

Раздел II. Анализ данных и моделирование

УДК 631.171:303.732.4

DOI 10.18522/2311-3103-2024-6-97-113

В.В. Соловьев, А.Я. Номерчук, Р.К. Филатов

СИСТЕМА ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ДЕЛЬТА-РОБОТА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Целью данной работы является разработка системы планирования траекторий перемещения дельта-робота для прополки сорняков. Дельта-робот устанавливается на мобильной платформе, которая перемещается в междурядьях культурных растений. Система технического зрения обнаруживает сорняки и определяет их координаты. Требуется планировать траекторию движения схвата при прополке сорняков без повреждения самого робота и культурных растений. Данное исследование является актуальным из-за увеличения численности населения, уменьшения пахотных площадей, естественного оттока населения из сельской местности и снижения количества сельскохозяйственной техники. Для достижения поставленной цели в работе представлено решение прямой и обратной задачи кинематики дельта-робота аналитическим методом. Предложена модель определения конструктивных параметров дельта-робота, позволяющая оценить степень влияния конструктивных параметров на его рабочую область. Определены длины рычагов дельта-робота, соответствующие поставленной задаче для прополки сорняков на кукурузных полях. Решена задача планирования траекторий путем декомпозиции на движение схвата в горизонтальной плоскости и движение по вертикали, с учетом размера комков земли и величины извлечения сорняка почвы. По результатам экспериментальных исследований показана возможность существенного уменьшения количества точек траектории движения схвата, что снижает вычислительную сложность предложенных методов и упрощает их реализацию в бортовом вычислителе робота.

Дельта-робот; планирование траекторий; коррекция траекторий перемещения; область функционирования робота; задачи кинематики.

V.V. Soloviev, A.Y. Nomerchuk, R.K. Filatov

TRAJECTORY PLANNING SYSTEM FOR THE MOVEMENT OF A DELTA ROBOT FOR AGRICULTURAL PURPOSES

The aim of this work is to develop a trajectory planning system for the movement of a delta robot used for weed cultivation. The delta robot is mounted on a mobile platform that moves between rows of cultivated plants. A vision system detects weeds and determines their coordinates. The system is tasked with planning the trajectory of the robot's gripper during weed removal, ensuring no damage is done to either the robot or the plants. This research is highly relevant due to the growing global population, decreasing arable land, rural depopulation, and a reduction in the availability of agricultural machinery. To achieve this goal, the work presents a solution to both the forward and inverse kinematics of the delta robot using an analytical approach. A model for determining the structural parameters of the delta robot is proposed, which allows the evaluation of how these parameters affect the robot's working area. The lengths of the delta robot's arms are determined, tailored to the task of weed removal in corn fields. The trajectory planning problem is addressed by decomposing the motion into horizontal movement of the gripper and vertical movement, considering the size of soil clumps and the magnitude of weed extraction. Experimental results demonstrate the possibility of significantly reducing the number of trajectory points, thus lowering the computational complexity of the proposed methods and simplifying their implementation in the robot's onboard computer.

Delta robot; trajectory planning; trajectory correction; robot working area; kinematic problems.

Введение. Дельта-робот изобрел в начале 80-х годов прошлого века швейцарский учёный Реймонд Клавель. Конструкция дельта-робота детально описана в его патенте US4976582 на «Устройство для перемещения и позиционирования элемента в пространстве» [1]. Основными достоинствами робота являются простота конструкции и высокая скорость перемещения рабочего органа. К недостаткам можно отнести относительно невысокую грузоподъемность от 1 до 12 кг. В нашей стране в сельском хозяйстве дельта-роботы пока не применяются, хотя в США, Швейцарии, Австралии и других странах они интенсивно разрабатываются и внедряются [2]. Конструктивно роботы для борьбы с сорняками представляют собой мобильную подвижную платформу [3] с установленным на ней дельта-роботом. Платформа движется вдоль рядов с растениями, а дельта-робот с системой технического зрения удаляет сорняки.

Как показано в работе [4] при применении существующих технологий обработки земель к 2030 году возникнет критический дефицит продуктов. Одним из вариантов решения данной проблемы является цифровизация сельского хозяйства. В США и Канаде 70% сельскохозяйственных земель обрабатываются с применением цифровых технологий, что повышает эффективность их использования на 20% и более. В нашей стране уровень цифровизации в сельском хозяйстве составляет менее 10%, что свидетельствует об актуальности исследований в данной работе.

В тоже время у нас проблеме цифровизации сельского хозяйства уделяется повышенное внимание, что закреплено в распоряжении Правительства РФ 29 декабря 2021 года № 3971-р «Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации отраслей агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов Российской Федерации на период до 2030 года» [5].

В свободном доступе есть большое количество публикаций, описывающих конструктивные особенности, модели и методы управления дельта-роботами. Например, работа [6] посвящена разработке модели динамики дельта-робота на основе динамики Лагранжа и Гамильтона. В статье [7] предложен метод повышения точности позиционирования рабочего органа дельта-робота с использованием обратной связи от видеокамер. Описана прямая и обратная задача кинематики для дельта-робота. Разработан алгоритм вычисления координат точки пространства, в которую должен переместиться рабочий орган. Публикация [8] посвящена разработке математической модели дельта-робота, который применяется для сортировки бытовых отходов. Авторы сосредоточились на разработке универсальной математической модели для решения обратной задачи кинематики. Статья [9] посвящена определению кинематических параметров дельта-робота на основании параметров требуемой области функционирования. Авторы представили расчетную модель, позволяющую по заданным размерам области функционирования робота, вычислить длины рычагов и карданных шарниров. В отличие от других работ, в публикации [10] рассматривается дельта-робот с дополнительным телескопическим сочленением между неподвижным основанием и подвижной площадкой. Телескопический стержень позволяет дополнительно вращать подвижную площадку. Работа [11] посвящена разработке натурной модели мобильной платформы с дельта-роботом для борьбы с сорняками. Обработку изображений для распознавания растений выполняет RSNN-нейронная сеть, обеспечивающая, по заявлениям автора, точность обнаружения и распознавания сорняков на уровне 99,5%. В статье [12] решена обратная задача кинематики для дельта-робота. Представлен алгоритм планирования траекторий движения рабочего органа при решении задачи перестановки объектов. В работе [13] рассмотрена конструкция дельта-робота, рассчитана степень подвижности, приведены примеры применения в промышленности и быту. Представлены результаты анализа кинематики и решена прямая и обратная задачи кинематики. Представлено большое количество примеров с решениями прямой и обратной задачи кинематики, а также примеры для проверки результатов решения методами, которые разработали другие авторы. Статья [14] посвящена исследованию дельта-робота с двумя рычагами, т.е. движущимися в одной плоскости. Для него решены прямая и обратная задачи кинематики. Проведены модельные эксперименты, которые показали, что отклонение рабочего органа с нагрузкой 0,2 кг и скоростью перемещения 2,618 м/с не превышает 0,6 мм.

По результатам обзора публикаций можно сделать следующие выводы:

- ♦ существует достаточно большое количество методов решения прямой и обратной задач кинематики, но требуется их совершенствование для повышения быстродействия и снижения объема вычислений в бортовом вычислителе робота;
- ♦ требуют уточнения методы определения кинематических параметров дельта-робота в зависимости от конфигурации окружающего пространства;
- ♦ методы планирования траекторий перемещения рабочего органа дельта-робота в условиях помех со стороны окружающей среды еще недостаточно развиты.

Постановка задачи. В данной работе необходимо разработать система планирования траекторий перемещения дельта-робота сельскохозяйственного назначения. Робот предназначен для прополки сорняков на кукурузных полях с шириной междурядий 45 см и предельной высотой культуры 50 см. При большей высоте кукурузы необходимость в прополке отпадает.

Требуется:

- ♦ разработать расчетную модель для определения параметров дельта-робота при заданных исходных данных;
- ♦ провести исследование кинематики и динамики дельта-робота;
- ♦ разработать метод планирования траекторий перемещения схвата с учетом изменения характеристик поверхности земли, величины извлечения сорняка и возможных препятствий на пути движения робота.

Обратная задача кинематики дельта-робота. Для разработки модели кинематики рассмотрим структуру дельта-робота, которая представлена на рис. 1,а.

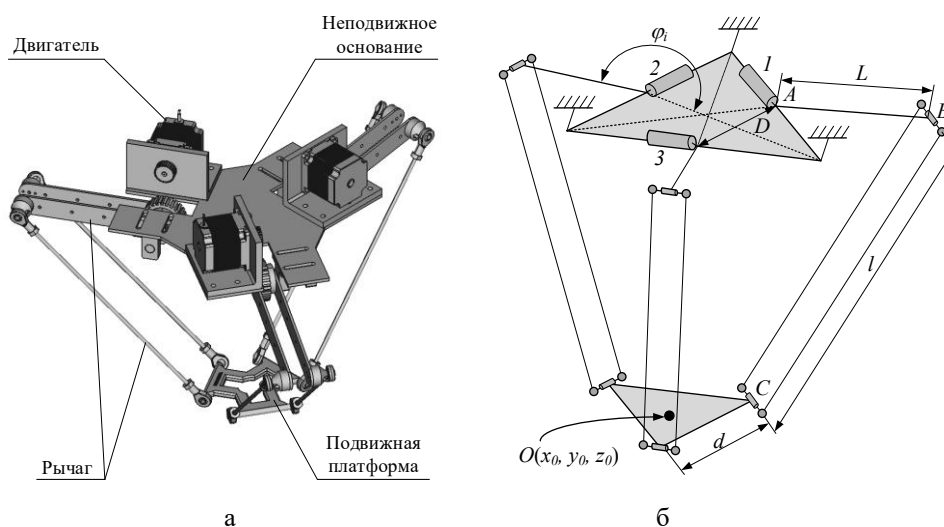


Рис. 1. Структура дельта-робота (а) и его упрощенная схема (б)

В составе робота можно выделить три двигателя, три верхних и нижних рычага, неподвижное основание и подвижную платформу, на которой крепится рабочий орган. Двигатели с редукторами крепятся на неподвижном основании, чем и обеспечивается высокая скорость перемещения робота.

Для вывода уравнений кинематики удобнее воспользоваться упрощенной схемой робота, которая представлена на рис. 1,б. Введем систему координат OXYZ, связанную с неподвижным основанием. Ось Y направлена к точке крепления рычага 1 в плоскости основания. Ось X, также лежит в плоскости основания, а ось Z направлена вертикально вверх, как представлено на рис. 2,а.

Рычаг AB перемещается в плоскости YZ и описывает сектор окружности радиусом равным AB и центром в точке A , как представлено на рис. 2,б. Сферические шарниры в точках B и C позволяют перемещаться рычагу BC в пространстве и описывать сферу радиусом BC и центром в точке C . Сфера пересекается с плоскостью YZ по окружности радиусом C_1B , где C_1 проекция точки C на плоскость YZ . Если определить координаты точки B , то можно найти угол поворота рычага AB .

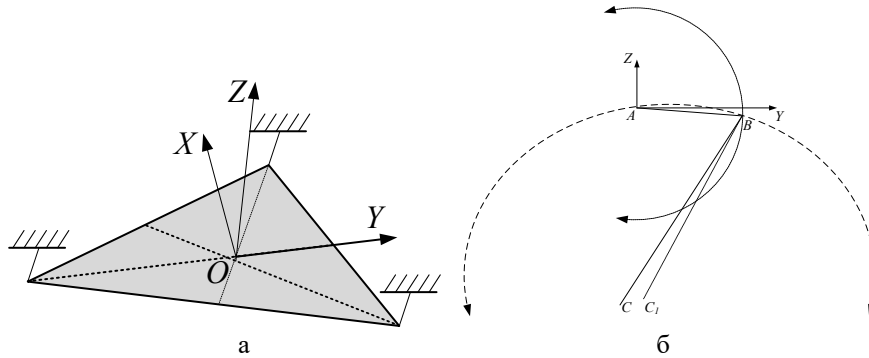


Рис. 2. Система координат (а) и расчетная схема (б) дельта-робота

Пусть центральная точка подвижной платформы имеет координаты $O(x_0, y_0, z_0)$. Тогда координаты точки C можно вычислить по формулам:

$$OC = \frac{d}{\sqrt{3}},$$

$$C \left(x_0, y_0 + \frac{d}{\sqrt{3}}, z_0 \right).$$

Координаты точки C_1 будут следующими:

$$C_1 \left(0, y_0 + \frac{d}{\sqrt{3}}, z_0 \right).$$

Длину отрезка BC_1 можно вычислить по теореме Пифагора:

$$BC_1 = \sqrt{BC^2 - CC_1^2} = \sqrt{l^2 - x_0^2}.$$

Если провести описанную окружность вокруг равностороннего треугольника расположения приводных двигателей со стороной D , то можно вычислить ее радиус по формуле:

$$R = \frac{D}{\sqrt{3}},$$

который является координатой y для точки A :

$$y_A = \frac{D}{\sqrt{3}}.$$

Тогда координаты точки A будут следующими:

$$A \left(0, \frac{D}{\sqrt{3}}, 0 \right).$$

Координаты точки B можно вычислить из системы уравнений для двух окружностей:

$$\begin{cases} (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2 = L^2, \\ (y_B - y_{C1})^2 + (z_B - z_{C1})^2 = l^2 - x_0^2. \end{cases}$$

С учетом координат центров окружностей для точек A и C_1 получим:

$$\begin{cases} \left(y_B - \frac{D}{\sqrt{3}} \right)^2 + z_B^2 = L^2, \\ \left(y_B - y_0 - \frac{d}{\sqrt{3}} \right)^2 + (z_B - z_0)^2 = l^2 - x_0^2. \end{cases}$$

В результате решения системы уравнений получим координаты точки B , на основании которых можно найти угол поворота рычага:

$$\varphi = \operatorname{atan} \frac{z_B}{z_A - y_B}.$$

Для поиска углов наклона рычагов для других моторов выполним поворот системы координат вокруг оси Z сначала на 120° , а затем на 240° , что существенно упрощает расчеты.

Матрица поворота в данном случае имеет вид:

$$M = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где α – угол поворота системы координат.

Тогда координаты точки O в новых координатах могут быть рассчитаны по формулам:

$$\begin{aligned} x_{120} &= x_0 \cdot \cos 120^\circ + y_0 \cdot \sin 120^\circ, \\ y_{120} &= -x_0 \cdot \sin 120^\circ + y_0 \cdot \cos 120^\circ, \\ z_{120} &= z_0, \\ x_{240} &= x_0 \cdot \cos 240^\circ + y_0 \cdot \sin 240^\circ, \\ y_{240} &= -x_0 \cdot \sin 240^\circ + y_0 \cdot \cos 240^\circ, \\ z_{240} &= z_0. \end{aligned}$$

Таким образом, задавая координаты подвижной платформы, можно вычислить углы поворота, на которые нужно повернуть верхние рычаги, чтобы подвижная платформа переместилась в требуемую точку.

Прямая задача кинематики дельта-робота. Пусть известны углы поворота верхних рычагов $\varphi_i, i = 1, 2, 3$ и необходимо найти координаты (x_0, y_0, z_0) точки O .

Плечи нижних рычагов вращаясь описывают в пространстве три сферы с радиусами l . Выполним параллельный перенос нижних рычагов в направлении точки O , как показано стрелками на рис. 3,а. Очевидно, что можно сместить рычаги таким образом, что все сферы пересекутся в единственной точке O . Следовательно, чтобы найти координаты точки O нужно решить систему уравнений для трех сфер, которые пересекаются в ней. Причем, радиусы сфер известны.

На рис. 3,б представлена расчетная схема для вывода уравнений сфер. Согласно рисунку: $OA_1 = OA_2 = OA_3 = \frac{D}{\sqrt{3}}$, $B_1B'_1 = B_2B'_2 = B_3B'_3 = \frac{d}{\sqrt{3}}$, $A_1B_1 = L \cdot \cos \varphi_1$, $A_2B_2 = L \cdot \cos \varphi_2$, $A_3B_3 = L \cdot \cos \varphi_3$, $B'_1(0; -\frac{D-d}{2\sqrt{3}} - L \cdot \cos \varphi_1; -L \cdot \sin \varphi_1)$,

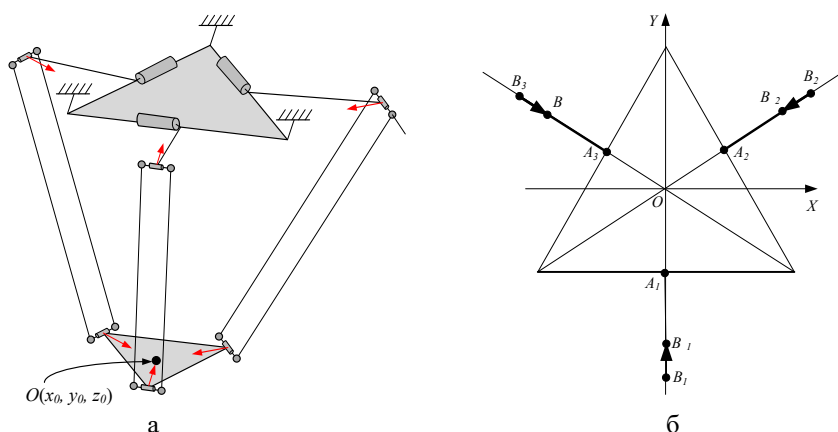


Рис. 3. Перенос нижних рычагов (а) и дополнительные построения (б) для вывода системы уравнений

$$B'_2\left(\left[\frac{D-d}{2\sqrt{3}} + L \cdot \cos \varphi_2\right] \cos 30^\circ; \left[\frac{D-d}{2\sqrt{3}} + L \cdot \cos \varphi_2\right] \sin 30^\circ; -L \cdot \sin \varphi_2\right),$$

$$B'_3\left(-\left[\frac{D-d}{2\sqrt{3}} + L \cdot \cos \varphi_3\right] \cos 30^\circ; \left[\frac{D-d}{2\sqrt{3}} + L \cdot \cos \varphi_3\right] \sin 30^\circ; -L \cdot \sin \varphi_3\right),$$

Введем замену переменных:

$$x_1 = 0, y_1 = -\frac{D-d}{2\sqrt{3}} - L \cdot \cos \varphi_1, z_1 = -L \cdot \sin \varphi_1,$$

$$x_2 = \left[\frac{D-d}{2\sqrt{3}} + L \cdot \cos \varphi_2\right] \cos 30^\circ, y_2 = \left[\frac{D-d}{2\sqrt{3}} + L \cdot \cos \varphi_2\right] \sin 30^\circ,$$

$$z_2 = -L \cdot \sin \varphi_2,$$

$$x_3 = -\left[\frac{D-d}{2\sqrt{3}} + L \cdot \cos \varphi_3\right] \cos 30^\circ, y_3 = \left[\frac{D-d}{2\sqrt{3}} + L \cdot \cos \varphi_3\right] \sin 30^\circ,$$

$$z_3 = -L \cdot \sin \varphi_3.$$

Запишем систему уравнений для трех сфер:

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = l^2, \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = l^2, \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 = l^2, \end{cases}$$

из которой можно найти координаты (x, y, z) для точки O .

Модель определения конструктивных параметров дельта-робота. На основе кинематических моделей можно разработать программную модель для определения рабочей области дельта-робота и уточнить ограничения, размеры рычагов и платформ. Модель удобнее реализовать в среде MATLAB [15], т.к. она ориентирована на выполнение научных и инженерных расчетов и позволяет с минимальными затратами времени получить готовую модель либо в виде программного кода, либо в виде структурной схемы.

При разработке программной модели определены следующие блоки:

- ♦ блок ввода исходных данных: длина верхнего рычага (L), длина нижнего рычага (l), размер верхней платформы (D), размер нижней (подвижной) платформы (d), максимальный угол отклонения верхнего рычага (φ_{max}), минимальный угол отклонения верхнего рычага (φ_{min});
- ♦ блок основных вычислений, согласно моделям кинематики робота;
- ♦ блок вывода результатов: в графическом формате в виде облака точек, в текстовом формате (размеры области функционирования робота).

Для исследования влияния параметров робота на область функционирования при этом следующее:

- ♦ длины верхних и нижних рычагов находится в соотношении 1:2;
- ♦ предельная длина нижнего рычага 1 м;
- ♦ углы наклона верхних рычагов лежат в интервале $-35^\circ \dots +105^\circ$;
- ♦ размер нижней платформы меньше размера верхней платформы.

На рис. 4,а показан трехмерный вид рабочей области дельта робота при следующих исходных данных:

- ♦ $R = 80$ мм – радиус вписанной окружности верхнего основания;
- ♦ $r = 25$ мм – радиус вписанной окружности нижней платформы;
- ♦ $l = 325$ мм – длина нижнего рычага;
- ♦ $L = 120$ мм – длина верхнего рычага.

На рис. 4,б-г представлены проекции облака точек рабочей области функционирования дельта робота на плоскости декартовой системы координат.

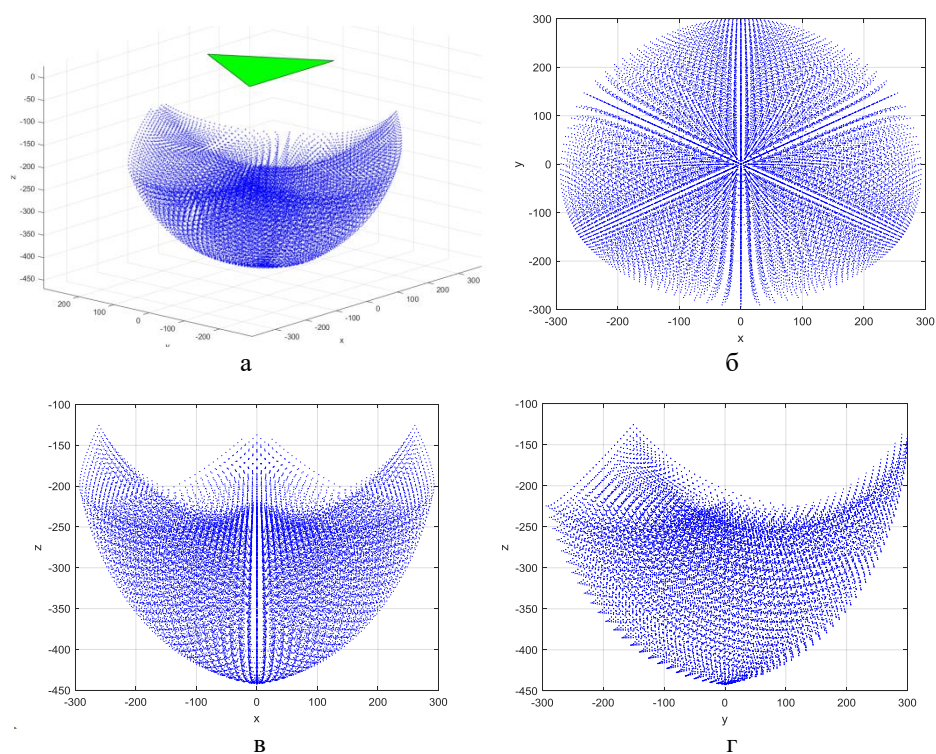


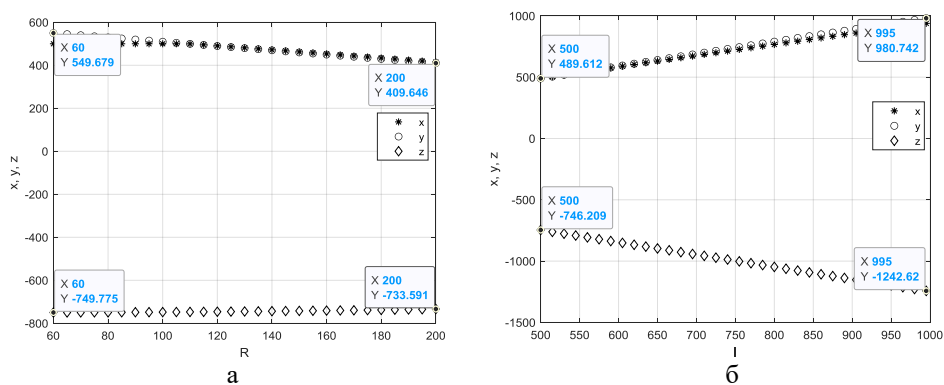
Рис. 4. Трехмерный вид (а) и проекции на плоскости XY (б), XZ (в), YZ (г) рабочей области дельта робота

Из рисунков видно, что область функционирования робота симметричная и похожа на параболоид. При заданных исходных данных порядка 200 мм пространства под неподвижной платформой недоступны для подвижной платформы, а также предельная длина по оси Z составляет 442 мм.

Примем базовые параметры дельта-робота для моделирования:

- ◆ $R = 120$ мм – радиус вписанной окружности верхнего основания;
- ◆ $r = 45$ мм – радиус вписанной окружности нижней платформы;
- ◆ $l = 500$ мм – длина нижнего рычага;
- ◆ $L = 250$ мм – длина верхнего рычага.

Последовательно варьируя каждый базовый параметр и фиксируя остальные можно получить графики изменения рабочей области функционирования робота, представленные на рис. 5.



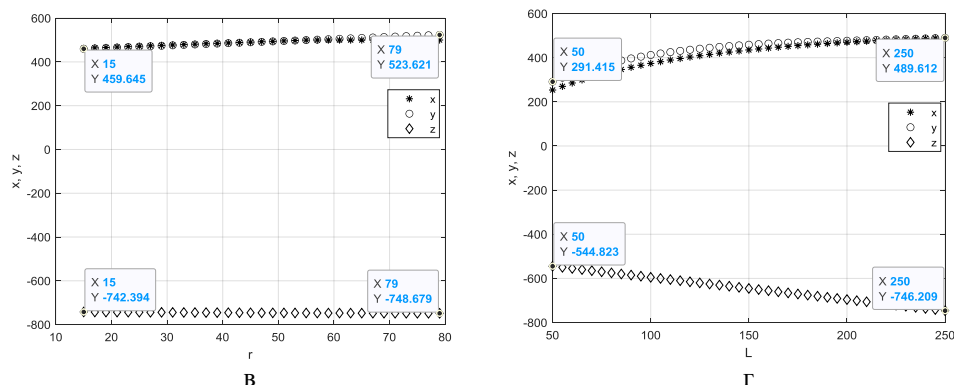


Рис. 5. Изменение области функционирования робота от размеров неподвижной платформы (а), длины нижнего рычага (б), размеров подвижной платформы (в), длины верхнего рычага (г)

Согласно рис. 5,а при увеличении размеров неподвижной платформы в 3,33 раза, на которой закреплены двигатели робота, рабочая глубина по оси Z уменьшается незначительно на 2%. Размеры рабочей области по осям X и Y уменьшаются на 25%. Согласно рис. 5,б при увеличении длины нижних рычагов в 2 раза, рабочая глубина по оси Z увеличивается на 66%. Размеры рабочей области по осям X и Y увеличиваются на 100%. Согласно рис. 5,в при увеличении размеров подвижной платформы в 8 раз, рабочая глубина по оси Z практически не изменяется. Размеры рабочей области по осям X и Y увеличиваются на 14%. Согласно рис. 5,г при увеличении длины верхнего рычага в 5 раз, рабочая глубина по оси Z увеличивается на 37%. Размеры рабочей области по осям X и Y увеличиваются на 68%. По результатам моделирования видно, что наибольший вклад в изменение области функционирования робота оказывают размеры верхних и нижних рычагов.

Определение длины рычагов дельта-робота. Согласно проведенным исследованиям и требованиям к обработке междурядьев шириной 45 см и высотой сельскохозяйственных культур 50 см проведено моделирование параметров робота для обработки одновременно двух междурядьев и выстроена рабочая область, представленная на рис. 6,а.

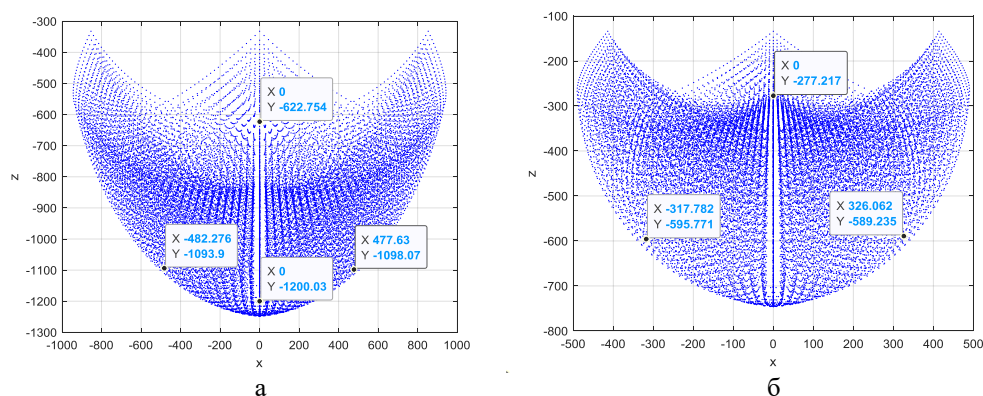


Рис. 6. Размеры области функционирования робота для обработки двух (а) и одного (б) междурядьев

Согласно результатам моделирования дельта-робот сможет обслуживать два междурядья при длине верхних рычагов $L = 250$ мм и длине нижних рычагов $l = 1000$ мм. При этом общая высота робота составит 1200 мм, с «мертвой зоной» по оси Z 600 мм.

Результаты моделирования области функционирования дельта-робота при обработке одного междурядья представлены на рис. 6, б. Согласно результатам моделирования дельта-робот сможет обслуживать одно междурядье при длине верхних рычагов $L = 250$ мм и длине нижних рычагов $l = 500$ мм. При этом общая высота робота составит 750 мм, с «мертвой зоной» по оси Z 300 мм. Таким образом, для снижения массогабаритных параметров и повышения жесткости конструкции целесообразно реализовать робота для обработки одного междурядья.

Планирование траектории движения схвата робота. Задача локального планирования траекторий движения может решаться с применением интеллектуальных алгоритмов и методов [16], методом потенциальных полей [17], методом с использованием неустойчивых режимов движения [18], аналитическими и гибридными методами [19].

В данной работе задачу планирования траекторий подвижной платформы дельта-робота в среде без препятствий будем рассматривать с позиции поиска траектории движения между текущей точкой подвижной платформы $O_1(x_T, y_T, z_T)$ и заданной точкой $O_2(x_K, y_K, z_K)$ за ограниченное время t_c . На рис. 7 показаны возможные кривые для изменения углов наклона верхних рычагов при движении подвижной платформы из точки O_1 в O_2 .

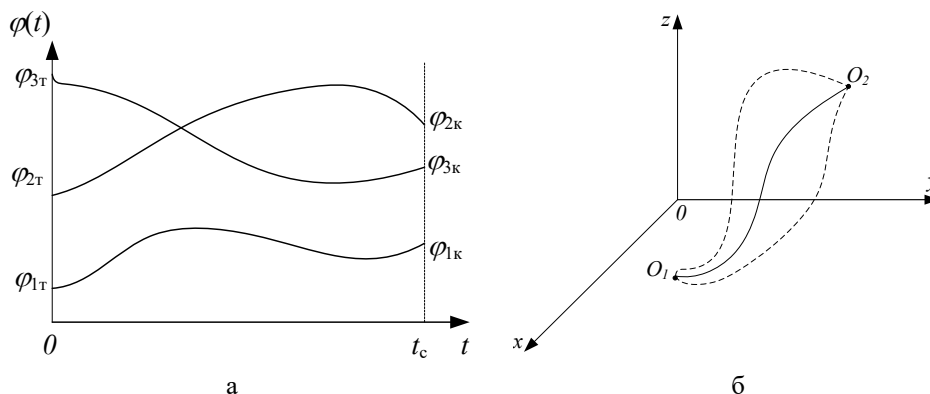


Рис. 7. Изменение углов φ_i при перемещении подвижной платформы из точки O_1 в O_2 (а) и траектория движения подвижной платформы (б)

Согласно рис. 7 на углы и угловые скорости движения рычагов дельта-робота при отработке траектории из точки O_1 в O_2 накладываются следующие ограничения:

$$\varphi_{0i}(0) = \varphi_{0j}, \varphi_{ki}(t_c) = \varphi_{kj}, \dot{\varphi}_{0i}(0) = 0, \dot{\varphi}_{ki}(t_c) = 0,$$

где $\varphi_{0j}, \varphi_{kj}$ – начальные и конечные углы ориентации верхних рычагов.

Предположим, что дельта-робот функционирует в хорошо формализованной среде при отсутствии препятствий. В этом случае, траекторию его движения следует рассматривать как кривую в трехмерном пространстве, по которой перемещается схват робота. Пространственную траекторию можно представить как множество точек, через которую можно провести кривую и в этом смысле задачу планирования траектории перемещения можно рассматривать как задачу интерполяции.

В работе [20] представлен эффективный метод интерполяции из заданного множества точек, позволяющий получить гладкую кривую. Результирующая кривая проходит через каждую точку и представляет собой композицию полиномов третьего порядка. Рассмотрим пару соседних точек (x_i, y_i) и (x_{i+1}, y_{i+1}) , которые заданы априорно. Для них можно вычислить величину наклона сплайна по формуле:

$$m_i = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i}.$$

Тогда средневзвешенное значение наклона s_i для сплайна может быть определено по формуле:

$$S_i = \frac{|m_{i+1}-m_i||m_{i-1}|+|m_{i-1}-m_{i-2}||m_i|}{|m_{i+1}-m_i|+|m_{i-1}-m_{i-2}|}.$$

Если знаменатель выражения для s_i становится равным нулю, то средневзвешенное значение определяется формулой:

$$S_i = \frac{m_{i-1}+m_i}{2}.$$

Сплайн представляется функцией третьего порядка в виде многочлена:

$$P_i(x) = a_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3.$$

где $a_i = y_i$, $b_i = s_i$, $c_i = \frac{3m_i-2s_i-s_{i+1}}{x_{i+1}-x_i}$, $d_i = \frac{s_i+s_{i+1}-2m_i}{(x_{i+1}-x_i)^2}$.

В этом случае сплайн является дифференцируемой функцией. Как видно из описания метода, его достаточно просто реализовать в управляющем контроллере дельта-робота.

В отличие от плоского движения, движение в пространстве описывается сложной системой уравнений, что требует производительного устройства управления. В данном случае, целесообразно разделить движения робота на отдельные движения в плоскости OXY и в вертикальной плоскости вдоль оси Z , найти массивы точек перемещения и объединить в единый ряд данных. При этом, неоптимальность траектории будет компенсироваться высокой скоростью перемещения робота в пространстве.

На рис. 8 представлена обобщенная траектория движения схвата робота в плоскости вдоль оси Z .

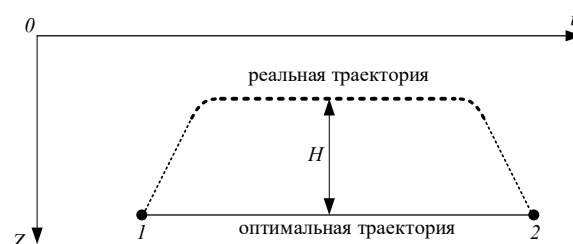


Рис. 8. Траектория движения схвата робота в плоскости вдоль оси Z

Как видно из рис. 8, схват робота перемещается из точки 1 в точку 2 по некоторой трапециевидной траектории. Она отличается от оптимальной траектории из-за неоднородности земли в обрабатываемом междурядье, что требует подъема схвата на некотором расстоянии над землей для исключения его повреждений, а также требует извлечения захваченного сорняка из земли и перемещения схвата вдоль оси Z . Высота трапеции определяется диаметром комков земли в междурядье и требуемой высотой извлечения сорняка из земли и может быть описана неравенством:

$$H \geq \max(\delta h_1, \delta h_2).$$

где δh_1 – диаметр комков земли в междурядье; δh_2 – высота извлечения сорняка из земли.

Очевидно, что высота извлечения сорняка из земли может задаваться априорно ($\delta h_2 = \text{const}$), по результатам обследования обрабатываемого участка, а диаметр комков земли в междурядье может оцениваться системой технического зрения робота в реальном времени ($\delta h_1 = \text{var}$). Тогда возможны следующие траектории движения схвата робота в вертикальной плоскости, как представлено на рис. 9. Согласно рисунку, робот захватывает сорняк в точке 1, разводит схват в точке 2 и перемещается к новому сорняку в точке 3.

Очевидно, что перемещение схвата с сорняком в плоскости OXY , когда он еще не полностью извлечен из земли приведет к возрастанию нагрузок на подвижное основание робота. Поэтому в случае $\delta h_1 < \delta h_2$ переход с вертикального на горизонтальное движение осуществляется под углом в 45° , что позволит гарантированно извлечь сорняк из земли и уменьшить общую длину траектории из точки 1 в точку 3.

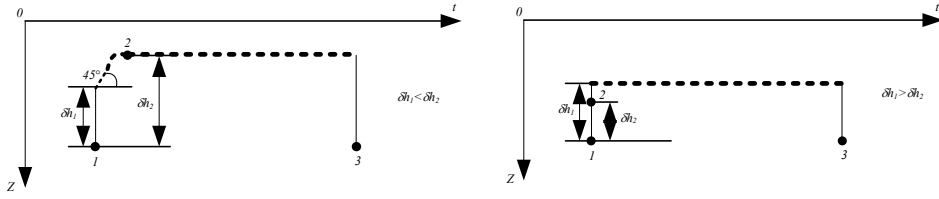


Рис. 8. Возможные траектории движения схвата робота в зависимости от соотношения величин δh_i

Участки земли для обработки роботами должны быть заранее подготовлены: удалены камни и ветки, разбиты комья земли и т.п. Поэтому с учетом результатов предыдущего пункта в качестве препятствий следует рассматривать растения обрабатываемой культуры, которые могут быть повреждены подвижной платформой и схватом робота, особенно на уровне земли.

Допустим, система технического зрения робота определяет координаты культурного растения (x_k, y_k) в ряду и растения посажены на таком расстоянии, что между ними может переместиться подвижная платформа со схватом без их повреждения. Введем понятие радиус безопасности $r_b > \frac{d}{\sqrt{3}}$ вокруг растения. Тогда, для безопасного движения вокруг растения необходимо обеспечить выполнение неравенства:

$$\sqrt{(x_k - x_0)^2 + (y_k - y_0)^2} \geq r_b,$$

где x_0, y_0 – координаты центра подвижной платформы со схватом.

Координаты границ окружности можно вычислить по формулам:

$$\begin{cases} x_i = x_k + r_b \cdot \cos(\alpha_i), \\ y_i = y_k + r_b \cdot \sin(\alpha_i), \\ \alpha_i = \alpha_{i-1} + \delta\alpha, \end{cases} \quad (1)$$

где $\delta\alpha$ – задается априорно исходя из требуемой гладкости траектории обхода растения.

Для определения диапазона изменения угла α_i рассмотрим рис. 9.

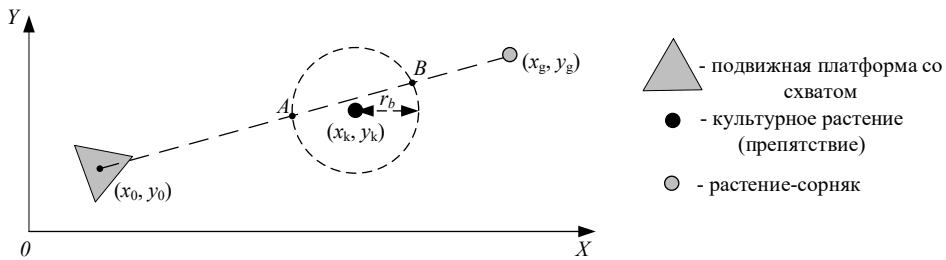


Рис. 9. К определению диапазона изменения угла α_i

Согласно рис. 9 нужно переместить подвижную платформу из точки с координатами (x_0, y_0) к сорняку с координатами (x_g, y_g) . Прямая соединяющая эти точки может не иметь пересечений с окружностью вокруг препятствия, иметь одно или два пересечения. Уравнение прямой по двум точкам, совместно с уравнением окружности образуют систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{x-x_0}{x_k-x_0} = \frac{y-y_0}{y_k-y_0}, \\ (x_k - x_0)^2 + (y_k - y_0)^2 \geq r_b^2. \end{cases} \quad (2)$$

В случае пересечения прямой и окружности решение системы уравнений (2) позволяет получить координаты (x_A, y_A) и (x_B, y_B) , которые после подстановки в (1) позволят найти α_A и α_B .

Результаты модельных экспериментов. Программное обеспечение для моделирования движения схвата робота в пространстве с учетом препятствий реализовано в среде PyCharm на языке Python. Приняты следующие параметры моделирования $\delta h_1 = 0,025$ м; $\delta h_2 = 0,05$ м; $\delta \alpha = 5\pi/180$ рад; $r_b = 0,07$ м; $d = 0,025$ м.

При моделировании отрабатывалось перемещение схвата робота по диагонали в среде размером $0,5 \times 0,5$ метров с одиночными, двойными и тройными растениями-препятствиями, как представлено на рис. 10.

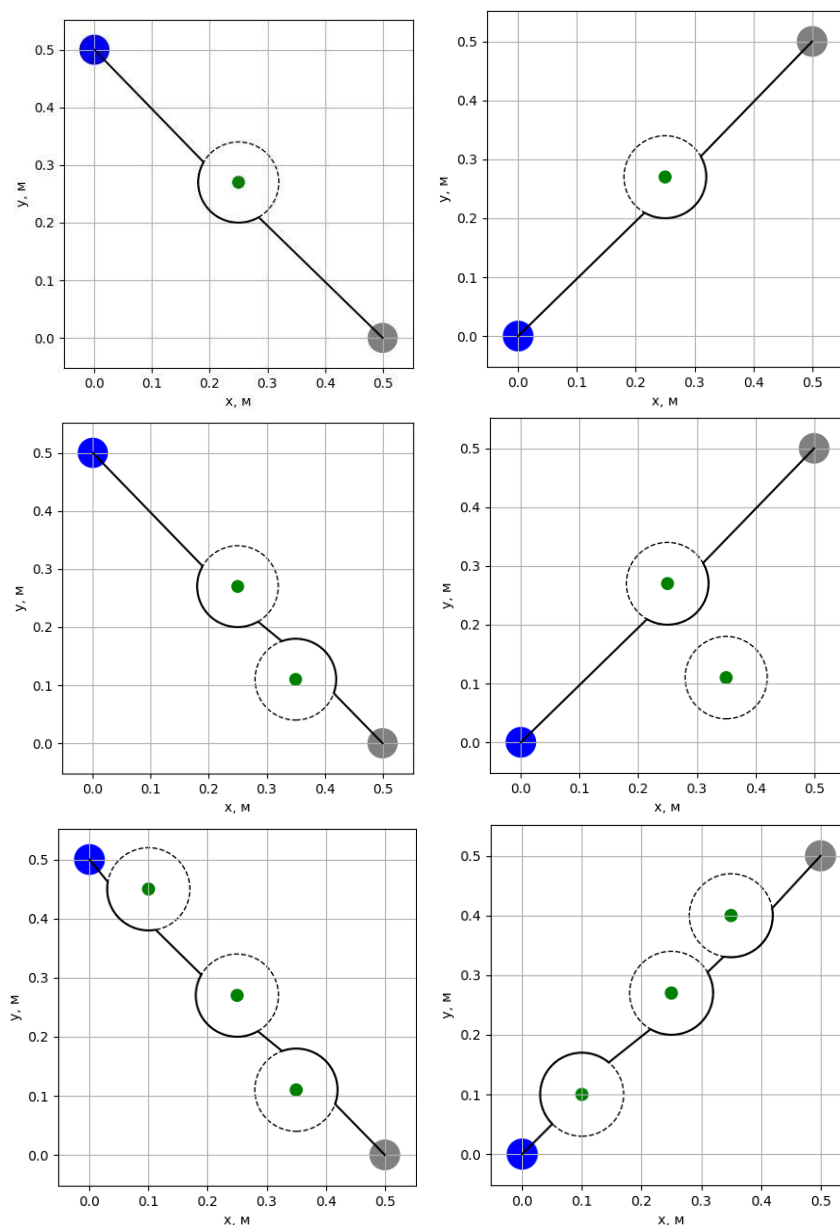


Рис. 10. Движение схвата робота в среде с препятствиями

По результатам моделирования установлено, что алгоритм корректно обрабатывает во всех четвертях системы координат и рассчитывает траекторию движения на границах окружностей безопасности на препятствиях. При заданном приращении угла в 5 градусов при расчете участка траектории вокруг препятствия полная траектория движения содержала от 30 точек (для одиночного препятствия) до 90 точек (для трех препятствий).

На рис. 11 представлены результаты моделирования при изменении шага угла обхода препятствий для среды с тремя препятствиями.

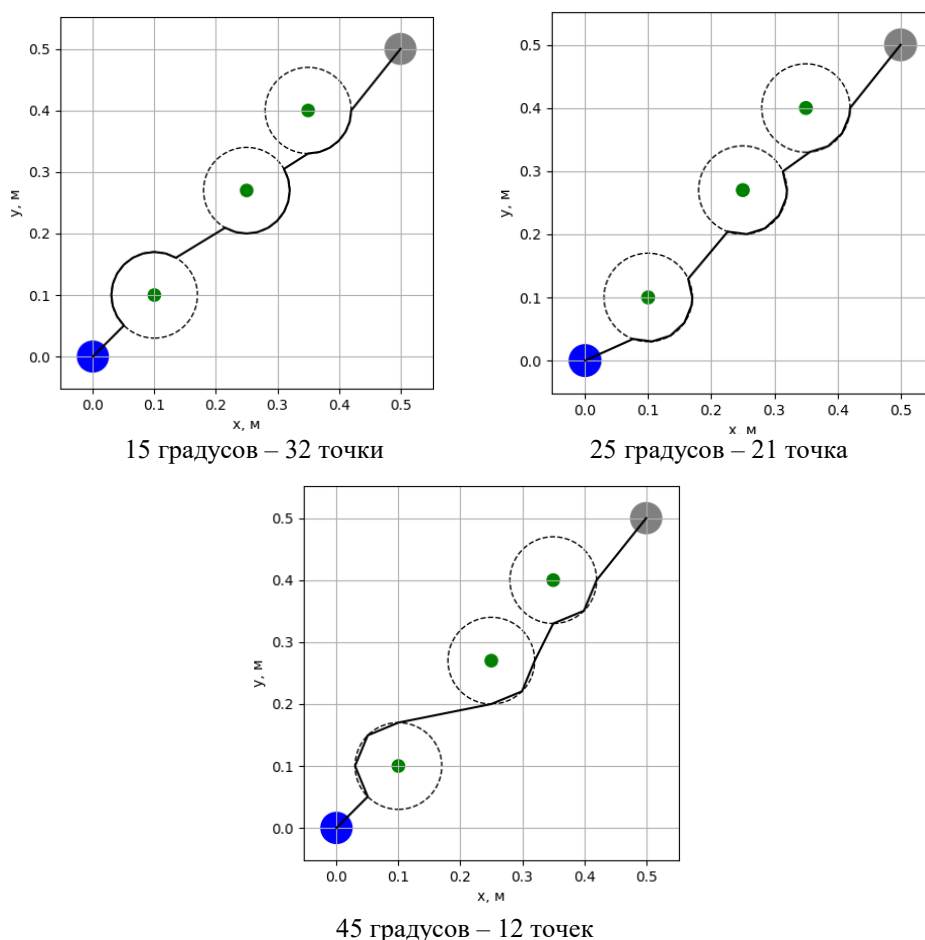


Рис. 11. Результаты моделирования при изменении шага угла

Согласно результатам моделирования при увеличении шага угла можно существенно снизить размер массива координат точек траектории и, следовательно, повысить вычислительную эффективность алгоритма. При этом количество точек траектории уменьшилось на 86% (с 90 до 12), а также снизилась точность движения по траектории при обходе препятствий, что можно компенсировать увеличением радиуса безопасности вокруг препятствий на 10%.

Также предложенные алгоритмы корректно обрабатывают случай близкого расположения препятствий, как представлено на рис. 12.

Как видно из результатов, траектория движения корректно сформирована по контурам окружностей безопасности вокруг препятствий.

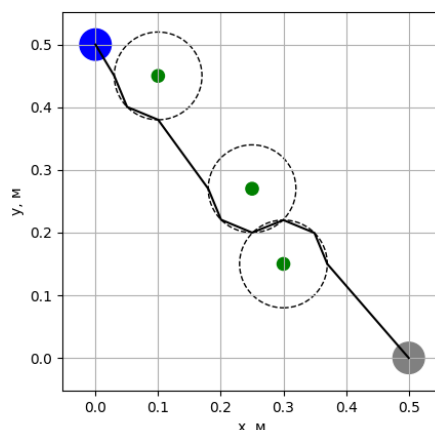


Рис. 12. Траектория движения схвата при близком расположении препятствий

Заключение. В статье представлено решение задачи планирования траектории движения дельта-робота для прополки сорняков. Представлено решение прямой и обратной задач кинематики на базе аналитического подхода, допускающее простую программную реализацию в управляющем контроллере робота. Представлена программная модель определения конструктивных параметров дельта-робота, позволяющая оценить степень влияния размеров подвижной и неподвижной платформ, длины верхних и нижних рычагов на рабочую область функционирования робота. Установлено, что наибольшее влияние на размер этой области оказывают длины рычагов робота. Определена длина рычагов робота для решения задачи прополки кукурузы и установлено, что целесообразно конструировать робота для прополки одного междурядья. Представлен аналитический метод планирования траектории движения схвата робота в среде с сорняками и культурными растениями, отличающийся разделением движений в горизонтальной и вертикальной плоскостях и на более 80% уменьшенным количеством промежуточных точек траектории, что снижает вычислительную нагрузку при расчетах в реальном времени.

Предложенные методы могут быть использованы при проектировании дельта-роботов сельскохозяйственного назначения для прополки различных культур. В дальнейшем авторы планируют рассмотреть задачу планирования комбинированного движения дельта-робота и платформы носителя [3], с целью повышения эффективности функционирования робота.

Авторы благодарны руководству ООО «Алькема-Элитное» (г. Краснодар) за консультативную и экспертную поддержку при подготовке данной работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Патент US4976582. – URL: <https://patents.google.com/patent/US4976582A/en> (дата обращения: 05.11.2024.).
2. Роботы-пропольщики. – URL: <https://robotrends.ru/robopedia/propolki-robotizaciya> (дата обращения: 05.11.2024).
3. Соловьев В.В., Номерчук А.Я., Филатов Р.К. Системный анализ наземной роботизированной платформы сельскохозяйственного назначения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – № 2 (238). – С. 69-82.
4. Соловьев В.В., Шадрин В.В., Номерчук А.Я., Филатов Р.К. Перспективы развития сельскохозяйственной робототехники в условиях импортозамещения // Матер. XIII Всероссийской Школы-семинара молодых ученых, аспирантов, студентов и школьников «Исследования и творческие проекты для развития и освоения проблемных и прибрежно-шельфовых зон юга России», 18-20 мая 2022 г.
5. Распоряжение Правительства РФ от 29 декабря 2021 года № 3971-р «Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации отраслей агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов Российской Федерации на период до 2030 года». – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/File/GetFile/0001202112310100?type=pdf> (дата обращения: 05.11.2024).

6. Bortoff S.A. Object-Oriented Modeling and Control of Delta Robots // IEEE Conference on Control Technology and Applications. – 2018. – P. 251-258.
7. Sachin K., Sudipto M. Vision-based kinematic analysis of the Delta robot for object catching // Robotica. – 2021.
8. Костин С.В., Шамраев А.А. Синтез математической модели дельта-робота для использования в задачах сортировки твердых бытовых отходов // Матер. VIII Международной научно-технической конференции «Информационные технологии в науке, образовании и производстве» (ИТНОП-2020). – 2020. – С. 209-213.
9. Закиров Р.И., Алиев М.И., Морозов А.И. Определение кинематических характеристик дельта-робота по заданным параметрам рабочей области // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2018. – № 4. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-kinematicheskikh-harakteristik-delta-robota-po-zadannym-parametram-rabochey-oblasti> (дата обращения: 05.11.2024).
10. Sai Z., Xinjun L., Bingkai Y., Xiangdong H., Jie B. Dynamics Modeling of a Delta Robot with Telescopic Rod for Torque Feedforward Control // Robotics. – 2022. – 21 p.
11. Sethia G., Kumar H., Guragol S., Sandhya S., Narasimha M. Automated Computer Vision based Weed Removal Bot // IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT). – 2020. – P. 1-6.
12. Садилов М.Д., Тимофеев Г.А. Моделирование движения дельта-робота по заданной траектории с целью определения силовых факторов, действующих на его приводы и шарниры // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2021. – № 11. – С. 22-30.
13. Robert L. The Delta Parallel Robot: Kinematics Solutions // Mechanical Engineering. – Ohio University, 2016. – 46 p.
14. Sanngoen W., Po-Ngaen W., Charitkhuan C., Doungjitjaroen K. Development of Parallel Delta Robot System Controller Based on Raspberry Pi and FPGA // Applied Mechanics and Materials. – 2016. – P. 698-704.
15. Васильев А.Н. MATLAB. Самоучитель. Практический подход. – 2-е изд. – СПб.: Наука и Техника, 2015. – 448 с.
16. Pshikhopov V., Medvedev M., Soloviev V. Multi-mode control system of an unmanned vessel with fuzzy hybridization of controllers // 2019 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies, CoDIT 2019: 6, Paris, 23–26 апреля 2019 года. – Paris, 2019. – P. 1221-1226.
17. Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б. Конструктивные аспекты метода потенциальных полей в мобильной робототехнике // Автометрия. – 2021. – Т. 57, № 4. – С. 45-53.
18. Медведев М.Ю., Лазарев В.С. Алгоритм формирования траектории группы подвижных объектов в двумерной среде с использованием неустойчивых режимов // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2016. – № 3 (64). – С. 17-29.
19. Алхаддад М., Миронов К.В., Дергачев С.А. [и др.]. Локальное планирование траектории колесного робота в ограниченной среде на основе модельного прогнозирующего управления // Робототехника и техническая кибернетика. – 2023. – Т. 11, № 3. – С. 205-214.
20. Akima Hiroshi. A New Method of Interpolation and Smooth Curve Fitting Based on Local Procedures // J. ACM. – 1970. – Vol. 17. – P. 589-602.

REFERENCES

1. Patent US4976582 [Patent US4976582]. Available at: <https://patents.google.com/patent/US4976582A/en> (accessed 05 November 2024).
2. Roboty-propol'shchiki [Weeding robots]. Available at: <https://robotrends.ru/robopedia/propolki-robotizaciya> (accessed 05 November 2024).
3. Solov'ev V.V., Nomerchuk A.Ya., Filatov R.K. Sistemnyy analiz nazemnoy robotizirovannoy platformy sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya [Systems analysis of a ground-based robotic platform for agricultural purposes], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2024, No. 2 (238), pp. 69-82.
4. Solov'ev V.V., Shadrina V.V., Nomerchuk A.Ya., Filatov R.K. Perspektivy razvitiya sel'skokhozyaystvennoy robototekhniki v usloviyakh importozameshcheniya [Prospects for the development of agricultural robotics in the context of import substitution], *Mater. XIII Vserossiyskoy Shkoly-seminara molodykh uchenykh, aspirantov, studentov i shkol'nikov «Issledovaniya i tvorcheskie proekty dlya razvitiya i osvoeniya problemnykh i pribrezhno-shelf'ovykh zon yuga Rossii», 18-20 maya 2022 g* [Proceedings of the XIII All-Russian School-Seminar of Young Scientists, Postgraduates, Students and Schoolchildren "Research and Creative Projects for the Development and Exploitation of Problem and Coastal-Shelf Zones of the South of Russia", May 18-20, 2022].

5. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 29 dekabrya 2021 goda № 3971-r «Ob utverzhdenii strategicheskogo napravleniya v oblasti tsifrovoy transformatsii otrasley agropromyshlennogo i rybokhozyaystvennogo kompleksov Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda» [Order of the Government of the Russian Federation of December 29, 2021 No. 3971-r "On approval of the strategic direction in the field of digital transformation of the sectors of the agro-industrial and fisheries complexes of the Russian Federation for the period up to 2030"]. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/File/GetFile/0001202112310100?type=pdf> (accessed 05 November 2024).
6. Bortoff S.A. Object-Oriented Modeling and Control of Delta Robots, *IEEE Conference on Control Technology and Applications*, 2018, pp. 251-258.
7. Sachin K., Sudipto M. Vision-based kinematic analysis of the Delta robot for object catching, *Robotica*, 2021.
8. Kostin S.V., Shamraev A.A. Sintez matematicheskoy modeli del'ta-robota dlya ispol'zovaniya v zadachakh sortirovki tverdykh bytovykh otkhodov [Synthesis of a mathematical model of a delta robot for use in solid municipal waste sorting tasks], *Mater. VIII Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Informatsionnye tekhnologii v nauke, obrazovanii i proizvodstve» (ITNOP-2020)* [Proceedings of the VIII International Scientific and Technical Conference "Information Technologies in Science, Education and Production" (ITNOP-2020)], 2020, pp. 209-213.
9. Zakirov R.I., Aliev M.I., Morozov A.I. Opredelenie kinematicheskikh kharakteristik del'ta-robota po zadannym parametram rabochey oblasti [Determination of the kinematic characteristics of a delta robot based on the specified parameters of the working area], *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* [Electrical and information complexes and systems], 2018, No. 4. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-kinematicheskikh-harakteristik-delta-robota-po-zadannym-parametram-rabochey-oblasti> (accessed 05 November 2024).
10. Sai Z., Xinjun L., Bingkai Y., Xiangdong H., Jie B. Dynamics Modeling of a Delta Robot with Telescopic Rod for Torque Feedforward Control, *Robotics*, 2022, 21 p.
11. Sethia G., Kumar H., Guragol S., Sandhya S., Narasimha M. Automated Computer Vision based Weed Removal Bot, *IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT)*, 2020, pp. 1-6.
12. Sadilov M.D., Timofeev G.A. Modelirovanie dvizheniya del'ta-robota po zadannoy traektorii s tsel'yu opredeleniya silovykh faktorov, deystviyushchikh na ego privody i sharniry [Modeling the motion of a delta robot along a given trajectory in order to determine the force factors acting on its drives and joints], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [News of higher educational institutions. Mechanical engineering], 2021, No. 11, pp. 22-30.
13. Robert L. The Delta Parallel Robot: Kinematics Solutions, *Mechanical Engineering*. Ohio University, 2016, 46 p.
14. Sanngoen W., Po-Ngaen W., Charitkhuan C., Doungjitjaroen K. Development of Parallel Delta Robot System Controller Based on Raspberry Pi and FPGA, *Applied Mechanics and Materials*, 2016, pp. 698-704.
15. Vasil'ev A.N. MATLAB. Samouchitel'. Prakticheskiy podkhod [MATLAB. Self-instruction manual. Practical approach]. 2nd ed. Sant Petersburg: Nauka i Tekhnika, 2015, 448 p.
16. Pshikhopov V., Medvedev M., Soloviev V. Multi-mode control system of an unmanned vessel with fuzzy hybridization of controllers, 2019 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies, CoDIT 2019: 6, Paris, 23–26 April 2019. Paris, 2019, pp. 1221-1226.
17. Filimonov A.B., Filimonov N.B. Konstruktivnye aspekty metoda potentsial'nykh poley v mobil'noy robototekhnike [Constructive aspects of the potential field method in mobile robotics], *Avtometriya* [Avtometriya], 2021, Vol. 57, No. 4, pp. 45-53.
18. Medvedev M.Yu., Lazarev V.S. Algoritmy formirovaniya traektorii gruppy podvizhnykh ob"ektov v dvumernoy srede s ispol'zovaniem neustoychivyykh rezhimov [Algorithm for forming the trajectory of a group of moving objects in a two-dimensional environment using unstable modes], *Nauchnyy vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Scientific Bulletin of the Novosibirsk State Technical University], 2016, No. 3 (64), pp. 17-29.
19. Alkhaddad M., Mironov K.V., Dergachev S.A. [i dr.]. Lokal'noe planirovanie traektorii kolesnogo robota v ogranichennoy srede na osnove model'nogo prognoziryushchego upravleniya [Local trajectory planning of a wheeled robot in a limited environment based on model predictive control], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and Technical Cybernetics], 2023, Vol. 11, No. 3, pp. 205-214.
20. Akima Hiroshi. A New Method of Interpolation and Smooth Curve Fitting Based on Local Procedures, *J. ACM*, 1970, Vol. 17, pp. 589-602.

Соловьев Виктор Владимирович – Южный федеральный университет; e-mail: vvsolovev@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79043438844; старший преподаватель кафедры систем автоматического управления; старший научный сотрудник КБ «АРК» ДГТУ.

Номерчук Александр Яковлевич – e-mail: aynomerchuk@sfedu.ru; тел.: +79185945894; старший преподаватель кафедры систем автоматического управления.

Филатов Роман Константинович – КБ «АРК» ДГТУ; e-mail: r.k.filatov@gmail.com; г. Таганрог, Россия; тел.: +79996965820; к.т.н.; руководитель.

Soloviev Viktor Vladimirovich – Southern Federal University; e-mail: vvsolovev@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79043438844; senior lecturer the Department of Automatic Control Systems; senior researcher the CB “ARK” Don State Technical University.

Nomerchuk Alexandr Yakovlevich – e-mail: aynomerchuk@sfedu.ru; phone: +79185945894; senior lecturer the Department of Automatic Control Systems.

Filatov Roman Konstantinovich – CB “ARK” Don State Technical University; e-mail: r.k.filatov@gmail.com; Taganrog, Russia; cand. of eng. sc.; supervisor.

УДК 519.872

DOI 10.18522/2311-3103-2024-6-113-121

А.А. Богнюков, Д.Ю. Зорькин, Е.Г. Шведов

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Основное внимание уделяется системам автоматизации, применяемым в автосалонах для продажи и ремонта автомобилей. Это требует учета не только существующих процессов, но и их оптимизации с использованием современных технологий, что усложняет анализ таких систем. Внедрение подобных решений может привести к созданию более эффективных моделей, соответствующих реальным условиям работы автосалонов. Понимание ключевых концепций автоматизации помогает не только структурировать исследование, но и определить направления для дальнейшего развития. Изучение существующих моделей и систем позволяет выявить лучшие практики и возможные недостатки. Сравнительный анализ помогает не только адаптировать проверенные решения к новым условиям, но и избежать ошибок, допущенных в предыдущих исследованиях. Системный анализ и моделирование систем массового обслуживания представляют собой ключевые аспекты в управлении и оптимизации бизнес-процессов, включая такие сложные области, как автоматизация процесса продаж и ремонта автомобилей. В современном мире высоких технологий, где конкуренция на рынке товаров и услуг постоянно растет, применение системного анализа позволяет предприятиям находить эффективные решения для улучшения своих операций. Системы массового обслуживания (далее СМО) являются центральным элементом в различных отраслях экономики, включая автосалоны и сервисные центры. Они направлены на оптимизацию потоков клиентов и ресурсов с целью повышения качества обслуживания и минимизации времени ожидания. Основная задача системного анализа в данном контексте заключается в изучении структуры, поведения и взаимодействия компонент системы для выявления слабых мест и поиска оптимальных стратегий их преодоления. Для автоматизации работы автосалона была выбрана предметная область, включающая ключевые элементы: персонал, клиенты, автомобили, услуги и договора. Эти элементы взаимосвязаны и образуют основу для проектируемой базы данных. Каждый из элементов имеет свою сущность, а их взаимодействие через договоры становится основой для разработки реляционной базы данных.

Автоматизация; продажа; ремонт; автосалон; CRM-система; ERP-система; оптимизация; процесс; автомобиль; услуга; договор купли-продажи; договор услуги.

A.A. Bognyukov, D.Yu. Zorkin, E.G. Shvedov

SYSTEM ANALYSIS AND MODELING OF QUEUE SYSTEMS

This article focuses on automation systems used in car dealerships for the sale and repair of vehicles. This requires consideration not only of existing processes but also their optimization using modern technologies, which complicates the analysis of such systems. The implementation of such solutions can