

УДК 004.94:62-529

DOI: [10.26102/2310-6018/2025.49.2.012](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.49.2.012)

Моделирование траектории шестиосевого манипулятора в технологии аддитивной печати древовидной фрактальной структуры

К.А. Берсенеv^{1,2}, О.М. Огородникова¹✉, А.И. Огородников¹

¹Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация

²Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Российская Федерация

Резюме. Быстрое развитие аддитивных технологий в полной мере поднимает вопросы создания и реализации оптимальных биоподобных конструкций, снимая ряд технологических ограничений на геометрию и формообразование обрабатываемых поверхностей. В статье представлены результаты разработки алгоритмического обеспечения системы управления шарнирным роботом в составе технологического оборудования для объемной печати деталей способом наплавки. Для несплошного наполнения внутреннего объема деталей выбрана биоподобная древовидная структура, которая формально описана с помощью фрактала в задаче планирования траектории. Геометрия объекта печати представлена в цилиндрической системе координат, что позволяет составить послонную траекторию из концентрических окружностей с упрощенной процедурой пересчета координат. Результаты выполненной работы являются частью программно-аппаратного комплекса в составе роботизированной ячейки для изготовления деталей из термопластической проволоки PLA и ABS. Планирование траектории выполняется в симуляторе, программный код которого написан на языке C и обращается к функциям свободно распространяемой библиотеки Raylib для выполнения математических операций с векторами, матрицами и кватернионами. Движение робота по запланированной траектории осуществляется под управлением микроконтроллера STM32H743VIT6 с операционной системой реального времени Free RTOS.

Ключевые слова: аддитивные технологии, биоподобные структуры, древовидный фрактал, шестиосевой шарнирный робот, симуляция кинематики, планирование траектории.

Для цитирования: Берсенеv К.А., Огородникова О.М., Огородников А.И. Моделирование траектории шестиосевого манипулятора в технологии аддитивной печати древовидной фрактальной структуры. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2025;13(2). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1865> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.49.2.012

Simulation of trajectory for additive printing of tree-like fractal structure with a six-axis robot

K.A. Bersenev^{1,2}, O.M. Ogorodnikova¹✉, A.I. Ogorodnikov¹

¹Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, the Russian Federation

²M.N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, the Russian Federation

Abstract. Currently, the widespread use of additive technologies fully raises the issues of creating and implementing optimal bio-inspired designs, because a number of technological restrictions on the geometry and shaping of surfaces are removed. This article presents the results of developing control system algorithms that take into account the operation of an articulated robot as part of technological equipment for multi-axis printing of parts by the fusion deposition method. For non-solid filling of the

internal volume of parts, a bio-inspired tree-like structure was chosen, which was formally described using a fractal in the trajectory planning problem. The geometry of the printed object is presented in a cylindrical coordinate system, based on which it is possible to create a layer-by-layer trajectory with a set of concentric circles using a simplified procedure for recalculating coordinates. The results of the work performed are part of a hardware and software complex in a robotic cell for manufacturing parts from PLA and ABS thermoplastics. The trajectory planning is carried out in a simulator, the program code of which is written in the C language and refers to the functions of the Raylib library to perform mathematical operations with vectors, matrices and quaternions. The robot's movement along the planned trajectory is controlled by the STM32H743VIT6 microcontroller with the Free RTOS real-time operating system.

Keywords: additive manufacturing, bio-inspired structures, tree-like fractal, six-axis articulated robot, kinematics simulation, trajectory planning.

For citation: Bersenev K.A., Ogorodnikova O.M., Ogorodnikov A.I. Simulation of trajectory for additive printing of tree-like fractal structure with a six-axis robot. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2025;13(2). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1865> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.49.2.012

Введение

Современные методы аддитивного производства стремительно развиваются, расширяя границы возможностей в проектировании и технологической реализации сложных геометрических объектов и структур [1]. Традиционные послойные методы 3D-печати, основанные на планарном перемещении экструдера в горизонтальных плоскостях, хорошо зарекомендовали себя при изготовлении деталей с простой топологией, но накладывают гравитационные ограничения на формообразование комплексных и свободно нависающих поверхностей [2]. Одним из возможных способов преодолеть обозначенную проблему является усложнение пространственных движений в процессе печати за счет шарнирного робота, что позволит реализовать системой управления непланарные траектории [3].

Большой интерес при разработке непланарных траекторий для несущих конструкций представляют такие математические объекты, как древовидные фракталы, которые находят применение в инженерии [4], биомедицине [5], архитектуре [6] и функциональном дизайне [7]. Соответствующие биоподобные фрактальные структуры имитируют в технических системах ветвящиеся деревья с их способностью оптимизировать распределение внешней силовой нагрузки [8], обеспечивать большую динамическую площадь опоры и равномерно распределять внутренние усилия [9]. При переносе принципов построения древовидных структур в аддитивное производство [10] можно получать самостабилизирующиеся механические системы, в которых нагрузка от верхнего уровня равномерно распределяется через сеть ветвей к основанию, обеспечивая равнопрочность и устойчивость без избыточного количества материала [11].

Аддитивные технологии позволяют создавать древовидные структуры с высокой степенью точности, однако их реализация с помощью традиционных методов послойного наплавления затруднена из-за геометрических ограничений процесса [12]. Одним из решений является роботизированное выращивание [13], что позволяет изменять ориентацию экструдера в процессе печати, адаптируя его траекторию к сложной геометрии объекта без жесткой привязки к горизонтальным слоям [14]. При планировании адаптируемой пространственной траектории [15] возникает необходимость производить сложные матричные вычисления для преобразования координат в системе управления робота [16] с учетом кинематических возможностей манипулятора и относительного положения экструдера.

Целью данной работы является создание математического и алгоритмического обеспечения для планирования пространственной траектории движения шестиосевого

манипулятора, реализующего технологию аддитивной печати древовидной фрактальной структуры.

Методология

Нами изготовлена авторская роботизированная ячейка [17] для печати деталей из пластика, в которой стол принтера подвижен и закреплен на механическом интерфейсе шестиосевого манипулятора, при этом печатная головка неподвижно зафиксирована на несущей раме. Система управления движениями робота в процессе печати построена на микроконтроллере STM32H743VIT6 [18] с операционной системой реального времени FreeRTOS [19]. Для планирования траектории создан симулятор, программный код которого написан на языке C с использованием свободно распространяемой библиотеки Raylib. Симулятор позволяет визуализировать траекторию движения манипулятора.

Кинематическая модель шестиосевого манипулятора

Шестиосевой манипулятор, используемый в данной работе, представляет собой последовательную кинематическую цепь, каждый элемент которой определяет положение и ориентацию выходного звена. Движение звеньев манипулятора можно описать с помощью параметров Денавита-Хартенберга, которые представлены в Таблице 1. Четыре параметра однозначно задают пространственное положение звеньев и шарниров: a_i – длина звена вдоль оси x ; α_i – поворот звена вокруг оси x ; d_i – смещение вдоль оси z ; θ_i – угол поворота вокруг оси z . На Рисунке 1 показана схема шестиосевого манипулятора в исходном калибрующем положении.

Таблица 1 – Параметры Денавита-Хартенберга для звеньев шестиосевого манипулятора
Table 1 – Denavit-Hartenberg parameters for links of a six-axis manipulator

Звено, i	a_i (мм)	α_i (рад)	d_i (мм)	θ_i (рад)
1	a_1	$\pi/2$	d_1	θ_1^*
2	a_2	0	0	θ_2^*
3	0	$\pi/2$	0	$\theta_3^* + \pi/2$
4	0	$-\pi/2$	d_4	θ_4^*
5	0	$\pi/2$	0	θ_5^*
6	0	0	d_6	θ_6^*

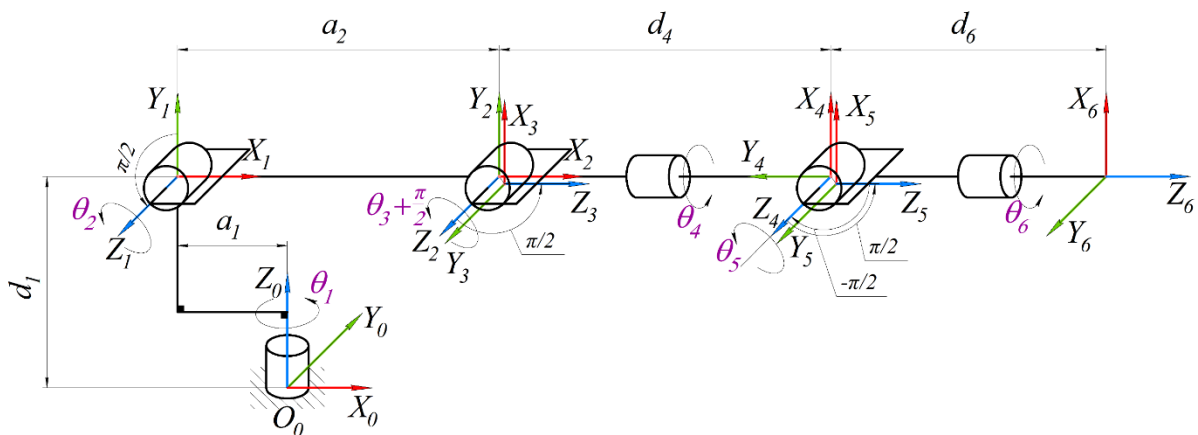


Рисунок 1 – Кинематическая схема и параметры Денавита-Хартенберга шестиосевого шарнирного манипулятора

Figure 1 – Kinematic diagram and parameters of Denavit-Hartenberg for six-axis articulated manipulator

При планировании траектории рассматривается относительное расположение двух систем координат, связанных с основанием $X_0Y_0Z_0$ (базовая система) и выходным звеном $X_6Y_6Z_6$. Для каждого звена i выполняется переход от системы $X_iY_iZ_i$ к системе следующего звена $X_{i+1}Y_{i+1}Z_{i+1}$, который можно описать однородной матрицей преобразования:

$$T_i^{i+1} = \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i}c_{\alpha_i} & s_{\theta_i}s_{\alpha_i} & a_ic_{\theta_i} \\ s_{\theta_i} & c_{\theta_i}c_{\alpha_i} & -c_{\theta_i}s_{\alpha_i} & a_is_{\theta_i} \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где для упрощения представления тригонометрических функций в записи матрицы использованы символы s и c вместо $\sin$ и $\cos$, соответственно.

Для определения положения рабочего органа, прикрепленного к фланцу выходного звена, необходимо выполнить произведение матриц преобразования для всех звеньев от основания к выходному звену:

$$T_6^0 = \prod_{i=0}^5 T_i^{i+1}. \quad (2)$$

С учетом технической возможности реализовать движения в механизмах при планировании траектории необходимо ввести ограничения на углы поворота $\theta_{min,i} \leq \theta_i \leq \theta_{max,i}$, угловые скорости $\dot{\theta}_i \leq \dot{\theta}_{max,i}$ и ускорения $\ddot{\theta}_i \leq \ddot{\theta}_{max,i}$. Из наложенных ограничений следуют требования к дискретизации и плавности движения по траектории, которые также необходимо учитывать в алгоритме формирования движения.

Математическая модель траектории типа фрактального дерева

В данной работе рассматривается биоподобный метод построения пространственной траектории типа фрактального дерева для шестиосевого манипулятора, перемещающего платформу в технологическом процессе аддитивной печати. В отличие от планарных траекторий при традиционной послойной печати предлагаемый метод разрешает движение по концентрическим окружностям в соответствии с изменением угловой координаты и снижает необходимость в поддерживающих структурах, формируя разветвленные объекты с высокой степенью детализации.

Предложенный метод инспирирован биологическим процессом роста растений от меристем – специальных клеток, способных делиться и обеспечивать направленный прирост живой массы. Апикальная меристема на кончике стебля или ветви задает удлинение растения по оси стебля (осевая координата), при этом латеральные меристемы на боковой поверхности задают утолщение стебля (радиальная координата).

Фрактальное дерево алгоритмически задается рекурсивной процедурой ветвления, когда родительская ветвь при перемещении в положительном направлении осевой координаты делится на несколько дочерних ветвей меньшего диаметра (Рисунок 2).

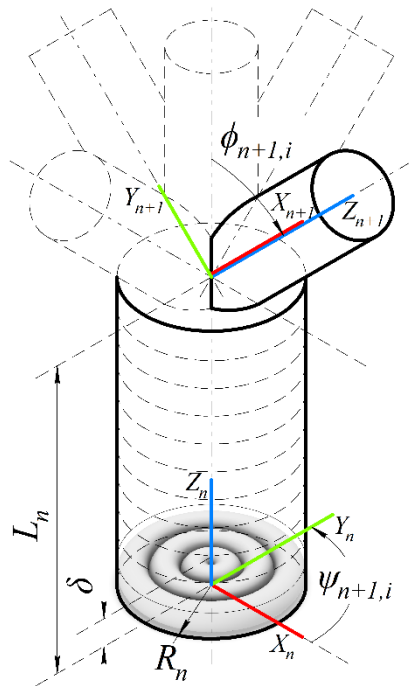


Рисунок 1 – Схема ветвления фрактального дерева и наплавления материала при аддитивной печати

Figure 2 – Scheme of fractal tree branching and material deposition during additive printing

Каждую ветвь фрактала можно описать в цилиндрической системе координат, связанной с ее родительской ветвью. Алгоритм планирования траектории устанавливает последовательность действий, которые задают положение и ориентацию каждой ветви в соответствии с рекурсивной моделью перехода на следующий уровень фрактала, а также преобразуют локальные координаты ветвей в неподвижную глобальную систему.

Рекурсивный алгоритм ветвления для планирования фрактальной траектории получает следующие входные данные:

- 1) Общее число уровней ветвления N ;
- 2) Число порождаемых каждой родительской ветвью дочерних ветвей B_n на уровне $n \in [1; N]$;
- 3) Длина каждой ветви L_n на уровне n . При этом $L_n = L_1 \gamma_L^{n-1}$, где $\gamma_L < 1$ – коэффициент масштабирования;
- 4) Радиус ветви R_n на уровне n . При этом $R_n = R_1 \gamma_R^{n-1}$, где $\gamma_R < 1$ – коэффициент масштабирования;
- 5) Угол отклонения $\phi_{n+1,i}$ дочерней ветви i на уровне $n+1$ относительно родительской с начальным условием для первой ветви $\phi_{n+1,i=1} = 0$;
- 6) Угол поворота $\psi_{n+1,i}$ дочерней ветви i вокруг родительской, для первой ветви $\psi_{n+1,i=1} = 0$, при этом в силу симметричности фрактала для остальных ветвей $\psi_{n+1,i+1} = 2\pi(i-1)/B_{n+1}$.

Объемную геометрию объекта печати и траекторию движения робота можно представить цилиндрическими координатами (ρ, φ, z) , где ρ – радиальная координата точки, φ – угловая координата, z – осевая координата. Поскольку двигатели шарнирного манипулятора управляются в декартовой системе, необходимо выполнить преобразование координат для дальнейшего вычисления углов поворота решением обратной задачи кинематики:

$$\begin{cases} x_k = \rho_k \cos(\varphi_k), \\ y_k = \rho_k \sin(\varphi_k), \varphi = [0, 2\pi]. \\ z_k = z_k \end{cases} \quad (3)$$

В алгоритме рекурсивного формирования фрактального дерева отдельную ветвь можно описать отрезком в локальной системе координат, в которой ось z совпадает с направлением ветви. Для некоторой ветви на уровне n с индексом j введём однородную матрицу преобразования:

$$T_n^j = \begin{bmatrix} R_n^j & P_n^j \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $R_n^j \in SO(3)$ – матрица поворота, имеющая единичный определитель и задающая ориентацию ветви в ортогональной глобальной системе трехмерного пространства, $P_n^j \in \mathbb{R}^3$ – координаты начала ветви.

Соответственно, каждая ветвь длиной L_n начинается в точке $P_{start} = T_n^j \cdot [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ и заканчивается в точке $P_{end} = T_n^j \cdot [0 \ 0 \ L_n \ 0]^T$.

Родительская ветвь порождает дочерние ветви следующим образом. Пусть имеется ветвь на уровне n с матрицей преобразования T_n^j . Для каждой дочерней ветви с индексом i на уровне $n + 1$ введем преобразование:

$$T_{n+1}^{i,j} = T_n^j \cdot T_{trans}(L_n) \cdot T_{rot}(\phi_{n+1,i}, \psi_{n+1,i}), \quad (5)$$

где $T_{trans}(L_n) = E_{4 \times 4} [0 \ 0 \ L_n \ 0]^T$ – перенос вдоль оси родительской ветви, $T_{rot}(\phi, \psi) = R_z(\psi)R_x(\phi)$ – поворот для задания ориентации дочерней ветви:

$$\begin{aligned} R_z(\psi_n) &= \begin{bmatrix} \cos(\psi_n) & -\sin(\psi_n) & 0 \\ \sin(\psi_n) & \cos(\psi_n) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ R_x(\phi_n) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi_n) & -\sin(\phi_n) \\ 0 & \sin(\phi_n) & \cos(\phi_n) \end{bmatrix}, \\ T_{rot}(\phi, \psi) &= \begin{bmatrix} c_\psi & -c_\phi s_\psi & s_\phi s_\psi & 0 \\ s_\psi & c_\phi c_\psi & -c_\psi s_\phi & 0 \\ 0 & s_\phi & c_\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом, рекурсивное построение фрактального дерева осуществляется посредством последовательного применения однородных преобразований, задающих положение и ориентацию каждой ветви.

Дискретизация сечения ветви фрактального дерева определяет технологический шаг наплавления материала. Обозначим через δ толщину одного слоя печати, также равную диаметру сечения элементарного тора, получаемого при экструзии термопласта. Для каждой ветви уровня n длиной L_n введем положение сечений s вдоль оси ветви с шагом δ так, что первое сечение расположено на расстоянии $s_1 = \delta/2$ от начала ветви, тогда:

$$s_i = \frac{\delta}{2} + (i - 1)\delta, \quad i = 1, 2, \dots, n_{slice}, \quad (7)$$

где $n_{slice} = L_n/\delta$ – число сечений (слоёв). Каждое сечение расположено в плоскости, нормальной к оси ветви, т. е. в локальной системе координат ветви с осью z вдоль направления ветви.

Каждое сечение рассматриваемой ветви имеет форму круга с центром в оси ветви и радиусом R_n . При печати на слое ветви материал экструдирован и наплавляется по траекториям, соответствующим концентрическим окружностям, каждая из которых является осью симметрии тора с поперечным сечением диаметра δ . Тогда количество концентрических окружностей N_{tor} будет определяться как $N_{tor} = R_n/\delta$.

Для каждой концентрической окружности с индексом k в составе траектории на слое ветви ее радиус будет равен:

$$\rho_k = (2k - 1) \frac{\delta}{2}, \quad k = 1, 2, \dots, N_{tor}. \quad (8)$$

Допустим, что задается расстояние Δl между соседними точками по дуге концентрической окружности. Оптимальный выбор Δl позволяет обеспечить баланс между точностью печати и вычислительной сложностью фрактального алгоритма. Зададим количество точек n_k на окружности с радиусом ρ_k и угловой шаг $\Delta\varphi_k$ между точками:

$$\begin{aligned} n_k &= 2\pi\rho_k/\Delta l, \\ \Delta\varphi_k &= 2\pi/n_k. \end{aligned} \quad (9)$$

Тогда координаты точек в плоскости сечения на окружности k вычисляются:

$$\begin{cases} x_k(m) = \rho_k \cos(m\Delta\varphi_k), & m = 1, 2, \dots, n_k, \\ y_k(m) = \rho_k \sin(m\Delta\varphi_k), & m = 1, 2, \dots, n_k. \end{cases} \quad (40)$$

Далее можем выполнить преобразование координат точек траектории из локальной системы координат в глобальную. Для каждой ветви на уровне n с однородной матрицей преобразования T_n^j , определяющей положение и ориентацию ветви, сечение, отдаленное на расстояние s_i вдоль оси ветви, описывается матрицей:

$$T_{slice} = T_n^j \cdot T_{trans}(s_i), \quad (51)$$

где $T_{trans}(s_i) = E_{4 \times 4} [0 \ 0 \ s_i \ 0]^T$.

Алгоритм формирования траектории типа фрактального дерева

Формирование траектории движения шестиосевого манипулятора для аддитивной печати фрактального дерева представляет собой многоэтапный процесс, включающий генерацию точек печати, решение обратной задачи кинематики и оптимизацию движения с учетом динамических ограничений.

1 этап – введение структурных и технологических параметров. Определяются геометрические характеристики фрактального дерева, включая число уровней, длины ветвей и углы отклонения дочерних сегментов. Задаются параметры печати, такие как шаг по высоте и минимальное расстояние между соседними точками, а также вводятся ограничения манипулятора, включая предельные углы поворота звеньев и максимальную скорость движения.

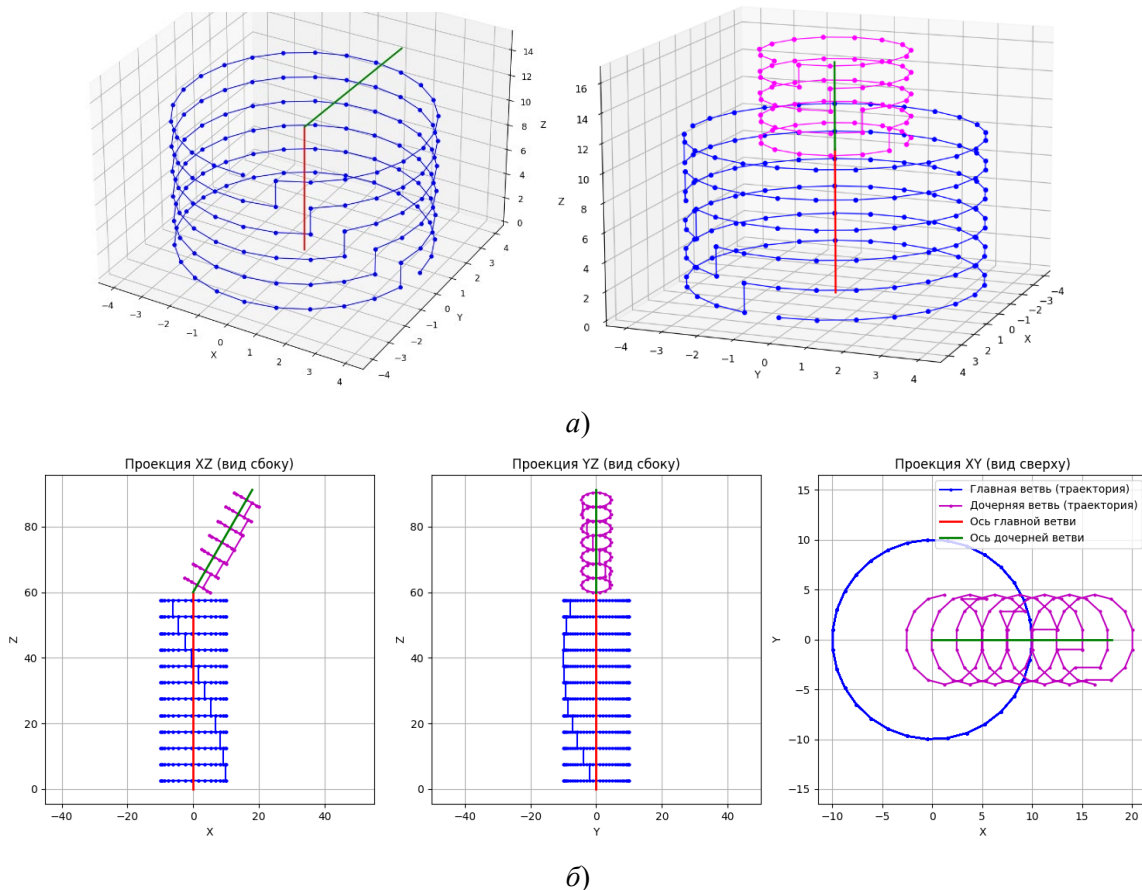
2 этап – планирование траектории. Осуществляется генерация точек траектории в цилиндрической системе координат, что позволяет экономно описывать радиально расходящиеся ветви фрактального дерева. Для каждого уровня вычисляются координаты точек на концентрических окружностях, после чего производится разбиение окружностей на дискретные точки с равномерным угловым шагом. Полученные координаты затем трансформируются в декартову систему, необходимую для управления движением манипулятора.

3 этап – решение обратной задачи кинематики. Для каждой точки траектории вычисляются углы поворота всех шести звеньев манипулятора. Это достигается методом последовательных однородных преобразований, в результате которых рассчитываются необходимые угловые положения каждого шарнира. При этом проверяется соблюдение ограничений на максимальные углы поворота звеньев и их физическую реализуемость. В случае обнаружения недопустимых значений выполняется корректировка координат или параметров движения.

4 этап – оптимизация движения с учётом динамических ограничений системы. Оптимизация включает расчет временных интервалов между точками траектории для обеспечения плавности движения, минимизации рывков и предотвращения механических колебаний. Корректируется скорость перемещения между точками, которая не должна превышать заданные ограничения по ускорению манипулятора.

5 этап – передача рассчитанных параметров в систему управления манипулятором. Данные о траектории и маршруте, включая последовательность координатных точек, углы поворота звеньев и временные интервалы движения, передаются в контроллер. По мере выполнения процесса печати производится проверка завершения каждого слоя. При достижении конца слоя манипулятор выполняет смещение платформы по оси z на заданный шаг, после чего алгоритм повторяется для следующего уровня структуры. После завершения последнего уровня фрактальной дерева процесс печати завершается.

Алгоритм планирования траектории исследован и верифицирован в вычислительных экспериментах с использованием симулятора, написанного на языке C на базе свободно распространяемой библиотеки Raylib. На Рисунке 3 представлена визуализация траектории движения манипулятора в процессе печати фрактальной древовидной структуры.



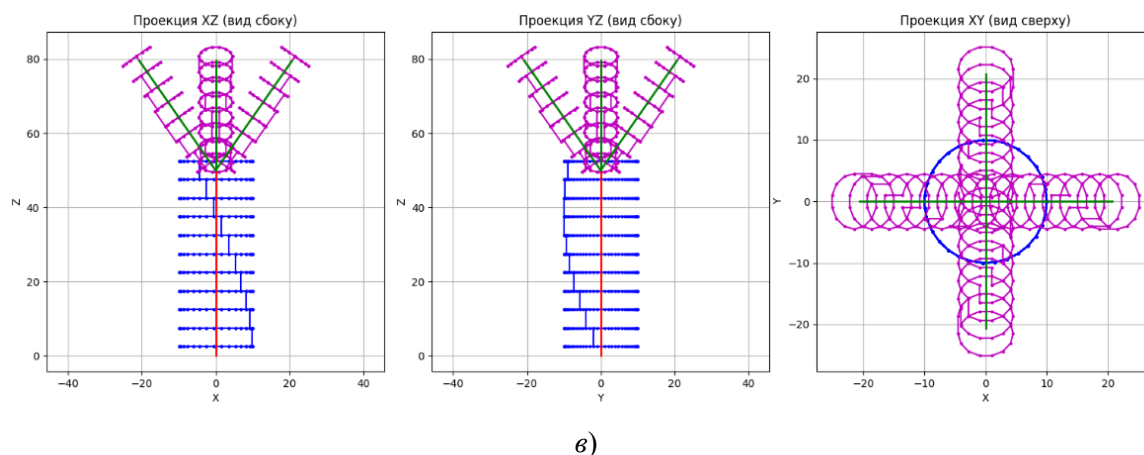


Рисунок 3 – Траектория движения робота при формировании древовидной фрактальной структуры: *a* – родительская ветвь; *b* – дочерняя ветвь; *в* – два фрактальных уровня
Figure 3 – Trajectory of the robot's movement during the formation of a tree-like fractal structure: *a* – parent branch; *b* – child branch; *c* – two fractal levels

Заключение

С использованием бионических подходов в данной работе разработана методика формирования траектории движения шестиосевого манипулятора в технологическом процессе аддитивной печати сложных геометрических структур на примере фрактального дерева. Геометрическое представление в цилиндрической системе координат упрощает процесс расчета траекторных точек печати и обеспечивает параметрическое описание структуры растущего дерева. При этом фрактал математически описывает первичный рост биологических ветвей из апикальной меристемы вдоль осевых линий. В вычислительных экспериментах с применением симулятора, написанного на языке C, установлено, что оптимальный шаг дискретизации точек траектории должен подбираться с учетом разрешающей способности манипулятора и экструдера. Избыточное количество точек увеличивает нагрузку на вычислитель, недостаточное количество точек приводит к снижению качества наплавления материала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Берсенов К.А., Огородникова О.М. Гибкая производственная ячейка для роботизированного аддитивного производства. *Мехатроника, автоматика и робототехника*. 2024;(13):124–127. <https://doi.org/10.26160/2541-8637-2024-13-124-127>
Bersenev K.A., Ogorodnikova O.M. A Flexible Manufacturing Cell for Robotic Additive Manufacturing. *Mekhatronika, avtomatika i robototekhnika*. 2024;(13):124–127. (In Russ.). <https://doi.org/10.26160/2541-8637-2024-13-124-127>
2. Li Yo., Fu W., Meng L., et al. Calibration of Multi-Robot Coordinates for Collaborative Wire Arc Additive Manufacturing Using Cross-Source 3D Point Cloud Models. *Measurement*. 2025;242. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.116294>
3. Берсенов К.А., Огородникова О.М. Планирование траекторий перемещения руки манипулятора для задач многоосевой печати. *Автоматизированное проектирование в машиностроении*. 2024;(17):123–126. <https://doi.org/10.26160/2309-8864-2024-17-123-126>

- Bersenev K.A., Ogorodnikova O.M. Trajectory Planning of Manipulator Arm Motion for Multi-Axis Printing Applications. *Avtomatizirovannoe proektirovanie v mashinostroenii*. 2024;(17):123–126. (In Russ.). <https://doi.org/10.26160/2309-8864-2024-17-123-126>
4. Wu J., Zhang Yo., Zhang F., Hou Yu., Yan X. A Bionic Tree-Like Fractal Structure as Energy Absorber Under Axial Loading. *Engineering Structures*. 2021;245. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112914>
5. Huang D., Li Z., Li G., et al. Biomimetic Structural Design in 3D-Printed Scaffolds for Bone Tissue Engineering. *Materials Today Bio*. 2025;32. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2025.101664>
6. Ha N.S., Pham Th.M., Chen W., Hao H., Lu G. Crashworthiness Analysis of Bio-Inspired Fractal Tree-Like Multi-Cell Circular Tubes Under Axial Crushing. *Thin-Walled Structures*. 2021;169. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108315>
7. Bogahawaththa M., Mohotti D., Hazell P.J., Wang H., Wijesooriya K., Lee Ch.K. Energy Absorption and Mechanical Performance of 3D Printed Menger Fractal Structures. *Engineering Structures*. 2024;305. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117774>
8. Angelou N., Gardiner B., Dellwik E. Mean and Maximum Two Dimensional Wind Force on an Open-Grown Tree. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*. 2025;257. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2024.105966>
9. Liu Yu., Li A., Du B., He X. Design and Properties Research of Radial Gradient Controllable Biomimetic Bone Scaffold Based on Tree-Like Fractal Structure. *Chemical Engineering Journal*. 2024;499. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.156168>
10. Yong Zh., Han L., Qingrong R., Yang L. Generation of a Tree-Like Support Structure for Fused Deposition Modelling Based on the L-System and an Octree. *Graphical Models*. 2019;101:8–16. <https://doi.org/10.1016/j.gmod.2018.12.003>
11. Weber S., Montero J., Bleckmann M., Paetzold K. Parametric Design Optimisation of Tree-Like Support Structure for the Laser-Based Powder Bed Fusion of Metals. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022;84:660–668. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.09.063>
12. Guerra A., Fortunato G.M., Batoni E., Vozzi G., De Maria C. Multi-Material and Multi-Scale Platform for Robotic Based *in Situ* Bioprinting. *Results in Engineering*. 2025;25. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104219>
13. Nayyeri P., Platnick Z., Zareinia K., Bougherara H. Enhanced Tensile Properties of Continuous Fiber-Reinforced Composites Using Robotic Coaxial Photopolymer Extrusion. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2025;190. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108701>
14. Rescsanski S., Hebert R., Haghighi A., Tang J., Imani F. Towards Intelligent Cooperative Robotics in Additive Manufacturing: Past, Present, and Future. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2025;93. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2024.102925>
15. Огородников И.И., Огородникова О.М. Перепрограммирование промышленных роботов в составе гибкой производственной системы. *Информационные технологии в проектировании и производстве*. 2022;(2):36–40. https://doi.org/10.52190/2073-2597_2022_2_36
Ogorodnikov I.I., Ogorodnikova O.M. Reprogramming of Industrial Robots as Part of a Flexible Production System. *Information Technologies of CAD/CAM/CAE*. 2022;(2):36–40. (In Russ.). https://doi.org/10.52190/2073-2597_2022_2_36
16. Borowski K., Wojtulewicz A. Implementation of Robotic Kinematics Algorithm for Industrial Robot Model Using Microcontrollers. *IFAC-PapersOnLine*. 2022;55(4):248–253. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.06.041>

17. Огородников А.И., Берсенева К.А., Огородникова О.М. Применение шарнирного робота в аддитивной технологии послойного наплавления полимерных материалов. *Автоматизация в промышленности*. 2025;(1):39–41.
18. Zhang L., Mei L. Design of Intelligent Wireless Charging System for Electric Vehicle. *Academic Journal of Science and Technology*. 2022;1(2):76–78. <https://doi.org/10.54097/ajst.v1i2.352>
19. Shao L., Wang Ch., Chu Ch., et al. Design and Implementation of Real-Time Robot Operating System Based on FreeRTOS. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1449(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1449/1/012115>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Берсенева Кирилл Александрович, аспирант кафедры электронного машиностроения, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская федерация.
e-mail: k.a.bersenev@urfu.ru

Kirill A. Bersenev, Postgraduate at the Department of Electronic Engineering, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, the Russian Federation.

Огородникова Ольга Михайловна, доктор технических наук, профессор кафедры электронного машиностроения, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская федерация.
e-mail: olga.ogorodnikova@urfu.ru
ORCID: [0000-0002-8752-5322](https://orcid.org/0000-0002-8752-5322)

Olga M. Ogorodnikova, Doctor of Engineering Sciences, Professor at the Department of Electronic Engineering, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, the Russian Federation.

Огородников Алексей Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры электронного машиностроения, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская федерация.
e-mail: a.i.ogorodnikov@urfu.ru

Aleksei I. Ogorodnikov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor at the Department of Electronic Engineering, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 25.03.2025; одобрена после рецензирования 15.04.2025; принята к публикации 23.04.2025.

The article was submitted 25.03.2025; approved after reviewing 15.04.2025; accepted for publication 23.04.2025