

Обоснование параметров роботизированного манипулятора для съема плодов

Дмитрий Олегович Хорт¹, Игорь Геннадьевич Смирнов¹, Алексей Игоревич Кутырёв¹, Мадин Артурович Шеружев²

¹Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, г. Москва, Россия

²ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

e-mail: vim_sad@mail.ru

e-mail: alexeyutyrev@gmail.com

Аннотация. На основании анализа физико-механических характеристик плодовых деревьев интенсивного типа разработаны технические требования к роботизированному манипулятору для сбора плодов. Проведено компьютерное моделирование процесса съема плодов с кроны дерева для обоснования конструктивных параметров роботизированного манипулятора. Разработана кинематическая схема и имитационная модель роботизированного манипулятора в среде Simulink SimScape (V-REP симулятор роботов). Системы координат привязаны к сочленениям степеней подвижности манипулятора. Путем решения прямой позиционной задачи определены положение и ориентация манипуляторного устройства. Установлены обобщенные координаты центра схвата манипулятора, которые могут изменяться в пределах, обусловленных конструкцией механизма: $|q_1| \leq 90^\circ$, $5^\circ \leq q_2 \leq 65^\circ$, $45^\circ \leq q_3 \leq 156^\circ$ и определяющие рабочее пространство манипулятора.

Ключевые слова: манипулятор; кинематическая схема; роботизированное устройство съема плодов; степень свободы; имитационная модель.

Для цитирования: Хорт Д. О., Смирнов И. Г., Кутырёв А. И., Шеружев М. А. Обоснование параметров роботизированного манипулятора для съема плодов // Аграрный научный журнал. 2022. № 10. С. 121–126. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2022i10pp121-126>.

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

Justification of the parameters of the robotic manipulator for picking fruits

Dmitry O. Khort¹, Igor G. Smirnov¹, Alexey I. Kutyrev¹, Madin A. Sheruzhev²

¹Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

e-mail: vim_sad@mail.ru

Abstract. Based on the analysis of the physical and mechanical characteristics of intensive fruit trees, technical requirements for a robotic manipulator for fruit harvesting have been developed. A computer simulation of the process of removing fruits from the crown of a tree was carried out to substantiate the design parameters of a robotic manipulator. A kinematic scheme and a simulation model of a robotic manipulator in the Simulink SimScape environment (V-REP robot simulator) have been developed. Coordinate systems are linked to the joints of the degrees of mobility of the manipulator. By solving a direct positional problem, the position and orientation of the manipulator device is determined. Generalized coordinates of the center of the grip of the manipulator are established, which can vary within the limits determined by the design of the mechanism: $|q_1| \leq 90^\circ$, $5^\circ \leq q_2 \leq 65^\circ$, $45^\circ \leq q_3 \leq 156^\circ$ and defining the working space of the manipulator.

Keywords: manipulator; kinematic scheme; robotic device of fruit picking; degree of freedom; imitation model.

For citation: Khort D. O., Smirnov I. G., Kutyrev A. I., Sheruzhev M. A. Justification of the parameters of the robotic manipulator for picking fruits. Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal. 2022;(10):121–126. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2022i10pp121-126>.

Введение. Задача создания технических устройств для роботизированной уборки фруктов является актуальным направлением современной агроинженерной науки, которым занимаются инженеры и исследователи во всём мире. Это объясняет большое количество проводимых работ по тематике механизированного сбора плодов и ягод, разработке новых методов по роботизации этого процесса, а также модификация существующих технических устройств [1–4]. Важность задачи обоснования параметров роботизированного манипулятора для съема плодов и поиска эффективных конструкций для реализации роботизированного способа сбора фруктов подтверждается большим количеством экспериментальных разработок за рубежом [5–9].

На сегодняшний день созданы все предпосылки для разработки и внедрения роботизированных технических средств в садоводстве, однако основная трудность, с которой сталкиваются разработчики – это определение оптимальных геометрических и конструктивных параметров мехатронных исполнительных устройств, позволяющих в условиях множества неопределённостей осуществлять сбор плодов в зоне кроны дерева в кратчайшее время и с минимальным количеством холостых перемещений [10–12].

Цель исследований – провести компьютерное моделирование и установить оптимальные конструктивные параметры роботизированного манипулятора, позволяющего осуществлять сбор плодов в зоне кроны дерева интенсивного типа в кратчайшее время и с минимальным количеством холостых перемещений.





Методика исследований. В работе использованы методы компьютерного моделирования, дифференциального и интегрального исчисления и программирования с помощью программных средств Matlab, Simulink, Simscape, САПР КОМПАС-3D v21. При моделировании конструкции манипуляторного устройства, учитывались агротехнические требования на базовые процессы машинных технологиях в садоводстве и физико-механические особенности строения крон плодовых деревьев интенсивного типа.

Для обоснования параметров роботизированного манипулятора для съема плодов предъявлены следующие исходные технические требования.

1. Манипулятор должен обладать свойствами автономности, иметь возможность проводить анализ свойств внешней среды и автоматически изменять рабочие режимы работы.

2. Манипулятор должен иметь возможность захвата плода в пределах рабочей зоны на поверхности кроны дерева и в глубине кроны не более 200 мм. Точность позиционирования звеньев роботизированного манипулятора относительно плодов должна составлять 10–20 мм.

3. Манипулятор после успешного захвата плода должен осуществлять поворотные движения устройства не менее чем на 45 град.

4. Манипулятор должен осуществлять съём плодов в зоне плоской кроны дерева со следующими размерами: по вертикали от почвы от 1000 до 3500 мм, по горизонту 1500 мм.

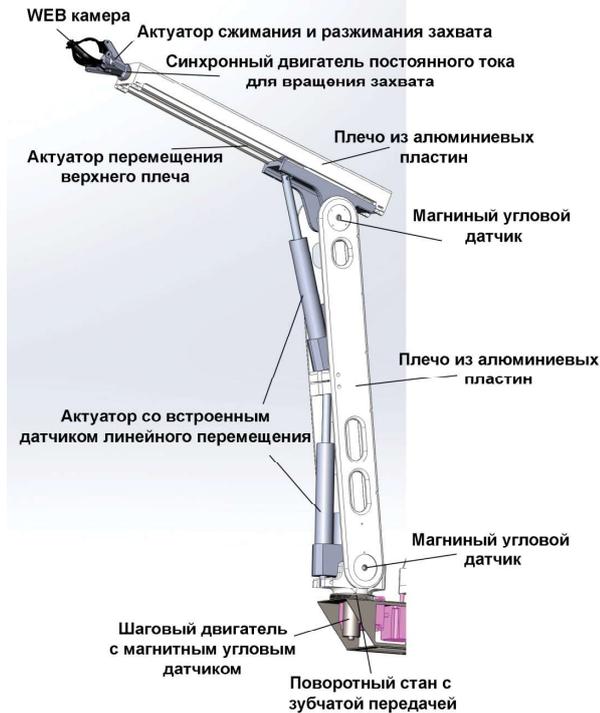


Рис. 1. 3D-модель роботизированного манипулятора

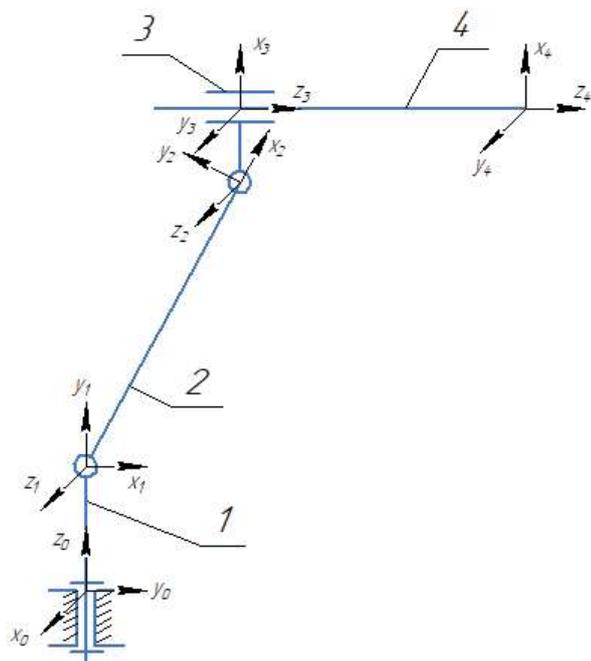


Рис. 2. Кинематическая схема манипулятора

4. Требования к массогабаритным характеристикам роботизированного манипулятора: масса роботизированного манипулятора не должна превышать более 45 кг, масса поднимаемого объекта (плода) при полном вылете плеча должна быть не менее 2 кг, расстояние вылета верхнего плеча не должна превышать более 700 мм, расстояние вылета верхнего и нижнего плеч не должна превышать 2100 мм.

Результаты исследований. С учётом предъявленных требований к конструкции манипулятора создана имитационная модель, включающая в себя основание, нижнее плечо, верхнее плечо, шаговый двигатель с угловым датчиком, поворотные стан с зубчатой передачей, нижний актуатор, верхний актуатор, актуатор перемещения верхнего плеча, актуатор сжатия и разжатия захвата, захват, магнитный угловой датчик. 3D-модель роботизированного манипулятора представлена на рис. 1.

Роботизированный манипулятор имеет 4 степени подвижности, 3 из которых вращательные и одно поступательное, при этом вторая и третья степени подвижности управляются линейными актуаторами.

Для решения задачи кинематики для манипулятора построена специальная система координат по методу Денавита-Хартенберга:

1. Построена абсолютная система координат $O_0X_0Y_0Z_0$, в которой Z_0 направлена вдоль оси первого сочленения в направлении схвата.

2. Z_i направлена вдоль оси $(i + 1)$ -го шарнира. При $i = N$ ось Z_N сонаправлена Z_{N-i} .

3. Начало i -й системы координат – в точке пересечения осей Z_{i-1} и Z_i или в точке пересечения оси Z_i и общей нормали к осям Z_{i-1} и Z_i (если они не пересекаются).

4. Ось X_i направлена вдоль общей нормали к осям Z_{i-1} и Z_i (вдоль вектора $Z_{i-1} \cdot Z_i$, где Z_{i-1} и Z_i – орты соответствующей системы координат).

5. Ось Y_i направлена так, чтобы полученная система координат была правосторонней.

6. Параметр d_i равен расстоянию от начала $(i - 1)$ системы координат до точки пересечения осей Z_{i-1} и X_i , измеренному в направлении оси Z_{i-1} .

7. Параметр a_i равен расстоянию от точки пересечения осей Z_{i-1} и X_i до начала i -й системы координат, измеренному в направлении оси X_i .

8. Параметр q_i равен углу поворота оси X_{i-1} вокруг оси Z_{i-1} до совпадения с осью X_i . В нашем случае является обобщенной координатой во всех трёх звеньях.

9. Параметр α_i равен углу поворота оси Z_{i-1} вокруг оси X_i до совпадения с осью Z_i .

Построена кинематическая схема манипулятора (рис. 2).

Проведено решение прямой задачи кинематики (см. таблицу).

Параметры Денавита-Хартенберга манипулятора

№	a	d	q	α
1	0	$L1$	$q1$	$\pi/2$
2	$L2$	0	$q2$	0
3	$L3$	0	$q3$	$\pi/2$
4	0	$q4$	0	0

$q1, q2, q3$ – значения обобщенных координат, определяющие положение вращательных степеней подвижности роботизированного манипулятора, $q4$ – координата поступательной степени подвижности роботизированного манипулятора. Определены длины звеньев роботизированного манипулятора: $L1 = 0,22, L2 = 1,05, L3 = 0,13$.

Решена прямая позиционная задача, которая заключалась в том, что по заданному вектору обобщенных координат $q = (q_1, q_2, \dots, q_N)^T$ было определено положение захвата манипулятора $s = f(q)$. Пространственное положение захвата роботизированного манипулятора найдено в форме матрицы:

$$T = \begin{pmatrix} R & p \\ 000 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Пусть $A_i, i = 1, 2, \dots, N$ – матрицы, задающие переход от системы координат i -го звена к системе координат $(i-1)$ -го звена. Тогда $T_N = A_1 A_2 \dots A_N$ – решение поставленной задачи. Также введены $T_i = T_{i-1} A_i$ для $i = 1, 2, \dots, N$, при этом $T_0 = E$.

После представления каждой из найденных преобразований в виде матрицы, получена матрица для совмещения системы координат:

$$A_i(d_i, a_i, q_i, \alpha_i) = \begin{pmatrix} c_i & -c_{ai} s_i & s_{ai} s_i & a_i c_i \\ s_i & c_{ai} c_i & -s_{ai} c_i & a_i s_i \\ 0 & s_{ai} & c_{ai} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Здесь $c_i = \cos q_i, s_i = \sin q_i, c_{ij} = \cos(q_i + q_j), s_{ij} = \sin(q_i + q_j)$. Подставив в матрицы преобразования параметры, найденные ранее, получим:

$$T_1 = A_1 = \begin{pmatrix} c_1 & 0 & s_1 & 0 \\ s_1 & 0 & -c_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$T_2 = A_1 A_2 = \begin{pmatrix} c_1 & 0 & s_1 & 0 \\ s_1 & 0 & -c_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & l_1 c_2 \\ s_2 & c_2 & 0 & l_1 s_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} c_1 c_2 & -c_1 s_2 & s_1 & l_1 c_1 c_2 \\ s_1 c_2 & -s_1 s_2 & -c_1 & l_1 s_1 c_2 \\ s_2 & c_2 & 0 & l_1 s_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$T_3 = T_2 A_3 = \begin{pmatrix} c_1 c_2 & -c_1 s_2 & s_1 & l_1 c_1 c_2 \\ s_1 c_2 & -s_1 s_2 & -c_1 & l_1 s_1 c_2 \\ s_2 & c_2 & 0 & l_1 s_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & l_2 c_3 \\ s_3 & c_3 & 0 & l_2 s_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} c_1 c_2 c_3 - c_1 s_2 s_3 & -c_1 c_2 s_3 - c_1 s_2 c_3 & s_1 & c_1 c_2 l_2 c_3 - c_1 s_2 l_2 s_3 + l_1 c_1 c_2 \\ s_1 c_2 c_3 - s_1 s_2 s_3 & -s_1 c_2 s_3 - s_1 s_2 c_3 & -c_1 & s_1 c_2 l_2 c_3 - s_1 s_2 l_2 s_3 + l_1 s_1 c_2 \\ s_2 c_3 + c_2 s_3 & -s_2 s_3 + c_2 c_3 & 0 & s_2 l_2 c_3 + c_2 l_2 s_3 + l_1 s_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} c_1 c_{23} & -c_1 s_{23} & s_1 & c_1 (l_2 c_{23} + l_1 c_2) \\ s_1 c_{23} & -s_1 s_{23} & -c_1 & s_1 (l_2 c_{23} + l_1 c_2) \\ s_{23} & c_{23} & 0 & l_2 s_{23} + l_1 s_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Координаты центра схвата $x = c_1 (l_2 c_{23} + l_1 c_2), y = s_1 (l_2 c_{23} + l_1 c_2), z = l_2 s_{23} + l_1 s_2$.

Решение обратной задачи кинематики. Обобщенные координаты $q^* = (q_1^*, q_2^*, \dots, q_N^*)'$ найдены при заданном положении и ориентации схвата $s = s^*$ или $T_N = T_N^*$. Задаются они соотношением $q^* = f_T^{-1}(T_N^*)$.



Найдена матрица миноров:

$$M = \begin{pmatrix} c_1 c_{23} & s_1 c_1 c_{23} + s_1 s_{23}^2 & c_{23}^2 s_1 + s_{23}^2 s_1 & 0 \\ -s_1 c_{23} & c_1 s_{23} & c_1 (c_{23}^2 + s_{23}^2) & 0 \\ c_1^2 s_{23} + s_1^2 s_{23} & -c_1^2 c_{23} - s_1^2 c_{23} & 0 & 0 \\ m_1 & m_2 & m_3 & m_4 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} m_1 &= (c_1^2 + s_1^2)(s_{23}(l_2 s_{23} + l_1 s_2) - c_{23}(l_2 c_{23} + l_1 c_2)) \\ m_2 &= (c_1^2 + s_1^2)(s_{23}(l_2 c_{23} + l_1 c_2) - c_{23}(l_2 s_{23} + l_1 s_2)) \\ m_3 &= c_1 c_{23}(-s_1 s_{23}(l_2 s_{23} + l_1 s_2) - c_{23}(s_1(l_2 c_{23} + l_1 c_2)) - \\ &\quad - s_1 c_{23}(-c_1 s_{23} s_1(l_2 c_{23} + l_1 c_2) - c_{23} c_1(l_2 c_{23} + l_1 c_2)) + \\ &\quad + s_{23}(-c_1 s_{23}(l_2 s_{23} + l_1 s_2) + s_1 s_{23} c_1(l_2 c_{23} + l_1 c_2)) \\ m_4 &= c_{23}^2(c_1^2 - s_1^2) + s_{23}^2(c_1^2 + s_1^2) \end{aligned} \quad (7)$$

Отсюда матрица алгебраических дополнений найдена исходя из того, что $A_{ij} = (-1)^{i+j} \cdot M_{ij}$:

$$A = \begin{pmatrix} -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \end{pmatrix} \cdot M \quad (8)$$

$$A \cdot T = \begin{pmatrix} c_1 c_{23} & s_1 c_{23} & s_{23}(c_1^2 + s_1^2) & -m_1 \\ -s_1(c_1 c_{23} + s_{23}^2) & c_1 s_{23} & c_{23}(c_1^2 + s_1^2) & m_2 \\ s_1(c_{23}^2 + s_{23}^2) & -c_1(c_{23}^2 + s_{23}^2) & 0 & -m_3 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 \end{pmatrix}$$

$$T^{-1} = \frac{1}{|T|} \cdot T^T = \frac{1}{(c_1^2 + s_1^2)(c_{23}^2 + s_{23}^2)} \times$$

$$\begin{pmatrix} c_1 c_{23} & s_1 c_{23} & s_{23}(c_1^2 + s_1^2) & -m_1 \\ -s_1(c_1 c_{23} + s_{23}^2) & c_1 s_{23} & c_{23}(c_1^2 + s_1^2) & m_2 \\ s_1(c_{23}^2 + s_{23}^2) & -c_1(c_{23}^2 + s_{23}^2) & 0 & -m_3 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 \end{pmatrix} \quad (9)$$

Определение границы рабочей области. Решение позиционной задачи позволило определить положение захвата роботизированного манипулятора при известных значениях обобщенных координат манипулятора $q_i, i = 1, 2 \dots N$. Обобщенные координаты могут изменяться в пределах ограниченных конструкцией роботизированного манипулятора: $|q_1| \leq 90^\circ, 5^\circ \leq q_2 \leq 65^\circ, 45^\circ \leq q_3 \leq 156^\circ$.

В результате решения прямой позиционной задачи получены уравнения координаты центра схвата: $x = c_1(l_2 c_{23} + l_1 c_2); y = s_1(l_2 c_{23} + l_1 c_2); z = l_2 s_{23} + l_1 s_2$. Построены графики рабочего пространства роботизированного манипулятора (рис. 3).

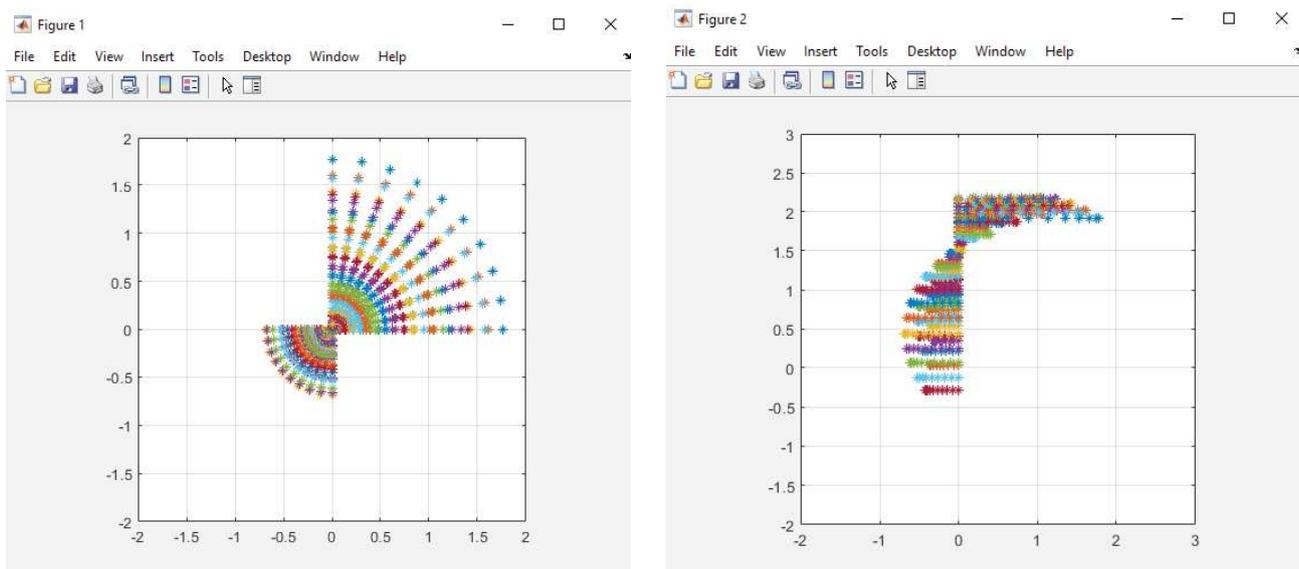


Рис. 3. Графики рабочей зоны в осях Ox, Oy и в осях Ox, Oz

Для реализации имитационной модели и проверки рабочей зоны выбран симулятор CoppeliaSim. Архитектура симулятора позволяет использовать различные высокоуровневые языки программирования и различные типы датчиков и RGBD-сенсоров, подключать распространенные пакеты, в том числе MATLAB (рис. 4).



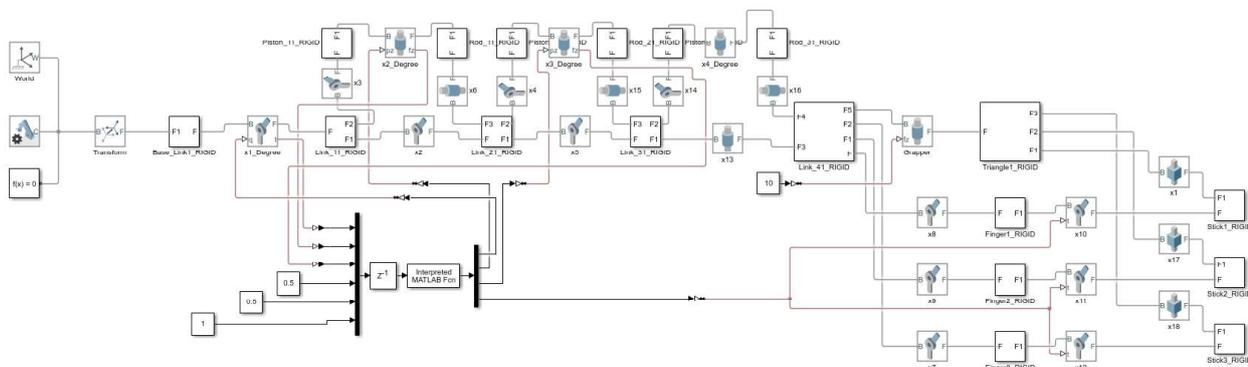


Рис. 4. Модель с подключенной функцией обратной кинематики в MATLAB Simulink

На первом этапе реализации модели с помощью камеры в среде CoppeliaSim получены координаты объекта (в нашем случае модель плода), рис. 5, данные координаты передаются в Simulink SimScare (V-REP симулятор роботов), где производится решение обратной задачи кинематики по разработанной методике, вследствие чего манипулятор начинает движение к целевой точке.

Изображения траектории движения манипулятора относительно осей X, Y, Z из рабочего пространства при проведении компьютерного моделирования движения в SimScare роботизированного манипулятора приведены на рис. 5.

На основе разработанных моделей собираемого объекта (плода яблони) и объектов на которых он расположен (плодовые деревья) создана сцена с помощью элементов Joints-звеньев и Shapes-формы. Модель яблока в симулятор CoppeliaSim загружена в виде файла с расширением OBJ, текстура задана из файла с расширением .jpeg. В сцену включены роботизированный манипулятор и сенсорная система (рис. 6).

В симуляторе возможно размещение роботизированного манипулятора на мобильную платформу и реализовано взаимодействие собираемого объекта с захватным устройством.

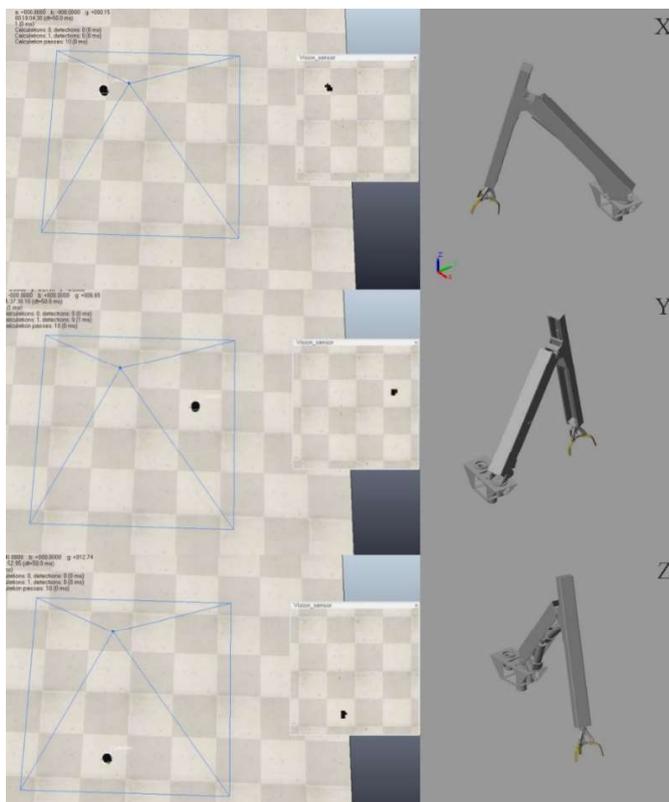


Рис. 5. Траектория движения манипулятора относительно оси X, Y, Z

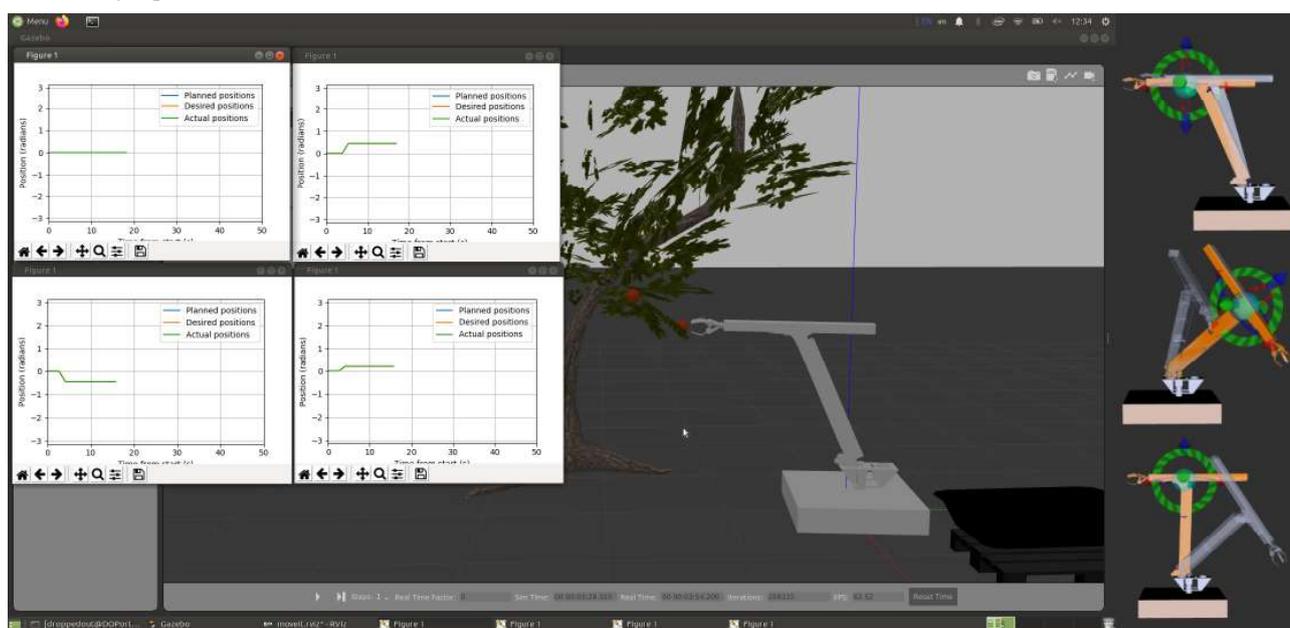


Рис. 6. Сцена симуляции съема плодов в CoppeliaSim

Заклучение. В результате проведенных исследований разработана кинематическая схема и имитационная модель роботизированного манипулятора в среде Simulink SimScare, в которой системы координат привязаны к сочленениям степеней подвижности манипулятора. Установлены обобщенные координаты центра схвата манипулятора, которые могут изменяться в пределах, обусловленных конструкцией механизма $|q_1| \leq 90^\circ$, $5^\circ \leq q_2 \leq 65^\circ$, $45^\circ \leq q_3 \leq 156^\circ$ и определяющие рабочее пространство манипулятора: в полуплоской кроне плодового дерева с расположением плодов по высоте кроны от 600 до 2000 мм: габаритные размеры 200×700×600 мм, количество степеней свободы – 4, углы поворота вращательных звеньев от 5 до 156 град.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Khort D.O., Kutuyev A.I., Smirnov I.G. Research into the Parameters of a Robotic Platform for Harvesting Apples. *Advances in Computer Science for Engineering and Manufacturing. ISEM 2021 // Lecture Notes in Networks and Systems, Springer, Cham. 2022. Vol. 463.*
2. Khort D., Kutuyev A., Filippov R., Kiktev N., Komarchuk D. Robotized platform for picking of strawberry berries // 2019 IEEE International Scientific-Practical Conference: Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2019 - Proceedings. 2019. С. 869–872.
3. Khort D.O., Kutuyev A.I., Filippov R.A., Vershinin R.V. // E3S Web of Conferences. Ser. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment. 2020. С. 01045.
4. Хорт Д.О., Филиппов Р.А., Кутырёв А.И. Разработка универсального робототехнического средства сельскохозяйственного назначения // *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2019. № 13. С. 69–73.
5. Wei Ji, Dean Zhao, Fengyi Cheng, Bo Xu, Ying Zhang, Jinjing Wang. Automatic recognition vision system guided for apple harvesting robot // *Computers & Electrical Engineering*. 2012. Vol. 38. No. 5. P. 1186–1195.
6. Zhao De-An, Lv Jidong, Ji Wei, Zhang Ying, Chen Yu, Design and control of an apple harvesting robot // *Biosystems Engineering*. 2011. Vol. 110. P. 112–122.
7. Khort D., Kutuyev A., Smirnov I., Osypenko V., Kiktev N. Computer Vision System for Recognizing the Coordinates Location and Ripeness of Strawberries // *Data Stream Mining & Processing, Communications in Computer and Information Science, Springer, Cham. 2020. No. 1158.*
8. Zhang Z., Ighathinathane C., Li J., Cen H., Lu Y., Flores P. Technology progress in mechanical harvest of fresh market apples // *Comput. Electron. Agric.* 2020. 175. 105606 p.
9. Zhenghao Fei, Stavros G. Vougioukas, Co-robotic harvest-aid platforms: Real-time control of picker lift heights to maximize harvesting efficiency // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. Vol. 180. 105894.
10. Khort D., Kutuyev A., Filippov R., Kiktev N., Komarchuk D. Robotized Platform for Picking of Strawberry Berries // *Science and Technology (PIC S&T)*. 2019. P. 869–872.
11. Khort D., Kutuyev A., Filippov R., Semichev S. Development control system robotic platform for horticulture // *E3S Web of Conferences. Ser. 1st International Scientific and Practical Conference Innovative Technologies in Environmental Engineering and Agroecosystems*. 2021.

REFERENCES

1. Khort D.O., Kutuyev A.I., Smirnov I.G. Research into the Parameters of a Robotic Platform for Harvesting Apples. *Advances in Computer Science for Engineering and Manufacturing. ISEM 2021. Lecture Notes in Networks and Systems. Springer, Cham. 2022; 463.*
2. Khort D., Kutuyev A., Filippov R., Kiktev N., Komarchuk D. Robotized platform for picking of strawberry berries. 2019 IEEE International Scientific-Practical Conference: Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2019 – Proceedings. 2019: 869–872.
3. Khort D. O., Kutuyev A.I., Filippov R.A., Vershinin R.V. E3S Web of Conferences. Ser. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment. 2020:01045.
4. Khort D.O., Filippov R.A., Kutuyev A.I. Development of a universal robotic means for agricultural purposes. *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2019; 13: 69–73.
5. Wei Ji, Dean Zhao, Fengyi Cheng, Bo Xu, Ying Zhang, Jinjing Wang. Automatic recognition vision system guided for apple harvesting robot. *Computers & Electrical Engineering*. 2012; 38; 5: 1186–1195.
6. Zhao De-An, Lv Jidong, Ji Wei, Zhang Ying, Chen Yu, Design and control of an apple harvesting robot. *Biosystems Engineering*. 2011; 110: 112–122.
7. Khort D., Kutuyev A., Smirnov I., Osypenko V., Kiktev N. Computer Vision System for Recognizing the Coordinates Location and Ripeness of Strawberries. *Data Stream Mining & Processing, Communications in Computer and Information Science. Springer, Cham. 2020; 1158.*
8. Zhang Z., Ighathinathane C., Li J., Cen H., Lu Y., Flores P. Technology progress in mechanical harvest of fresh market apples. *Comput. Electron. Agric.* 2020; 175: 105606.
9. Zhenghao Fei, Stavros G. Vougioukas, Co-robotic harvest-aid platforms: Real-time control of picker lift heights to maximize harvesting efficiency. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021; 180: 105894.
10. Khort D., Kutuyev A., Filippov R., Kiktev N., Komarchuk D. Robotized Platform for Picking of Strawberry Berries. *Science and Technology (PIC S&T)*. 2019: 869–872.
11. Khort D., Kutuyev A., Filippov R., Semichev S. Development control system robotic platform for horticulture. *E3S Web of Conferences. Ser. 1st International Scientific and Practical Conference innovative Technologies in Environmental Engineering and Agroecosystems*. 2021.

*Статья поступила в редакцию 25.04.2022; одобрена после рецензирования 26.05.2022; принята к публикации 01.06.2022.
The article was submitted 25.04.2022; approved after reviewing 26.05.2022; accepted for publication 01.06.2022.*

