenhouses. *Autonomous Robots*, 2002, no. 13, pp. 241-258. <https://doi.org/10.1023/A:1020568125418>.
12. Van Henten E.J., Van Tuijl B.A., Hemming J. Field Test of an autonomous cucumber picking robot. *Biosystems Engineering*, 2003, no. 86(3), pp. 305-313. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.08.002>.
13. Tang X., Zhang T., Liu L. A New Robot System for Harvesting Cucumber. *2009 Reno*. 2008.
14. Sychev V.G., Afanasiev R.A., Ermolov I.L. Diagnostika azotnogo pitaniya rastenii s ispol'zovaniem bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Diagnostics of plant nitrogen nutrition using drones]. *Plodorodie = Plodorodie*, 2017, no. 5(98), pp. 2-4 (In Russ.).
15. Kochetkov M.P., Korolkov D.N., Petrov V.F. Primenenie klasternogo analiza s elementami nechetkoi logiki dlya otsenki okruzhayushchei obstanovki gruppy robototekhnicheskikh sredstv [Application of cluster analysis with fuzzy logic elements for ground environment assessment of robotic group]. *Trudy SPIIRAN = SPIIRAS Proceedings*, 2020, no. 4 (19), pp. 746-773 (In Russ.).
16. Nageev Z.V., Denisenko V.A., Lyutikova L.A. Sistema mashinnogo zreniya avtonomnogo robota dlya sel'skokhozyaistvennogo primeneniya v usloviyakh gornykh territorii na osnove mul'tiagentnykh kognitivnykh arkhitektur [System of autonomous robot machine vision for agricultural application in mountain territories based on the multi-agent cognitive architectures]. *Ustoichivoe razvitie gornykh territorii = Sustainable development of mountain territories*, 2018, no. 10-2(36), pp. 289-297 (In Russ.).
17. Ngo K.T., Nguyen V.V., Ronzhin A.L. Rekomenduyushchaya programmnaya sistema otse-nivaniya sostava geterogennykh robototekhnicheskikh sredstv dlya vypolneniya sel'skokho-zyaistvennykh operatsii [Recommending software system for estimating the composition of heterogeneous robots for performance of agricultural operations]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyi analiz i informatsionnye tekhnologii = Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems analysis and information Technologies*, 2019, no. 4, pp. 141-149 (In Russ.).
18. Goldberg D. *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. 978-0201157673. Addison-Wesley Professional. 1988.

19. Deb K., Pratap A., Agarwal S. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computations*, 2002, no. 6(2), pp. 182–197. <https://doi.org/10.1109/4235.996017>.

20. Mirjalilia S., Mirjalili S.M., Lewis A. Grey Wolf Optimizer. *Advances in Engineering Software*, 2014, no. 69, pp. 46-61. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>

21. Eberhart Shi Y. Particle swarm optimization: developments, applications and resources. *Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation (IEEE Cat. No.01TH8546)*. 2001.

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Ву Дык Куен**, соискатель лаборатории автономных робототехнических систем, Санкт-Петербургский Институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: vuquyenntk@gmail.com

**Quyen D. Vu**, Post-Graduate Student, Laboratory of Autonomous Robotic Systems, St.Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: vuquyenntk@gmail.com

**Ронжин Андрей Леонидович**, доктор технических наук, профессор РАН, профессор лаборатории автономных робототехнических систем, Санкт-Петербургский Институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: ronzhin@iias.spb.su

**Andrey L. Ronzhin**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of RAS, Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: ronzhin@iias.spb.su