

А. А. Карцева, студентка магистратуры, kartseva.2013@mail.ru,
А. А. Левин, аспирант, heis97@mail.ru, **А. А. Воротников**, преподаватель, aavorotnikov90@gmail.com,
Ю. В. Подураев, д-р техн. наук, проф., проф. каф., y.poduraev@stankin.ru,
Ю. В. Илюхин, д-р техн. наук, проф., зав. каф., ilyv_178@mail.ru,
 Московский государственный технологический университет "СТАНКИН"

Планирование траектории движения коллаборативного робота для выполнения биопечати*

Биопечать in situ — автоматизированный процесс прямого нанесения биоматериалов на дефектный участок живой ткани во время медицинской операции. Для выполнения такой биопечати целесообразно использовать коллаборативные манипуляционные роботы, обладающие пятью и более степенями подвижности и способные придавать рабочему органу нужную ориентацию. Актуальной является задача планирования траектории движения робота для биопечати in situ вдоль реальной криволинейной поверхности. Проведен краткий анализ решений, позволяющих планировать траекторию для биопечати. Приведено математическое описание поверхности, используемой в качестве модели дефекта, необходимое для построения траектории. Введены дополнительные ограничения в целях уменьшения сложности алгоритма планирования. Для локализации дефекта на криволинейной поверхности используется информация о задаваемом предварительно контуре, охватывающем этот дефект. Разработан алгоритм генерации плоской траектории движения рабочего органа робота для заполнения дефекта с последующим проецированием ее на реальную криволинейную поверхность. Отмечена важность предварительной обработки данных об отсканированной поверхности с помощью разработанного алгоритма фильтрации, основанного на методе скользящего среднего. Генерация траектории движения рабочего органа робота выполняется по-прежнему сначала в плоскости, затем она проецируется на криволинейную поверхность. Для каждой точки траектории вычисляется такая однородная матрица преобразования, чтобы рабочий орган робота располагался по нормали к криволинейной поверхности. Представлен расчет углов ориентации рабочего органа робота КУКА на основании данных, получаемых из однородной матрицы преобразования. Работоспособность предлагаемого алгоритма планирования траектории для биопечати in situ подтверждена результатами компьютерного моделирования с использованием разработанного авторами программного обеспечения и результатами экспериментального исследования биопечати, выполняемой коллаборативным роботом KUKA LBR R820 на трех образцах с различной кривизной поверхности и разными контурами дефекта.

Ключевые слова: биопечать in situ, планирование траектории робота, криволинейная траектория, предварительная обработка поверхности, заполнение дефекта, ступенчатый эффект, ориентация рабочего органа

Введение

Одной из областей активного применения методов робототехники и мехатроники является биопечать *in situ* [1]. В качестве биоматериала обычно используется гидрогель, достаточно вязкий, чтобы держать форму, в который замешаны клетки того вида ткани, которую необходимо заместить. Таким образом, биопечать позволяет ускорить заживление кожных ран за счет использования гидрогеля с клетками и дополнительными факторами роста.

Нанесение биоматериалов, как правило, осуществляется с помощью 3D-биопринтеров. Качество биопечати с помощью 3D-биопринтеров,

имеющих картезианскую кинематику и наносящих материалы планарными слоями, оказывается недостаточно высоким, так как поверхности тела человека и других живых организмов являются криволинейными. При печати планарными слоями возникает так называемый ступенчатый эффект, напечатанная поверхность получается негладкой, и чем больше кривизна поверхности, тем более выражен ступенчатый эффект. Существует несколько способов устранения этого явления, но применение каждого из них влечет за собой как положительные, так и отрицательные последствия. Предлагается, например, уменьшить толщину слоев, однако это приводит к увеличению времени печати и уменьшению адгезионных свойств слоев. Иногда рекомендуется постобработка поверхности, но для биопечати *in situ* этот способ недопустим. Лучшим решением представляется третий способ — нанесение биоматериала криволинейными слоями (рис. 1, см. вторую сторону обложки).

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения государственного задания (FSFS-2021-0004). Работа выполнена с использованием оборудования центра коллективного пользования "Государственный инженеринговый центр" ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН" при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 075-15-2021-695 от 26.07.2021, уникальный идентификатор проекта RF-2296.61321X0013).

Кроме того, существует метод так называемой конформной 3D-печати [2–6], при которой с помощью 3D-принтера выполняют печать криволинейными слоями. Однако при этом существует опасность столкновения сопла с поверхностью печати и деформации уже наложенного материала.

Для повышения качества и безопасности выполнения биопечати *in situ* целесообразно использовать манипуляционные роботы, обладающие пятью и более степенями подвижности и способные придавать рабочему органу нужную ориентацию. Как правило, в каждой точке траектории движения требуется обеспечить ориентацию сопла рабочего органа по нормали к поверхности тела живого организма.

Используемый для биопечати робот и врачи в большинстве случаев находятся в одном общем рабочем пространстве. Поэтому такой робот должен быть безопасным для обслуживающего персонала. Учитывая эти обстоятельства, представляется целесообразным для биопечати *in situ* использовать коллаборативный робот [7]. В частности, примером такого робота является робот KUKA LBR IIWA R820. В зависимости от модификации он способен манипулировать объектом, имеющим массу 7 или 14 кг, в радиусе действия до 820 мм, что достаточно для реализации роботизированной биопечати. Коллаборативный робот имеет датчики, позволяющие контролировать действующие на робот внешние силы и моменты приводов и вовремя останавливать движение робота при опасном его сближении с человеком, а также конструкцию со сглаженными поверхностями. Благодаря этим особенностям робот оказывается безопасным при его работе совместно с человеком.

1. Обзор алгоритмов планирования траектории для биопечати

Проблема планирования траектории роботической биопечати на сложных поверхностях привлекает внимание многих исследователей. Например, алгоритм, представленный G. M. Fortunato в исследовании [8], разработан для среды MATLAB® и платформы IMAGObot на основе робота MOVEO с пятью степенями подвижности от BCN3D. На основании CAD-модели поверхности с дефектом генерируется один слой 2D-траектории. Он проецируется на полигональную поверхность с дефектом, после

чего задаются число и толщина слоев. Данный алгоритм был проверен с помощью ряда испытаний по биопечати *in situ* на различных подложках и модели кости. Главными недостатками этого алгоритма являются искажение проекции траектории на криволинейной поверхности и его привязанность к конкретной среде и конкретному роботу.

Алгоритм, описанный в статье [9], основан на наложении прерывистой сетки на облако точек модели дефекта. Алгоритм планирования траектории проверялся в эксперименте по печати *in situ* на свинье, имеющей повреждение кожи на ноге.

Кроме того, в работе [10] упоминается о роботизированной платформе BioAssemblyBot от Advanced Solutions с шестью степенями подвижности, которая способна выполнять печать на криволинейных поверхностях, но публикации с конкретными данными, иллюстрирующими применение данной платформы, отсутствуют.

Авторы исследования [11] сообщают о разработке роботизированной платформы для криволинейной биопечати *in situ* с фотополимеризацией. При экспериментальной проверке использовалась пластиковая модель крысы, имеющей дефект кожи на спине, однако описание алгоритма планирования траектории в работе не представлено.

Стоит отметить, что проблема планирования криволинейной траектории инструмента робота довольно часто встречается в медицинских приложениях [12–15], таких как аддитивное производство, механическая обработка, покраска, сварка, полировка, дозирование клея и др. Известные решения этой проблемы могут быть полезны и при осуществлении роботизированной биопечати.

2. Разработка алгоритма планирования траектории

2.1. Математическое описание поверхности

Входными данными разработанного в данном исследовании алгоритма для биопечати *in situ* с помощью робота являются описание поверхности с дефектом и контур области печати, который на данном этапе пока задается оператором вручную, а также параметры желаемого процесса биопечати.

Для получения цифровой информации о поверхности дефекта используется 3D-сканер. Обычно применяют бесконтактные активные

3D-сканеры, основанные на принципе триангуляции или структурированного света. Основным требованием к такому сканеру является создание непрерывной полигональной модели поверхности дефекта (STL-модели).

Алгоритм реализуется в составе программного обеспечения (ПО) генерации траектории, которое позволяет загружать описания поверхностей с дефектами в виде STL-моделей, а также генерировать контур области печати. При печати на заранее известной поверхности с дефектом ее STL-модель загружается в ПО генерации траектории в виде STL-файла. При печати на неизвестной поверхности, например, коже пациента, сначала выполняется 3D-сканирование интересующей области, и полученный в результате сканирования STL-файл также загружается в ПО генерации траектории.

Информация о поверхности, полученная в результате сканирования, представляется в формате STL в виде трехмерной модели этой поверхности. Эта модель содержит сведения о плоскостях, касательных к рассматриваемой поверхности в различных заданных ее точках, и о нормалях к этим плоскостям в тех же точках. Информация о нормалях необходима для вычисления углов ориентации рабочего органа робота при генерации траектории.

Описание модели поверхности M представляет собой описание множества треугольников T :

$$M = \{T_1, T_2, \dots, T_i, \dots, T_k\},$$

где k — число треугольников, определяющих модель поверхности. При этом треугольник T задает плоскость, касательную к поверхности в заданной точке. Каждый треугольник определяется тремя точками, находящимися в его вершинах. Например, для произвольного i -го треугольника имеем $T_i = \{P_{i1}, P_{i2}, P_{i3}\}$, и каждая точка этого треугольника характеризуется координатами в трехмерной декартовой системе координат XYZ . Таким образом, $P_{ij} = \{x_{ji}, y_{ji}, z_{ji}\}$, $j = 1, 2, 3$. Три точки треугольника задают плоскость, по отношению к которой рассматривается вектор нормали $\vec{n}_i = \{n_{A_i}, n_{B_i}, n_{C_i}\}$, где $n_{A_i}, n_{B_i}, n_{C_i}$ — проекции i -го вектора нормали на оси X, Y и Z соответственно той же системы координат, в которой задаются координаты точек треугольников. В результате образуется описание $N_i = \{\vec{n}_1, \vec{n}_2, \dots, \vec{n}_k\}$ множества нормалей к плоскостям, касательным в заданных точках к по-

верхности, вдоль которой необходимо построить траекторию движения рабочего органа робота для выполнения биопечати.

Для упрощения алгоритма генерации траектории введены следующие ограничения:

1) модель поверхности описана в базовой системе координат робота. Данное ограничение позволяет задавать координаты команд перемещения робота сразу в базовой системе его координат;

2) ортографическая проекция треугольников модели поверхности на плоскость XU является планарным графом, все внутренние области которого являются треугольниками.

Последнее ограничение обеспечивает то, что ортографическая проекция траектории вдоль оси Z на поверхность печати, представленная такой моделью поверхности, вычисляется однозначно и существует однозначное соответствие между моделью поверхности и ее проекцией на плоскость XU . Для уменьшения сложности алгоритма контур, ограничивающий поверхность дефекта, задается на проекции поверхности модели, в плоскости XU .

Для локализации места дефекта на модели поверхности задается контур

$$K = \{P_{k1}, P_{k2}, \dots, P_{ki}, \dots, P_{km}\},$$

где m — число точек контура, $P_{ki} = \{x_{ki}, y_{ki}, z_{ki}\}$ — i -я точка контура, характеризующаяся координатами в трехмерной декартовой системе координат XYZ . Контур S ограничивает область построения траектории по координатам x и y . ПО генерации траектории предоставляет возможность ввода координат точек контура с помощью графического интерфейса пользователя.

2.2. Предварительная обработка отсканированной поверхности

Отсканированная модель поверхности с дефектом несколько искажена, так как 3D-сканер обладает погрешностями измерений. Поэтому требуется предварительная обработка данных об этой поверхности. Для снижения негативного влияния помех предлагается применение фильтра, соответствующего алгоритму скользящего среднего. В данном случае скользящее среднее — частный случай математической операции свертки. Сначала выбирается размер окна. Окно — это матрица с заданной размерностью, при движении которой по массиву

данных вычисляется среднее арифметическое входящих в эту матрицу элементов. Вычисленное значение присваивается соответствующему по индексу значению в массиве отфильтрованных значений, содержащем такое же число элементов, что и исходный массив. При этом возникает проблема: чем больше размер окна, тем отфильтрованная поверхность будет более гладкая. Однако, если будет выбрано слишком большое окно, при фильтрации часть полезной информации о фактической форме поверхности потеряется. Следовательно, важно выбрать наилучший размер окна. Предполагается, что размер окна зависит от характеристик сканера.

В работе был реализован алгоритм прохождения окном двумерного массива. Пусть массив данных размера $h \times g$ представлен в следующем виде:

$$F = \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1g} \\ f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2g} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_{h1} & \dots & \dots & f_{hg} \end{pmatrix}.$$

Результирующий массив, полученный в результате фильтрации, можно представить следующим образом:

$$R = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1g} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2g} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{h1} & \dots & \dots & a_{hg} \end{pmatrix}.$$

Тогда элементы результирующего массива рассчитываются по формулам:

$$a_{ij} = \frac{1}{w^2} \sum_{m=i+\frac{w-1}{2}}^{m=i+\frac{w-1}{2}} \sum_{n=j+\frac{w-1}{2}}^{n=j+\frac{w-1}{2}} f_{mn},$$

где $i = \frac{w-1}{2}, \frac{w-1}{2} + 1, \dots, h - \frac{w-1}{2} - 1, h - \frac{w-1}{2}$,
 $j = \frac{w-1}{2}, \frac{w-1}{2} + 1, \dots, g - \frac{w-1}{2} - 1, g - \frac{w-1}{2}$ — индексы вычисляемого элемента массива отфильтрованных значений.

Ограничения для i и j введены для того, чтобы окно было полностью заполнено значениями исходного массива. Размер окна w выбирается всегда нечетным, чтобы индекс элемента был целым числом.

Также из приведенной выше формулы следует, что границы результирующего массива шириной в $\frac{w-1}{2}$ остаются незаполненными. По-

этому вместо массива R предлагается использовать массив S размером $[h - (w - 1) \times [g - (w - 1)]:$

$$S = \begin{pmatrix} a_{\frac{w-1}{2}, \frac{w-1}{2}} & a_{\frac{w-1}{2}, \frac{w-1}{2}+1} & \dots & a_{\frac{w-1}{2}, g - \frac{w-1}{2}} \\ a_{\frac{w-1}{2}+1, \frac{w-1}{2}} & a_{\frac{w-1}{2}+1, \frac{w-1}{2}+1} & \dots & a_{\frac{w-1}{2}+1, g - \frac{w-1}{2}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{h-(w-1), \frac{w-1}{2}} & \dots & \dots & a_{h-(w-1), g - \frac{w-1}{2}} \end{pmatrix}.$$

В качестве входных данных алгоритма используется массив данных точек. Фильтрация применялась только к координате z . Пример использования алгоритма фильтрации на заданном массиве точек с окном фильтрации $w = 9$ представлен на рис. 2 (см. вторую сторону обложки).

Можно заметить, что предварительная обработка необходима, и в результате применения фильтрации получено описание гладкой поверхности, более точно соответствующее форме реальной поверхности и пригодной для построения траектории движения сопла рабочего органа робота, выполняющего биопечать.

2.3. Генерация траектории движения рабочего органа при биопечати

После обработки поверхности происходит генерация траектории, которую можно представить как совокупность слоев. Слой — это отрезки параллельных линий, ограниченных в плоскости XU областью контура C . Каждая две соседние параллельные линии находятся на расстоянии шага решетки h (рис. 3, см. вторую сторону обложки). Сначала проводится генерация плоских слоев траектории в плоскости XU , затем выполняется ортогональное проецирование плоской траектории на поверхность печати вдоль оси oZ . Генерация слоев происходит циклически, причем направление параллельных линий траектории меняется на 90° в каждом следующем слое. Например, если в первом слое параллельные линии расположены вдоль оси X , то в следующем они будут располагаться вдоль оси Y . Такой подход позволяет получить заполнение в виде прямоугольной решетки. Угол, на который происходит поворот параллельных линий, устанавливается в программе генерации траектории.

Первый этап генерации слоя траектории — заполнение параллельными отрезками прямых линий области, контур которой задан оператором (рис. 3, см. вторую сторону обложки).

На втором этапе проводится разбиение сгенерированной траектории на малые отрезки. Данный этап требуется для того, чтобы криволинейную траекторию можно было передать в виде совокупности линейных перемещений робота. Чем меньше длина отрезков, тем точнее траектория будет повторять поверхность дефекта. При этом робот также имеет ограничение на минимальное расстояние перемещения. Поэтому длина отрезка задается исходя из кривизны поверхности дефекта и обычно принимается равной 0,5...2 мм.

На третьем этапе вычисляются координаты z точек траектории и осуществляется ортогональное проецирование вдоль оси z сгенерированной 2D-траектории на поверхность с дефектом, представленную моделью M . На плоскости XU проекция траектории движения сопла рабочего органа робота представляет собой совокупность точек, а проекция поверхности — совокупность треугольников. Если область поверхности дефекта больше по размеру, чем область траектории в плоскости XU , то для каждой точки траектории P' можно найти соответствующий ей треугольник модели и вычислить ее проекцию P на данный треугольник. Для примера рассмотрим вычисление проекции для точки траектории $P'(P_x, P_y, 0)$, которой соответствует треугольник T с вершинами $P_{11}P_{12}P_{13}$ (рис. 4, z , см. третью сторону обложки). Сначала находится проекция треугольника $P'_{11}P'_{12}P'_{13}$ на плоскость XU , для этого координата z каждой вершины принимается равной 0. Для нахождения принадлежности точки P' проекции треугольника T применяется метод, названный векторным методом (рис. 4, $в$, см. третью сторону обложки), суть которого заключается в выполнении следующих действий:

1) любая вершина треугольника, например, вершина P'_{11} , помещается в точку с координатами $(0; 0)$;

2) две стороны, выходящие из этой вершины, представляются как векторы. На рис. 4, $в$ (см. третью сторону обложки) ими являются векторы \vec{b} и \vec{c} .

Система условий нахождения точки P' между векторами \vec{b} и \vec{c} выглядит следующим образом:

$$\vec{p} = L\vec{b} + M\vec{c},$$

где L и M — координаты точки P' в системе координат с началом в точке P_{11} и осями \vec{b} и \vec{c} . При этом выполняются условия

$$0 \leq L \leq 1, 0 \leq M \leq 1, L + M \leq 1.$$

Координаты точки P' вычисляются по следующим формулам, в которых переменные с индексами — координаты x или y указанного вектора:

$$M = (p_x b_y - b_x p_y) / (c_x b_y - b_x c_y);$$

$$L = (p_x - M c_x) / b_x.$$

Таким образом, для каждой точки траектории P' сначала находится проекция на плоскость XU треугольника T , характеризующего поверхность модели, определяется принадлежность точки P' проекции треугольника T , а затем вычисляется ее проекция P на треугольник T . Для вычисления координаты z точки P применяется общее уравнение плоскости треугольника T . Так как для треугольника известна его нормаль \vec{n} , то коэффициенты общего уравнения плоскости можно вычислить, используя координаты одной из его вершин:

$$k_1 = n_A, k_2 = n_B, k_3 = n_C,$$

$$k_4 = -(k_1 P_{11x} + k_2 P_{11y} + k_3 P_{11z}),$$

где k_1, k_2, k_3, k_4 — коэффициенты общего уравнения плоскости; $P_{11x}, P_{11y}, P_{11z}$ — координаты точки P_{11} в декартовой системе координат XYZ ; n_A, n_B, n_C — координаты вектора нормали \vec{n} , соответствующего треугольнику T . Координата z точки P вычисляется по формуле

$$P_z = \frac{-k_4 - k_1 P_x - k_2 P_y}{k_3},$$

где P_x, P_y, P_z — координаты точки P в декартовой системе координат XYZ .

Четвертый этап — вычисление углов ориентации рабочего органа для формирования команд движения робота. В случае использования робота *KUKA* углы ориентации рабочего органа задаются углами A, B, C трех последовательных поворотов относительно осей Z, Y и X соответственно (рис. 4, a , см. третью сторону обложки).

Для построения управляющей программы робота вводится подвижная система координат, начало которой совпадает с желаемой точкой траектории. Ее особенность состоит в том, что ось X располагается по направлению движения рабочего органа, ось Z — по нормали к поверхности движения, а ось Y образует правую декартову систему координат. В каждой точке желаемой траектории движения сопла рабочего органа вычисляются векторы $\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z}$,

показанные на рис. 4, в (см. третью сторону обложки).

Векторы $\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z}$ вычисляются по следующей формулам:

$$\vec{X} = \begin{pmatrix} x_x \\ x_y \\ x_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{2x} - m_{1x} \\ m_{2y} - m_{1y} \\ m_{2z} - m_{1z} \end{pmatrix};$$

$$\vec{Z} = (z_x; z_y; z_z)^T = \vec{n};$$

$$\vec{Y} = (y_x; y_y; y_z)^T = [\vec{Z} \times \vec{X}];$$

$$\vec{Z} = (z_x; z_y; z_z)^T = \vec{n}; \quad \vec{Y} = (y_x; y_y; y_z)^T; \quad [\vec{Z} \times \vec{X}],$$

где $\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z}$ — векторы, соответствующие ортам системы координат рабочего органа в точке траектории; \vec{n} — нормаль к поверхности; m_1 и m_2 — соседние точки траектории. После расчета векторы нормируются с помощью формулы

$$\vec{V}_n = \begin{pmatrix} \frac{v_x}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}} \\ \frac{v_y}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}} \\ \frac{v_z}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}} \end{pmatrix},$$

где \vec{V}_n — нормированный вектор; v_x, v_y, v_z — компоненты ненормированного вектора.

Робот осуществляет движение по траектории в системе координат модели. Каждой точке траектории соответствует однородная матрица преобразований координат M из начала системы координат модели в подвижную систему координат, связанную с точкой траектории печати. Углы ориентации рабочего органа A, B, C определяются на основании матрицы M по формулам

$$\begin{cases} B = \arcsin x_z, \\ C = \arcsin \frac{y_z}{\cos B}, \\ A = \arcsin \frac{x_y}{\cos B}. \end{cases}$$

Результатом работы алгоритма планирования траектории является массив координат ее точек в системе координат модели поверхности и углов ориентации рабочего органа робота, которые за-

писываются в txt-файл. Этот файл пересылается в устройство управления коллаборативного робота KUKA, и его данные используются в программных командах движения LIN со сглаживанием. При выполнении программной команды LIN робот с заданной скоростью перемещает рабочий орган по прямолинейной траектории от исходной позиции до позиции, указанной в команде LIN. Скорость движения задается оператором при программировании робота.

3. Экспериментальное исследование биопечати in situ

Для подтверждения работоспособности предлагаемого алгоритма проведено экспериментальное исследование печати с помощью робота. В роли биопринтера выступал коллаборативный робот KUKA LBR R820 с семью степенями подвижности, оснащенный специальным дозатором в качестве рабочего органа. Одновременно с этим на 3D-принтере из PLA были напечатаны два образца поверхностей печати с различной кривизной (рис. 5, см. третью сторону обложки). Образец № 1 — это плоская поверхность с прямоугольным контуром дефекта. Образец № 2 имеет криволинейную поверхность с контуром дефекта в виде окружности.

При выполнении эксперимента 3D-модель поверхности загружалась в программу. Оператор задавал область печати, указывая точки ее контура, и происходила генерация двух ортогональных слоев траектории. Затем траектория считывалась специальной программой и пересылалась на управляющее устройство робота. Для того чтобы робот мог печатать в координатах образца, он устанавливался в специальную точку на базе, и затем база калибровалась. Шаг между линиями траектории в программе был задан равным 1,6 мм. После печати делалась фотография решетки с помощью бинокулярного микроскопа и измерялось значение шага. Измеренное значение шага печати на образце № 1 составило $1,63 \pm 0,1$ мм, на образце № 2 — $1,65 \pm 0,13$ мм. Результаты эксперимента для образцов № 1 и № 2 представлены на рис. 5 (см. третью сторону обложки).

Заключение

Теоретическое и экспериментальное исследование подтвердили способность разработанного алгоритма планировать желаемую

траекторию движения рабочего органа робота относительно поверхностей с различными кривизной и контурами дефекта. Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что при применении робота и разработанного алгоритма напечатанная траектория соответствует желаемой траектории. Во всех исследованных случаях решетка из нанесенного биоматериала получилась однородной, а размер ячеек решетки является одинаковым.

Необходима предварительная обработка данных, получаемых от 3D-сканеров. Для ее выполнения предлагается использовать описанный в статье алгоритм скользящего среднего. Установлено, что в процессе печати сопло сохраняет требуемую ориентацию и в каждой точке траектории остается перпендикулярным обрабатываемой поверхности тела человека, не останавливается в углах траектории, а проходит их непрерывно. Отклонение шага, измеренное в напечатанных решетках на двух образцах, не превышает 130 мкм, что является допустимым, судя по результатам исследований, посвященных биопечати.

При подготовке к биопечати целесообразно предварительно провести компьютерное моделирование движений сопла рабочего органа робота, спланированных с применением предложенного алгоритма. Результаты моделирования должны показать оператору робота, врачу безопасность и качество выполняемой операции.

Необходимо отметить, что область применения разработанного алгоритма имеет ограничение. Оно вызвано тем, что невозможно заполнять дефекты, имеющие сложную внутреннюю форму, так как это потребовало бы генерации уникальных слоев, а в данном случае слои повторяют друг друга и лишь смещены по оси Z на высоту слоя.

Список литературы

1. Буйнов М. А., Воротников А. А., Климов Д. Д., Малышев И. Ю., Миронов В. А., Парфенов В. А., Перейра Д. А. С., Подураев Ю. В., Хесуани Ю. Д. Роботические технологии в медицине и биопринтинге: состояние проблемы и современные тенденции // Вестник МГТУ "Станкин". 2017. № 1 (40).
2. Eycercioglu O., Aladag M. Non-Planar Toolpath For Large Scale Additive Manufacturing // Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind. 2021. Vol. 5, N. 3. P. 477–487.
3. Lu B. H., Lan H. B., Liu H. Z. Additive manufacturing frontier: 3D printing electronics // Opto-Electron Adv. 2018. N. 1. P. 170004.
4. Ezair B., Fuhrmann S., Elber G. Volumetric covering print-paths for additive manufacturing of 3D models // Comput. Aided Des. 2018. N. 100. P. 1–13.
5. Ahlers Daniel. 3D Printing of Nonplanar Layers for Smooth Surface Generation // Proc. of the 2019 IEEE 15th Internat. Conf. on Automation Science and Engineering (CASE). August 2019. Vancouver, BC, Canada. P. 22–26.
6. Alkadi F., Lee K. Ch., Choi J. W. Conformal Additive Manufacturing using a Direct-Print Process // Additive Manufacturing. 2020. Vol. 32. P. 100975.
7. Подураев Ю. В. Подход и опыт проектирования медицинской коллаборативной робототехники для лазерной хирургии и биопринтинга // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18, № 11. С. 749–752.
8. Fortunato G. M., Rossi G., Bonatti A. F., De Acutis A., Mendoza-Buenrostro Ch., Vozzi G., De Maria C. Robotic platform and path planning algorithm for in situ Bioprinting // Bioprinting. 2021. Vol. 22. P. e00139.
9. Lian Q., Li X., Li D., Gu H., Bian W., He X. Path planning method based on discontinuous grid partition algorithm of point cloud for in situ printing // Rapid Prototyping Journal. 2019. Vol. 25. P. 602–613.
10. Advanced solutions. URL: <https://www.advancedsolutions.com/bioassemblybot-400>.
11. Li X., Lian Q., Li D., Xin H., Jia S. Development of a Robotic Arm Based Hydrogel Additive Manufacturing System for In-Situ Printing // Appl. Sci. 2017. N. 7. P. 73.
12. Shembekar A. V., Yoon Y. J., Kanyuck A., Gupta S. K. Generating Robot Trajectories for Conformal 3D Printing Using Non-Planar Layers // Journal of Computing and Information Science in Engineering. 2019. Vol. 3. P. 1–13.
13. Chen H., Fuhlbrigg T., Li X. A review of CAD-based robot path planning for spray painting // Industrial Robot: An International Journal, 2009. Vol. 36, Iss. 1. P. 45–50
14. Atkar P. N., Greenfield A., Conner D. C., Choset H., Rizzi A. A. Uniform Coverage of Automotive Surface Patches // The International Journal of Robotics Research. 2005. Vol. 24, N. 11. P. 883–898.
15. Ye X., Luo L., Hou L., Duan Y., Wu Y. Laser Ablation Manipulator Coverage Path Planning Method Based on an Improved Ant Colony Algorithm // Appl. Sci. 2020. N. 10. P. 8641.

Planning the Trajectory of a Collaborative Robot for Bioprinting

A. A. Kartseva, kartseva.2013@mail.ru, A. A. Levin, heis97@mail.ru, A. A. Vorotnikov, aavorotnikov90@gmail.com, Yu. V. Poduraev, y.poduraev@stankin.ru, Yu. V. Ilyukhin, ilyv_178@mail.ru, Moscow State University of Technology "STANKIN", Moscow, 127055, Russian Federation

Corresponding author: Ilyukhin Yury V., Dr. of Sc. in Tech., Professor, Moscow State Technical University "STANKIN", Moscow, 127055, Russian Federation, e-mail: ilyv_178@mail.ru

Accepted on August 5, 2022

Abstract

In situ bioprinting is an automated process of direct application of biomaterials to a defective area of living tissue during a medical operation. To perform such bioprinting, it is advisable to use robotic manipulators with five or more degrees of mobility, which can give the end effector the desired orientation. The actual task is to plan the trajectory of the robot for

in situ bioprinting on a real curved surface. A brief analysis of solutions allowing to plan the trajectory of bioprinting is carried out. A mathematical description of the surface used as a defect model is given, which is necessary for constructing the trajectory. Additional restrictions were introduced in order to reduce the complexity of the scheduling algorithm. To localize a defect on a curved surface, information about a given contour covering this defect is used. An algorithm has been developed for forming a flat trajectory of the robot's end effector to fill in the defect, followed by projecting it onto a real curved surface. The importance of preprocessing data on the scanned surface using the developed filtering algorithm based on the moving average method is noted. The trajectory of the robot's end effector is formed by layers first in the plane. It is then projected onto a curved surface. For each point of the trajectory, such a homogeneous transformation matrix is calculated so that the robot's end effector is perpendicular to the curved surface. The calculation of the orientation angles of the working body of the KUKA robot is presented on the basis of data obtained from a homogeneous transformation matrix. The operability of the proposed trajectory planning algorithm for *in situ* bioprinting is confirmed by the results of computer modeling using the software developed by the authors and the results of an experimental study of bioprinting performed by the KUKA LBR R820 collaborative robot on three samples with different surface curvature and defect contour.

Keywords: *in situ* bioprinting, robot trajectory planning, curved trajectory, surface pretreatment, defect filling, step effect, orientation of the working organ

Acknowledgements: The work was carried out with the support of the Ministry of Education and Science of Russia within the framework of the state task (FSFS-2021-0004).

For citation:

Kartseva A. A., Levin A. A., Vorotnikov A. A., Poduraev Yu. V., Ilyukhin Yu. V. Planning the Trajectory of a Collaborative Robot for Bioprinting, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 12, pp. 643–650.

DOI: 10.17587/mau.23.643-650

References

1. **Buinov M. A., Vorotnikov A. A., Klimov D. D., Malyshv I. Yu., Mironov V. A., Parfenov V. A., Pereira D. A. S., Poduraev Yu. V., Khesuani Yu. D.** Robotic technologies in medicine and bioprinting: The state of the problem and current trends, *Vestn. MGTU Stankin*, 2017, vol. 40, no. 1 (in Russian).
2. **Eyercioglu O., Aladag M.** Non-Planar Toolpath For Large Scale Additive Manufacturing, *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 2021, vol. 5, no. 3, pp. 477–487.
3. **Lu B. H., Lan H. B., Liu H. Z.** Additive manufacturing frontier: 3D printing electronics, *Opto-Electron Adv.*, 2018, no. 1, pp. 170004.
4. **Ezair B., Fuhrmann S., Elber G.** Volumetric covering print-paths for additive manufacturing of 3D models, *Comput. Aided Des.*, 2018, no. 100, pp. 1–13.
5. **Ahlers D.** 3D Printing of Nonplanar Layers for Smooth Surface Generation, *In Proceedings of the 2019 IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, August 2019, Vancouver, BC, Canada, pp. 22–26.
6. **Alkadi F., Lee K. Ch., Choi J. W.** Conformal Additive Manufacturing using a Direct-Print Process, *Additive Manufacturing*, 2020, vol. 32, p. 100975.
7. **Poduraev Yu. V.** Approach and Experience of Designing Medical Collaborative Robotics for Laser Surgery and Bio-Printing, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 11, pp. 749–752 (in Russian).
8. **Fortunato G. M., Rossi G., Bonatti A. F., De Acutis A., Mendoza-Buenrostro Ch., Vozzi G., De Maria C.** Robotic platform and path planning algorithm for *in situ* Bioprinting, *Bioprinting*, 2021, vol. 22, pp. e00139.
9. **Lian Q., Li X., Li D., Gu H., Bian W., He X.** Path planning method based on discontinuous grid partition algorithm of point cloud for *in situ* printing, *Rapid Prototyping Journal*, 2019, vol. 25, pp. 602–613.
10. **Advanced solutions**, available at: <https://www.advanced-solutions.com/bioassemblybot-400>.
11. **Li X., Lian Q., Li D., Xin H., Jia S.** Development of a Robotic Arm Based Hydrogel Additive Manufacturing System for *In-Situ* Printing, *Appl. Sci.*, 2017, no. 7, pp. 73.
12. **Shembekar A. V., Yoon Y. J., Kanyuck A., Gupta S. K.** Generating Robot Trajectories for Conformal 3D Printing Using Non-Planar Layers, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2019, vol. 3, pp. 1–13.
13. **Chen H., Fuhlbrige T., Li X.** A review of CAD-based robot path planning for spray painting, *Industrial Robot: An International Journal*, 2009, vol. 36, iss. 1, pp. 45–50.
14. **Atkar P. N., Greenfield A., Conner D. C., Choset H., Rizzi A. A.** Uniform Coverage of Automotive Surface Patches, *The International Journal of Robotics Research*, 2005, vol. 24, no. 11, pp. 883–898.
15. **Ye X., Luo L., Hou L., Duan Y., Wu Y.** Laser Ablation Manipulator Coverage Path Planning Method Based on an Improved Ant Colony Algorithm, *Appl. Sci.*, 2020, no. 10, pp. 8641.