

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-95-105

УДК 004.942

Алгоритм планирования многомерных траекторий для слайсера 5D-принтера

Максим Яковлевич Афанасьев¹✉, Михаил Романович Соловьев²,
Анастасия Андреевна Крылова³, Сергей Александрович Шорохов⁴,
Юрий Валерьевич Федосов⁵

^{1,3,4,5} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

² ГК «Геоскан», Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация

³ ЗАО «Биоград», Санкт-Петербург, 197110, Российская Федерация

⁵ ОАО «Российский институт мощного радиостроения», Санкт-Петербург, 199048, Российская Федерация

¹ higonokami@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-4061-1407>

² onisoris@niuitmo.ru, <https://orcid.org/0009-0006-0787-5573>

³ ananasn94@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5822-6702>

⁴ stratumxspb@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5412-7723>

⁵ yf01@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1869-0081>

Аннотация

Введение. Представлен алгоритм планирования многомерных траекторий для 5D-принтера. Метод направлен на решение проблем, возникающих при традиционной трехмерной (3D) печати. Стандартные методы 3D-печати с использованием послойного наплавления материала приводят к анизотропии механических свойств, в результате чего прочность изготавливаемого объекта зависит от направления нанесения слоев. Это ограничивает возможности для создания равнопрочных изделий сложной геометрии. Предлагаемый алгоритм позволит достичь равномерного распределения прочностных характеристик объекта за счет оптимизации траекторий печати. **Метод.** Алгоритм основан на построении траекторий с использованием сферических спиральных слоев. Предлагаемое решение учитывает изменяющиеся параметры печати, такие как высота слоя и толщина линии. Алгоритм адаптируется под различные геометрические формы объекта. Основной особенностью методики является обеспечение изотропии свойств изделия за счет равномерного распределения материала по траекториям. Также алгоритм включает построение нормалей в каждой точке кривой для точного задания направления движения печатающей головки. Используемый подход позволяет избежать стандартных ограничений, характерных для 3D-печати. **Основные результаты.** Алгоритм протестирован на моделях, имеющих простые и сложные геометрические формы с высоким уровнем кривизны. В ходе компьютерного моделирования проведены эксперименты с различными значениями высоты слоя и толщины линии. Результаты экспериментов позволили оценить влияние этих параметров. Алгоритм продемонстрировал высокую сходимость при разных значениях входных параметров, обеспечивая точное выполнение траекторий независимо от начальных условий. Была выполнена визуализация траекторий и нормалей, что подтвердило правильность направления печати и равномерное нанесение материала. Для удобства дальнейшей работы разработан промежуточный формат представления траекторий, который легко преобразуется в G-коды. Это позволяет подготовить данные для натурных экспериментов, которые будут проведены для оценки эффективности алгоритма в реальных условиях печати. **Обсуждение.** Алгоритм планирования многомерных траекторий открывает новые возможности для аддитивного производства и позволяет создавать сложные объекты с улучшенными механическими свойствами без необходимости в проектировании дополнительных конструктивных элементов для повышения прочности. Предложенный метод может найти применение в авиастроении, автомобилестроении и медицине, где важны как сложные геометрические формы, так и высокая прочность изделий.

Ключевые слова

5D-печать, многомерные траектории, алгоритм нарезки, аддитивное производство, планирование траектории, оптимизация программ ЧПУ

Ссылка для цитирования: Афанасьев М.Я., Соловьев М.Р., Крылова А.А., Шорохов С.А., Федосов Ю.В. Алгоритм планирования многомерных траекторий для слайсера 5D-принтера // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 1. С. 95–105. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-95-105

© Афанасьев М.Я., Соловьев М.Р., Крылова А.А., Шорохов С.А., Федосов Ю.В., 2025

Multidimensional trajectory planning algorithm for a 5D printer slicer

Maksim Ya. Afanasiev^{1✉}, Michael R. Solovev², Anastasiia A. Krylova³,
Sergey A. Shorokhov⁴, Yuri V. Fedosov⁵

^{1,3,4,5} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

² Geoscan Corporate Group, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation

³ JSC "Biograd", Saint Petersburg, 197110, Russian Federation

⁵ JSC "Russian Institute for Power Radiobuilding", Saint Petersburg, 199048, Russian Federation

¹ higonokami@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-4061-1407>

² onisoris@niuitmo.ru, <https://orcid.org/0009-0006-0787-5573>

³ ananasn94@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5822-6702>

⁴ stratumxspb@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5412-7723>

⁵ yf01@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1869-0081>

Abstract

The article presents a trajectory planning algorithm for a 5D printer to solve problems that arise in traditional 3D printing. Standard 3D printing methods using layer-by-layer material deposition lead to anisotropy of mechanical properties, where the object strength depends on the direction of the layer application. This limits the ability to create isotropic-strength parts, especially those with complex geometry. The goal of the study is to develop an algorithm that enables uniform distribution of the mechanical properties of the object by optimizing the printing trajectories. The proposed algorithm is based on constructing trajectories using spherical spiral layers. The algorithm considers changing printing parameters, such as layer height and line thickness, and adapts to various geometric shapes of the object. A key feature is ensuring isotropy of the part properties by evenly distributing the material along the trajectories. The algorithm also includes the construction of normals at each point of the curve to accurately direct the movement of the printing head. This approach avoids the standard limitations typical of 3D printing. The algorithm was tested on various models, including simple and complex geometric shapes with high curvature. During computer modeling, experiments were conducted with different layer heights and line thicknesses, which allowed for the assessment of the influence of these parameters. The algorithm demonstrated high convergence under various input conditions, ensuring accurate trajectory execution regardless of initial parameters. The trajectories and normals were visualized, confirming the correct print direction and even material deposition. For further work convenience, an intermediate trajectory representation format was developed which is easily converted into G-codes. This allows data to be prepared for future physical experiments that will be conducted to assess the algorithm effectiveness in real printing conditions. The multidimensional trajectory planning algorithm opens up new possibilities for additive manufacturing, enabling the creation of complex objects with improved mechanical properties without the need for additional supports. The practical significance of the algorithm lies in its application in areas, such as aerospace, automotive, and medicine, where both complex geometric shapes and high part strength are important. Further research may focus on expanding the algorithm capabilities to work with various materials and adjusting printing parameters to improve the performance and quality of printed parts.

Keywords

5D printing, multidimensional trajectories, slicing algorithm, additive manufacturing, trajectory planning, CNC path optimization

For citation: Afanasiev M.Ya., Solovev M.R., Krylova A.A., Shorokhov S.A., Fedosov Yu.V. Multidimensional trajectory planning algorithm for a 5D printer slicer. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 1, pp. 95–105 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-95-105

Введение

В последние десятилетия аддитивные технологии, в том числе трехмерная (3D) печать, получили самое широкое распространение в различных отраслях промышленности, от авиации и автомобилестроения до медицины и бытовой электроники. Однако, несмотря на значительные успехи, традиционные методы 3D-печати ограничены использованием трех осей движения, что сужает возможности создания геометрически сложных деталей с высокой степенью точности.

В последнее время стали доступны технологии 5D-печати, которые предоставляют новый подход к аддитивному производству. В отличие от стандартных 3D-принтеров, которые создают объекты послойно вдоль фиксированных осей, 5D-принтеры работают по 5-ти координатам, добавляя вращательные движения к линейным. Это позволяет печатать объекты более сложной формы с минимальными внутренними напряжениями, повышенной прочностью и меньшими

ограничениями по ориентации печатаемой детали на столе [1–5].

Большинство современных многокоординатных аддитивных установок являются промышленными роботами-манипуляторами, адаптированными для печати пластиками или другими материалами. Эти системы способны двигаться по 6-ти осям, что позволяет печатать объекты под разными углами и создавать сложные геометрические формы [6–8]. Однако использование промышленных манипуляторов для 5D-печати имеет ряд недостатков. Во-первых, такие роботы изначально не предназначены для печати, что приводит к ограничениям в точности и скорости производства. Во-вторых, они требуют сложного программного обеспечения для управления движением, что увеличивает стоимость и сложность эксплуатации. Кроме того, размеры и вес манипуляторов могут ограничивать возможности их применения в небольших лабораториях или домашних условиях.

К тому же промышленные манипуляторы чаще всего ориентированы на печать металлами, напри-

мер, с использованием технологий Wire Arc Additive Manufacturing или Directed Energy Deposition. Эти технологии особенно эффективны для создания крупных металлических объектов, но не всегда подходят для работы с другими материалами, такими как пластик, из-за специфики процесса и оборудования.

Тем не менее, существуют специальные 5D-принтеры¹, как коммерческие (Stereotech², Saxismaker³, Epit 5.1⁴) так и с открытым исходным кодом (Open5X [9, 10], Gen5X⁵), которые специально разработаны для аддитивного производства. Такие системы оптимизированы для работы с различными материалами, включая пластик, и предлагают более компактные, простые и доступные решения. Коммерческие устройства обеспечивают готовые решения для промышленности, а открытые (open-source) проекты позволяют пользователям модифицировать системы под свои нужды и создавать уникальные разработки.

Отметим, что имеющееся в настоящее время программное обеспечение для подготовки управляющих программ установок 3D-печати, так называемые слайсеры, не способно в полной мере обеспечить формирование многомерной траектории движения печатающей головки. В связи с этим ведутся исследования, направленные на разработку новых алгоритмов планирования многомерных траекторий для внедрения их в существующие слайсеры [11–13], а также разработки различных видов непланарной (конформной) печати [14–16].

Также стоит отметить, что многие исследователи предлагают использовать существующее программное обеспечение подготовки управляющих программ для станков с числовым программным управлением (ЧПУ) (САМ-системы) для формирования траектории движения при многомерной печати. Однако подобный подход не позволяет осуществлять подготовку управляющих программ в автоматическом режиме, так как требует от пользователя ввода дополнительных параметров обработки, ручного формирования стратегии обработки и в целом не учитывает особенностей именно аддитивного технологического процесса, таких как формирование внутренней структуры заполнения печатаемых моделей, формирование поддержек в слайсере, использование специализированной оснастки и т. д. [17].

¹ В настоящей работе используются устоявшиеся в индустрии термины 3D-принтер и 5D-принтер. Под 3D-принтером понимается установка послойного наплавления материала с декартовой или дельта кинематикой и тремя управляемыми осями. Термин 5D-принтер подразумевает наличие в установке двух дополнительных осей (управляемых координат), как правило, в виде двухосевого поворотного стола.

² 5D Technology. Официальный сайт [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://5dtech.pro>, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 20.09.2024).

³ Saxismaker. Официальный сайт [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://saxismaker.co.uk/>, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 20.09.2024).

⁴ Epitome 3D. Официальный сайт [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://epit3d.com/>, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 20.09.2024).

⁵ GenerativeMachine. Gen5X [Электронный ресурс] // GitHub. Режим доступа: <https://github.com/GenerativeMachine/Gen5X>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 20.09.2024).

Особого внимания заслуживают российские научные работы, посвященные разработке алгоритмов спиральной печати для создания сложных геометрических поверхностей, в частности, для работы с керамическими материалами [18, 19]. В работе [20] изучен синтез алгоритмов управления рабочим столом 5D-принтера с параллельной кинематикой, где рассматривается модернизация программного и аппаратного обеспечения дельта-принтера для работы по сложным пространственным траекториям.

В настоящей работе рассматриваются 5D-принтеры для печати пластиком по технологии послойного наплавления. Цель исследования — разработка и реализация алгоритма планирования траектории движения для 5D-принтеров с учетом особенностей и ограничений оборудования и технологии. Выполнен анализ теоретических аспектов и практических решений, которые могут привести к дальнейшему совершенствованию аддитивных технологий и их внедрению в массовое производство.

Постановка задачи

Задача, решаемая в данной работе, состоит в разработке алгоритма формирования многомерной траектории движения печатающей головки 3D-принтера на основе сферических концентрических слоев с заданным шагом («высотой» слоя). На каждом слое базовая траектория представляет собой спиральную линию с заданным шагом («ширина» печатной линии), разбитой на равные отрезки [21]. Линия должна огибать всю поверхность каждого из концентрических слоев. Таким образом, «шов» (линия перехода между слоями) будет находиться внутри модели, и совпадать с осью, соединяющей северный и южный полюса каждого из сферических слоев.

На вход алгоритма поступает полигональная модель 3D-объекта. Модель предварительно обрабатывается и, исходя из максимальных размеров, осуществляется построение необходимого количества сферических слоев. Непрерывная спиральная линия каждого слоя разбивается на равные части, формируя, таким образом, облако точек. Данное облако точек пересекается с полигональной моделью, и все точки делятся на два класса: внутри объема модели и вне этого объема. На основании данного разбиения формируются последовательные связи между точками для рабочих (происходит экструдирование расплавленного пластика) и холостых ходов печатающей головки.

Базовая многомерная спираль задается формулами:

$$\begin{aligned} a_{\max} &= 2\pi N, \\ a &= a_{\max} t, \\ b &= -\frac{\pi}{2} + \frac{a\pi}{a_{\max}}, \\ x &= \frac{r}{2} \cos a \cos b, \\ y &= \frac{r}{2} \sin a \cos b, \\ z &= -\frac{r}{2} \sin b, \end{aligned} \quad (1)$$

где t — параметр; a — угол спирали вокруг сферы, изменяющийся от 0 до полного количества оборотов N ; b — угол вдоль широты сферы, изменяясь от $-\frac{\pi}{2}$ до $\frac{\pi}{2}$; x, y, z — декартовы координаты точки на спирали в зависимости от углов a и b .

Описание алгоритма

На рис. 1 представлена общая блок-схема алгоритма формирования траектории движения головки 5D-принтера.

Рассмотрим более подробно шаги представленного алгоритма. 3D-модель загружается с диска в формате STL (STereoLithography — стереолитография). Формат STL используется для описания 3D-объектов, и существует в двух вариантах: текстовый (ASCII) и бинарный. Текстовый формат хранит данные о треугольных гранях в виде читаемого человеком текста, что удобно для отладки, но занимает больше места, чем бинарный. В бинарном формате информация хранится в виде двоичных чисел, что делает его более компактным и быстрым для обработки. Текстовый формат STL используется для простого анализа, тогда как бинарный — для эффективного хранения и передачи данных в задачах 3D-печати. Алгоритм предполагает возможность использования любого из вышеописанных представлений.

Проверка замкнутости модели. Проверка замкнутости модели в формате STL важна для предотвращения ошибок при дальнейшей обработке модели. Замкнутая модель не имеет «отверстий» или открытых граней. Для анализа и исправления таких дефектов используется интерфейс программирования приложения (Application Programming Interface, API) облачного сервиса Netfabb¹, который предоставляет инструменты для автоматической проверки и исправления моделей, или программы MeshLab², позволяющей находить и устранять проблемы с замкнутостью сеток.

Определение центра масс модели и перенос начала координат модели в центр масс. Геометрический центр масс (или центр тяжести) 3D-модели — это точка, в которой сосредоточена вся масса объекта, при условии, что материал модели имеет равномерную плотность. С точки зрения рассматриваемой технологии печати сферическими слоями наиболее целесообразным представляется совмещение геометрического центра масс с центром пересекающих модель сфер.

Формат STL описывает модель как набор треугольников (граней). Треугольник в 3D-пространстве можно математически описать по координатам его вершин $A(x_1, y_1, z_1)$, $B(x_2, y_2, z_2)$, $C(x_3, y_3, z_3)$. Для расчета центра масс важно учитывать площадь и расположение

всех треугольников. Для каждого треугольника можно вычислить его центр масс $G(x_g, y_g, z_g)$ как среднее значение координат его вершин:

$$x_g = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3},$$

$$y_g = \frac{y_1 + y_2 + y_3}{3},$$

$$z_g = \frac{z_1 + z_2 + z_3}{3}.$$

Также необходимо вычислить площадь каждого треугольника, чтобы взвесить его вклад в общий центр масс. Площадь треугольника S , заданного вершинами, можно найти через векторное произведение:

$$S = \frac{1}{2} \|\mathbf{AB} \times \mathbf{AC}\|,$$

где $\mathbf{AB} = (x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1)$; $\mathbf{AC} = (x_3 - x_1, y_3 - y_1, z_3 - z_1)$. Общий центр масс G_{STL} треугольников с весами, пропорциональными их площадям:

$$G_{STL} = \frac{\sum_{i=1}^N S_i G_{\Delta i}}{\sum_{i=1}^N S_i},$$

где S_i и $G_{\Delta i}$ — площадь и центр масс i -го треугольника; N — общее количество треугольников в модели.

Построение сферических спиральных слоев. После переноса начала координат модели происходит определение максимального диаметра сферы, в которую модель полностью помещается. Далее задается минимальный начальный диаметр сферы, с которого начинается разбиение. Минимальный диаметр r_0 определяется, исходя из используемой при печати технологической оснастки. Пространство между минимальной и максимальной сферами равномерно заполняется концентрическими спиральными линиями, построенными по формулам (1), с заданным постоянным шагом l , который определяет толщину печатаемого слоя и зависит от параметров печатающей головки. Пример сферического слоя представлен на рис. 2.

В практической печати методом послойного наплавления профиль печатаемой нити не является точной окружностью. Окружность «сплюсчивается» в процессе печати, т. е. существуют два отдельных параметра: высота линии (совпадает с толщиной слоя l) и ширина линии печати — w , значение которой задается отдельно. Например, для наиболее распространенного диаметра сопла печатающей головки равного 0,4 мм, стандартной высотой линии (слоя) является 0,2 мм при ширине линии — 0,4–0,45 мм. При этом опытным путем доказано, что для данного диаметра сопла значения ширины могут быть в диапазоне от 0,4 до 0,8 мм без заметной потери качества или прочности печати. В рассматриваемом алгоритме ширина линии w используется для расчета параметра N в выражении (1), т. е. количества оборотов спирали: $N = \frac{\pi R}{w}$.

¹ Autodesk. Официальная документация [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.autodesk.com/akn-aknsite-article-attachments/2fcf92e8-1c75-4e1f-89c3-eaa72a7eedfd.pdf>, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 22.09.2024).

² MeshLab. Официальный сайт [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.meshlab.net/>, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 22.09.2024).



Рис. 1. Блок-схема алгоритма формирования многомерной траектории
Fig. 1. Block diagram of the multidimensional trajectory generation algorithm

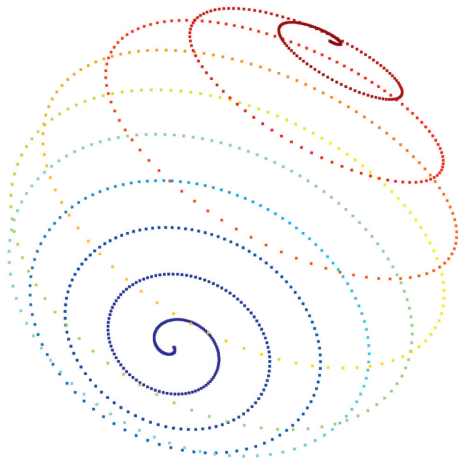


Рис. 2. Сферическая спираль
Fig. 2. Spherical helix

Разбиение сферических спиральных слоев на отрезки. На данном этапе алгоритма происходит разбиение параметрически заданной пространственной кривой на прямолинейные отрезки заданной длины с шагом разбиения n . В иностранных научных работах, посвященных разработке систем с ЧПУ, данный этап, как правило, называется интерполяцией (interpolation). Чтобы разбить сферическую спираль на равные отрезки, необходимо выполнить несколько шагов [22].

Шаг 1. Осуществляется численное интегрирование для определения общей длины спирали. Поскольку спираль задана параметрически, длина дуги может быть найдена как интеграл от корня суммы квадратов производных координат $x(t)$, $y(t)$, и $z(t)$ по параметру t :

$$L = \int_0^1 \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} dt.$$

Шаг 2. Происходит разбиение общей длины L на N равных частей, чтобы получить целевую длину каждого отрезка:

$$\Delta L = \frac{L}{N}.$$

Шаг 3. С помощью численного метода выполняется поиск параметров t_i таких, что кумулятивная длина дуги до каждой точки t_i равна $i\Delta L$, где $i = (1, 2, \dots, N)$.

Для поиска используется функция `fsolve` из библиотеки `scipy.optimize`¹ языка программирования Python.

Эта функция решает уравнение вида $f(t) = 0$. В данном случае `fsolve` находит корни уравнения, вычисляя разницу между целевой длиной отрезка и текущей длиной дуги. Функция `fsolve` основана на методе Ньютона. Она корректирует значение t в направлении, уменьшающем разницу, чтобы найти такие t_i , при которых длина каждого сегмента будет равна ΔL .

¹ SciPy v1.10.1. Tutorial — Optimization and fitting [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/tutorial/optimize.html>. Яз. англ. (дата обращения: 18.12.2024).

Примеры разбиения сферической кривой представлены на рис. 3, а. На рис. 3, б показано облако точек, состоящее из 555 108 точек. Видно равномерное распределение точек по объему модели. Данное можно сравнить с облаком разбиения точек на рис. 3, в, состоящее из 595 571 точек и построенное по формуле (1), при этом у полюсов присутствует уменьшение расстояния между точками по мере приближения к полюсу. Прямое преобразование подобного облака точек в управляющую программу для принтера приведет не только к нерациональному увеличению объема последней, но и к снижению качества модели у полюсов сферы разбиения. Это обусловлено тем, что принтер будет делать слишком много коротких перемещений, для которых достаточно сложно рассчитать необходимое количество подаваемого пластика, вследствие чего возможна его переэкструзия или недоэкструзия.

Очевидно, что количество точек разбиения должно увеличиваться по мере увеличения диаметра сферических слоев. Эмпирически определено, что увеличение должно быть пропорционально площади каждого следующего сферического слоя. Определим, что S_1 — количество точек разбиения меньшего из соседних слоев, S_2 — большего. Если площадь сферы задается с помощью формулы $S = 4\pi R^2$, то отношение определяется как:

$$S_2 = S_1 \left(1 + \frac{2l}{R_1} + \frac{l^2}{R_1^2} \right),$$

где l — толщина сферического слоя; R_1 — радиус меньшей сферы. R_1 можно выразить через минимальный начальный радиус сферы r_0 и l . Таким образом, отношения количества точек разбиения любых двух соседних слоев задается следующим образом:

$$S_{n+1} = S_n \left(1 + \frac{2}{r_0 + n} + \frac{1}{r_0^2 + 2r_0nl + n^2} \right),$$

где n — номер текущего слоя. Выражение в скобках представляет собой коэффициент увеличения количества точек на следующем слое k , который является параметром функции рассматриваемого алгоритма. В программной реализации также приняты следующие допущения: диаметр минимальной сферы равен 1, на данной сфере размещается вырожденная спираль, состоящая из одной точки.

Построение векторов нормали в каждой точке. Сферическая спираль параметризуется углами $\theta(t)$ и $\varphi(t)$ в сферических координатах. Для каждой точки спирали необходимо вычислить декартовы координаты $x(t)$, $y(t)$ и $z(t)$. Вектор касательной $\mathbf{T}$ к кривой в каждой точке можно вычислить как производную положения точки по времени t или параметру, который изменяется вдоль кривой. В декартовых координатах это будет вектор:

$$\mathbf{T} = \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{dx}{dt} \\ \frac{dy}{dt} \\ \frac{dz}{dt} \end{pmatrix}.$$

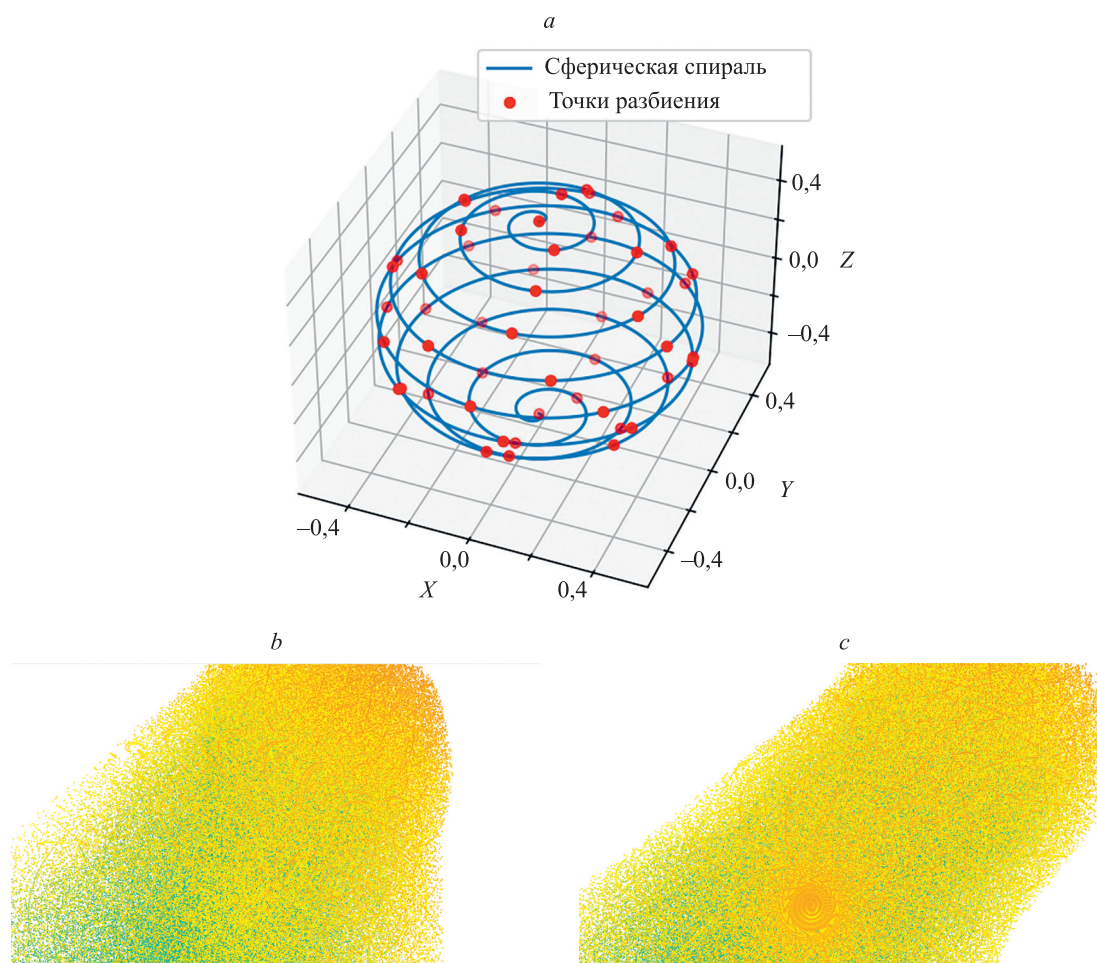


Рис. 3. Разбиение сферической спирали на отрезки (a); равномерное (b) и неравномерное (c) распределения
Fig. 3. Segmentation of the spherical helix into segments (a); uniform distribution (b) and non-uniform distribution (c)

Получим вектор нормали $\mathbf{N}$, перпендикулярный вектору касательной $\mathbf{T}$. Его можно найти, используя производную вектора касательной по параметру:

$$\mathbf{N} = \frac{d}{dt}\mathbf{T} = \frac{d^2}{dt^2} \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{pmatrix}.$$

Полученный вектор нормали может быть ненормированным, т. е. его длина может быть произвольной. Чтобы получить единичный вектор нормали, его нужно нормализовать:

$$\hat{\mathbf{N}} = \frac{\mathbf{N}}{|\mathbf{N}|}.$$

Пример построения векторов нормали для каждой точки разбиения сферической спиральной кривой представлен на рис. 4.

Операция разности для модели и оснастки. Печать сферическими слоями отличается от планарной печати отсутствием печатного стола. Многие 5D-принтеры используют цилиндрическую оснастку для печати осесимметричных деталей. Оснастка распечатывается планарными слоями, после чего начинается многоосевое построение. В настоящей работе также предполагается использование печатаемой оснастки

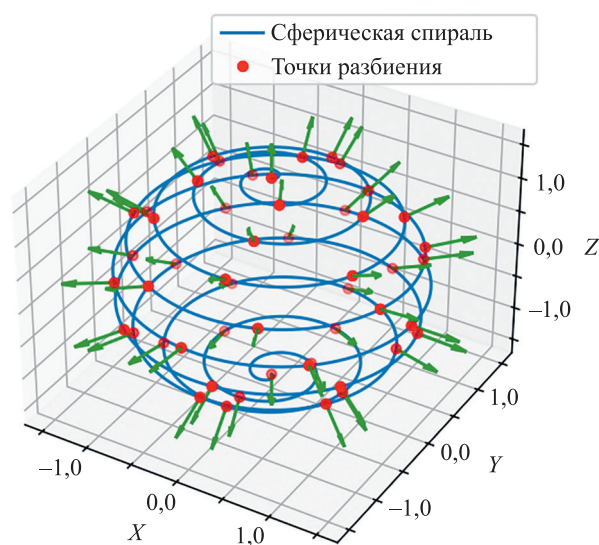


Рис. 4. Положение векторов нормали в точках разбиения сферической спиральной кривой (зелеными стрелками обозначены вектора нормали)

Fig. 4. Normal vectors at points of segmentation of the spherical spiral curve (green arrows indicate normal vectors)

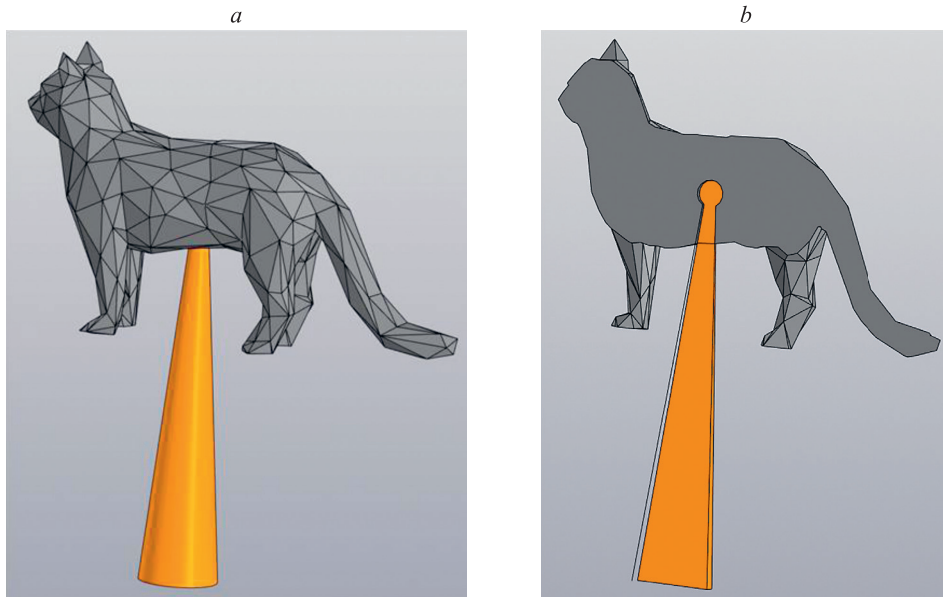


Рис. 5. Модель с печатаемой оснасткой (а), вид с разрезом (b)

Fig. 5. Model with printable tooling (a), sectional view (b)

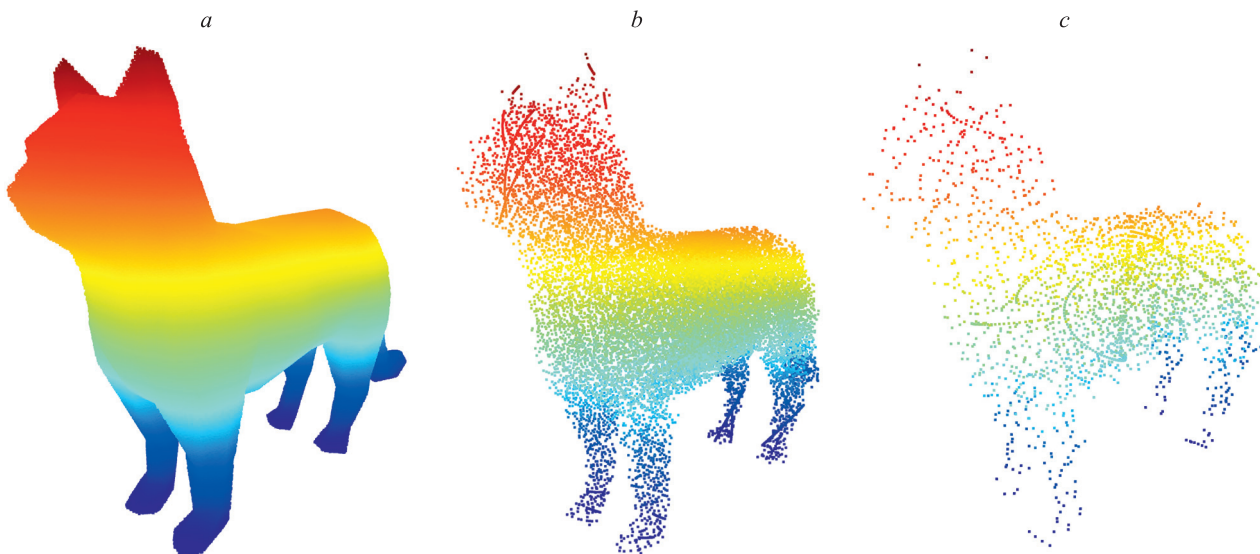
специальной формы (рис. 5). Оснастка представляет собой конусообразное или цилиндрическое основание со сферическим навершием радиусом r_0 . Таким образом, на данном этапе алгоритма необходимо выполнить операцию разности между основной STL-моделью и STL-моделью оснастки. Данная операция выполняется с помощью метода `difference` библиотеки `trimesh`¹ Python.

Пересечение модели и облака точек сферических спиралей. В рассматриваемой реализации результатом разбиения модели на отрезки является облако точек. На данном этапе алгоритма выполняется операция пе-

ресечения полученной модели (без оснастки) с этим облаком точек. Пересечение осуществляется с помощью метода `contains` из библиотеки `trimesh` языка Python. Пример облака точек с разными параметрами толщин слоев показаны на рис. 6.

Постпроцессинг в набор координат отрезков. На данном этапе алгоритма формируется массив точек координат отрезков в порядке обхода слоев для каждой спиральной кривой. Каждая координата отмечается флагом, обозначающим принадлежность той или иной точки модели. Элемент массива представляется следующим образом: `[flag, x, y, z, roll, pitch, yaw]`, где `x, y` и `z` — декартовы координаты точек по соответствующим осям; `roll, pitch` и `yaw` — углы вращения вокруг этих осей.

Формирования G-кодов. Каждый элемент массива преобразуется в соответствующий G-код по стандарту

Рис. 6. Полученное облако точек при ширине линии $w = 0,4$ для толщин слоев l : 0,1 (a), 0,5 (b) и 1 (c)Fig. 6. The resulting point cloud with line width $w = 0.4$; layer thickness l : 0.1 (a), 0.5 (b), and 1 (c)

¹ Trimesh: Python library for 3D geometry processing [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://trimesh.org/>. Яз. англ. (дата обращения: 18.12.2024).

ISO 6983¹. Рабочие ходы (перемещение печатающей головки с экструзией пластика) задаются кодом **G1**, холостое перемещение кодом **G0**. Декартовы координаты задаются кодами **X**, **Y** и **Z**, а вращения **A**, **B** и **C**. Линейные координаты измеряются в миллиметрах, вращательные — в градусах (вещественным числом с четырьмя фиксированными разрядами после запятой). Также с помощью кода **F** определяются скорости перемещения по осям в миллиметрах в минуту, так называемая «минутная подача».

Программная реализация

Программная реализация алгоритма выполнена на языке программирования Python версии 3.11. Математические операции над матрицами и векторами реализованы с помощью библиотеки NumPy версии 1.26.4, численные методы интегрирования взяты из библиотеки SciPy версии 1.12.0, работа с файлами формата STL осуществлялась функциями библиотек Trimesh версии 4.2.0 и numpy-stl версии 3.1.2. Для визуализации кривых и облаков точек применялись библиотеки Matplotlib версии 3.8.3 и Open3D версии 0.18.0. Исходный код функций разработанного алгоритма представлен в репозитории на платформе GitHub².

Обсуждение

Для оценки эффективности предложенного алгоритма планирования многомерных траекторий, были проведены тесты на нескольких типах 3D-моделей с различной геометрией. Модели включали как простые формы, такие как сферы и цилиндры, так и сложные объекты. Результаты тестирования показали, что алгоритм стабильно справляется с созданием траекторий для объектов с различной степенью кривизны.

Тем не менее, алгоритм имеет ограничения. Одной из основных проблем является зависимость точности печати от параметров материала и характеристик принтера. Например, изменение ширины линии или толщины слоя может повлиять на равномерность нанесения материала и качество поверхности. В дальнейшем необходимо провести более глубокие исследования, связанные с адаптацией алгоритма под различные материалы и конфигурации принтеров. Отметим, что на данном этапе разработки возможна работа только с одной моделью внутри STL-файла.

Можно выдвинуть следующие предложения по дальнейшему совершенствованию алгоритма:

- 1) необходима оптимизация времени работы алгоритма за счет использования многопоточности и распараллеливания обработки слоев модели;

- 2) возможна реализация функции генерации заполнения модели паттерном, например, решетчатой структурой (латисой) для уменьшения веса и расхода материала без значительного снижения прочности напечатанного объекта;
- 3) требуется реализация процедуры спрямления траектории на холостых ходах перемещения, а также обхода оснастки печатающей головкой, не допускающая их взаимных соударений.

Также можно рассмотреть возможность многоматериальной печати для формирования поддерживающих структур. Предполагается использование растворимого материала. На данном этапе развития технологии печати методом послойного наплавления пластика легче всего добиться этого за счет применения устройств автоматической смены материала. С одной стороны, одним из преимуществ 5D-печати является отсутствие необходимости формирования поддерживающих структур. С другой стороны, применение подобных структур именно в рассматриваемом подходе позволит работать с еще более сложной геометрией моделей, упростить оптимизацию холостых ходов и даст возможность работать с STL-файлами, включающими несколько моделей.

Заключение

В работе предложен и реализован новый подход к планированию многомерных траекторий для 5D-принтера, ориентированный на аддитивное производство сложных геометрических объектов из пластика. Основной особенностью предложенного алгоритма является использование сферических спиральных слоев, что позволяет значительно повысить качество напечатанных объектов за счет равномерного распределения материала и минимизации необходимости использования поддерживающих структур.

Традиционные методы нарезки для 3D-принтеров основываются на плоских слоях, что приводит к ряду ограничений, таких как низкая механическая прочность в вертикальной плоскости и неравномерное распределение нагрузки. В отличие от этого, предложенный алгоритм планирует траектории таким образом, чтобы слои следовали за кривизной объекта, что позволяет улучшить адгезию между слоями. Это особенно важно при печати объектов с криволинейной поверхностью или с элементами сложной формы.

Выполненное компьютерное моделирование подтвердило работоспособность алгоритма. Полученные траектории соответствуют заданной модели. Таким образом, предложенный подход может быть применен в широком спектре задач, связанных с 5D-печатью, включая создание деталей для авиационной и автомобильной промышленности, архитектурных моделей и других сложных объектов, требующих высокой механической прочности.

В целом, предложенный алгоритм планирования траекторий открывает новые возможности для применения 5D-принтеров в различных областях и может способствовать развитию технологий аддитивного производства, позволяя создавать более качественные и прочные изделия с меньшими затратами времени и ресурсов.

¹ ISO 6983-1:2009. Automation systems and integration — Numerical control of machines — Program format and definitions of address words — Part 1: Data format for positioning, line motion and contouring control systems. Geneva: International Organization for Standardization, 2009. 32 p.

² Sphere Slicer [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://github.com/futoke/sphere_slicer. Яз. англ. (дата обращения: 18.12.2024).

Литература

References

1. Yigit I.E., Lazoglu I. Spherical slicing method and its application on robotic additive manufacturing // *Progress in Additive Manufacturing*. 2020. V. 5. N 4. P. 387–394. <https://doi.org/10.1007/s40964-020-00135-5>
2. Munasinghe N., Paul G. Radial slicing for helical-shaped advanced manufacturing applications // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. V. 112. N 3-4. P. 1089–1100. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05999-z>
3. Popov A.Y., Gushchin I.A., Drobotov A.V. Model preparation algorithm for 3D printing with discrete rotation // *Proc. of the International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. 2019. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2019.8742958>
4. Kaplan D., Rorberg S., Ben-Chen M., Sterman Y. NozMod: Nozzle Modification for efficient FDM 3D printing // *Proc. of the 7th Annual ACM Symposium on Computational Fabrication*. 2022. P. 1–9. <https://doi.org/10.1145/3559400.3561999>
5. Feng X., Cui B., Liu Y., Li L., Shi X., Zhang X. Curved-layered material extrusion modeling for thin-walled parts by a 5-axis machine // *Rapid Prototyping Journal*. 2021. V. 27. N 7. P. 1378–1387. <https://doi.org/10.1108/RPJ-11-2020-0272>
6. Inero F., Furlan V., Giberti H. Non-planar slicing for filled free-form geometries in robot-based FDM // *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2023. in press. <https://doi.org/10.1007/s10845-023-02250-w>
7. Liu B., Feng J., Lin Z., Wu S., He Y., Fu J. Spherical path planning for multi axis support free additive manufacturing of truss structures // *Journal of Manufacturing Processes*. 2024. V. 109. P. 198–212. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.12.011>
8. Mitropoulou I., Bernhard M., Dillenburger B. Print paths key-framing: design for non-planar layered robotic FDM printing // *Proc. of the 5th Annual ACM symposium on computational fabrication*. 2020. P. 1–10. <https://doi.org/10.1145/3424630.3425408>
9. Hong F., Hodges S., Myant C., Boyle D. Open5x: Accessible 5-axis 3D printing and conformal slicing // *Extended Abstracts of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. 2022. P. 1–6. <https://doi.org/10.1145/3491101.3519782>
10. Hong F., Lampret B., Myant C., Hodges S., Boyle D. 5-axis multi-material 3D printing of curved electrical traces // *Additive Manufacturing*. 2023. V. 70. P. 103546. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103546>
11. Nayyeri P., Zareinia K., Bougherara H. Planar and nonplanar slicing algorithms for fused deposition modeling technology: A critical review // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. V. 119. N 5-6. P. 2785–2810. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08347-x>
12. Shan Y., Shui Y., Hua J., Mao H. Additive manufacturing of non-planar layers using isothermal surface slicing // *Journal of Manufacturing Processes*. 2023. V. 86. P. 326–335. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.12.054>
13. Neel T.L., Mesto T., Hascoet J.-Y. A novel slicing strategy for continuous printing with a helix 3D printer // *Journal of Machine Engineering*. 2022. V. 22. N 3. P. 31–43. <http://dx.doi.org/10.36897/jme/151119>
14. Tang J., Dong Y., Cai L., Zhu Q., Shi J. Conformal 3D printing algorithm for surfaces and its in situ repair applications // *Micromachines*. 2024. V. 15. N 7. P. 920. <https://doi.org/10.3390/mi15070920>
15. Nisja G.A., Cao A., Gao C. Short review of nonplanar fused deposition modeling printing // *Material Design & Processing Communications*. 2021. V. 3. N 4. P. e221. <https://doi.org/10.1002/mdp2.221>
16. Fortunato G.M., Nicoletta M., Batoni E., Vozzi G., De Maria C. A fully automatic non-planar slicing algorithm for the additive manufacturing of complex geometries // *Additive Manufacturing*. 2023. V. 69. P. 103541. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103541>
17. Srinivas G.L., Laux M., Nair V.P., Brandstotter M. Multi-axis additive manufacturing: development of slicer and toolpath for 2.5 D/3D/5D printing // *Advances in Service and Industrial Robotics*. 2024. V. 157. P. 337–346. https://doi.org/10.1007/978-3-031-59257-7_34
18. Алексеев А.А., Кирсанов А.Е., Шишов О.В. 3D-печать керамических изделий при использовании спиральной печати тела вращения с волнообразной поверхностью и эффектом «плетения» // *Огарёв-Online*. 2020. N. 15(152). С. 1–8.
1. Yigit I.E., Lazoglu I. Spherical slicing method and its application on robotic additive manufacturing. *Progress in Additive Manufacturing*, 2020, vol. 5, no. 4, pp. 387–394. <https://doi.org/10.1007/s40964-020-00135-5>
2. Munasinghe N., Paul G. Radial slicing for helical-shaped advanced manufacturing applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, vol. 112, no. 3-4, pp. 1089–1100. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05999-z>
3. Popov A.Y., Gushchin I.A., Drobotov A.V. Model preparation algorithm for 3D printing with discrete rotation. *Proc. of the International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 2019, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2019.8742958>
4. Kaplan D., Rorberg S., Ben-Chen M., Sterman Y. NozMod: Nozzle Modification for efficient FDM 3D printing. *Proc. of the 7th Annual ACM Symposium on Computational Fabrication*, 2022, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1145/3559400.3561999>
5. Feng X., Cui B., Liu Y., Li L., Shi X., Zhang X. Curved-layered material extrusion modeling for thin-walled parts by a 5-axis machine. *Rapid Prototyping Journal*, 2021, vol. 27, no. 7, pp. 1378–1387. <https://doi.org/10.1108/RPJ-11-2020-0272>
6. Inero F., Furlan V., Giberti H. Non-planar slicing for filled free-form geometries in robot-based FDM. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2023, in press. <https://doi.org/10.1007/s10845-023-02250-w>
7. Liu B., Feng J., Lin Z., Wu S., He Y., Fu J. Spherical path planning for multi axis support free additive manufacturing of truss structures. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, vol. 109, pp. 198–212. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.12.011>
8. Mitropoulou I., Bernhard M., Dillenburger B. Print paths key-framing: design for non-planar layered robotic FDM printing. *Proc. of the 5th Annual ACM symposium on computational fabrication*, 2020, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1145/3424630.3425408>
9. Hong F., Hodges S., Myant C., Boyle D. Open5x: Accessible 5-axis 3D printing and conformal slicing. *Extended Abstracts of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2022, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1145/3491101.3519782>
10. Hong F., Lampret B., Myant C., Hodges S., Boyle D. 5-axis multi-material 3D printing of curved electrical traces. *Additive Manufacturing*, 2023, vol. 70, pp. 103546. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103546>
11. Nayyeri P., Zareinia K., Bougherara H. Planar and nonplanar slicing algorithms for fused deposition modeling technology: A critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, vol. 119, no. 5-6, pp. 2785–2810. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08347-x>
12. Shan Y., Shui Y., Hua J., Mao H. Additive manufacturing of non-planar layers using isothermal surface slicing. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, vol. 86, pp. 326–335. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.12.054>
13. Neel T.L., Mesto T., Hascoet J.-Y. A novel slicing strategy for continuous printing with a helix 3D printer. *Journal of Machine Engineering*, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 31–43. <http://dx.doi.org/10.36897/jme/151119>
14. Tang J., Dong Y., Cai L., Zhu Q., Shi J. Conformal 3D printing algorithm for surfaces and its in situ repair applications. *Micromachines*, 2024, vol. 15, no. 7, pp. 920. <https://doi.org/10.3390/mi15070920>
15. Nisja G.A., Cao A., Gao C. Short review of nonplanar fused deposition modeling printing. *Material Design & Processing Communications*, 2021, vol. 3, no. 4, pp. e221. <https://doi.org/10.1002/mdp2.221>
16. Fortunato G.M., Nicoletta M., Batoni E., Vozzi G., De Maria C. A fully automatic non-planar slicing algorithm for the additive manufacturing of complex geometries. *Additive Manufacturing*, 2023, vol. 69, pp. 103541. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103541>
17. Srinivas G.L., Laux M., Nair V.P., Brandstotter M. Multi-axis additive manufacturing: development of slicer and toolpath for 2.5 D/3D/5D printing. *Advances in Service and Industrial Robotics*, 2024, vol. 157, pp. 337–346. https://doi.org/10.1007/978-3-031-59257-7_34
18. Alekseev A.A., Kirsanov A.E., Shishov O.V. 3D-PRINTING of ceramic products using spiral printing of the body of rotation with a wavy surface and the effect of “Weaving”. *Ogarev-online*, 2020, no. 15 (152), pp. 1–8. (in Russian)

19. Кирсанов А.Е., Шишов О.В. 3D-печать керамических изделий при использовании спиральной печати тела вращения с волнообразной поверхностью и эффектом «плетения» // Микроэлектроника и информатика — 2020. 27-я Всероссийская межвузовская конференция студентов и аспирантов: тезисы докладов. М.: МИЭТ, 2020. С. 147.
20. Козлова А.Д., Крауинш П.Я. Синтез алгоритмов управления рабочим столом 5D-принтера с параллельной кинематикой // Форум молодых ученых. 2018. N 10 (26). С. 573–576.
21. Lebedev V.A., Solovjov V.P., Webb B.W. View factors of spherical, conic, and cylindrical spiral surfaces // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2021. V. 274. P. 107866. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2021.107866>
22. Hüttig C., Stemmer K. The spiral grid: A new approach to discretize the sphere and its application to mantle convection // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2008. V. 9. N 2. P. Q02018. <https://doi.org/10.1029/2007GC001581>

19. Kirsanov A.E., Shishov O.V. 3D-PRINTING of ceramic products using spiral printing of the body of rotation with a wavy surface and the effect of “Weaving”. *Microelectronics and Computer Science. Proc. of the 27th All-Russian Interuniversity Conference of Students and Postgraduates: Abstracts*. Moscow, MIET Publ., 2020, pp. 147. (in Russian)
20. Kozlova A.D., Krauinsh P.Y. Synthesis of control algorithms desk 5D printer with parallel kinematics. *Young Scientists Forum*, 2018, no. 10 (26), pp. 573–576. (in Russian)
21. Lebedev V.A., Solovjov V.P., Webb B.W. View factors of spherical, conic, and cylindrical spiral surfaces. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2021. vol. 274, pp. 107866. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2021.107866>
22. Hüttig C., Stemmer K. The spiral grid: A new approach to discretize the sphere and its application to mantle convection. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2008. vol. 9, no. 2, pp. Q02018. <https://doi.org/10.1029/2007GC001581>

Авторы

Афанасьев Максим Яковлевич — кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57194081345](https://orcid.org/0000-0003-4061-1407), <https://orcid.org/0000-0003-4061-1407>, higonokami@yandex.ru

Соловьев Михаил Романович — программист, ГК «Геоскан», Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0006-0787-5573>, onisoris@niuitmo.ru

Крылова Анастасия Андреевна — кандидат технических наук, преподаватель, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; программист, ЗАО «Биоград», Санкт-Петербург, 197110, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-5822-6702>, ananasn94@yandex.ru

Шорохов Сергей Александрович — ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-5412-7723>, stratumxspb@gmail.com

Федосов Юрий Валерьевич — кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; инженер, ОАО «Российский институт мощного радиостроения», Санкт-Петербург, 199048, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-1869-0081>, yf01@yandex.ru

Authors

Maksim Ya. Afanasiev — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57194081345](https://orcid.org/0000-0003-4061-1407), <https://orcid.org/0000-0003-4061-1407>, higonokami@yandex.ru

Michael R. Solovjev — Software Developer, Geoscan Corporate Group, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0006-0787-5573>, onisoris@niuitmo.ru

Anastasiia A. Krylova — PhD, Lecturer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Software Developer, JSC “Biograd”, Saint Petersburg, 197110, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-5822-6702>, ananasn94@yandex.ru

Sergey A. Shorokhov — Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-5412-7723>, stratumxspb@gmail.com

Yuri V. Fedosov — PhD, Head of Laboratory, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Engineer, JSC “Russian Institute for Power Radiobuilding”, Saint Petersburg, 199048, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-1869-0081>, yf01@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 30.09.2024
Одобрена после рецензирования 20.12.2024
Принята к печати 24.01.2025

Received 30.09.2024
Approved after reviewing 20.12.2024
Accepted 24.01.2025



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»