

Функционально-воксельное моделирование траектории движения инструмента при фрезеровании карманной области

А.А. Сычева¹, А.М. Плаксин¹

¹ Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук, ул. Профсоюзная, 65, Москва, 117997, Россия

Аннотация

Необходимость повышения точности производимых деталей требует как совершенствования процессов обработки заготовок, так и разработку новых и развитие уже имеющихся компьютерных моделей деталей и технологических процессов. Производство деталей сложной геометрической формы, например карманных областей, требует моделирования всех протекающих в материале при обработке физических процессов для учета их влияния на форму получаемой детали и дальнейшей корректировки управляющей программы. Метод функционально-воксельного моделирования ранее уже применялся к моделированию теплового напряжения, возникающего в процессе резания при механической обработке деталей. Разработка функционально-воксельных подходов к проектированию траектории движения инструмента позволит расширить область применения метода в технологических процессах, дополнив ранее проведенные исследования. Разработку и исследование необходимого инструмента предлагается осуществлять на примере задачи обработки карманов, предложенной в работах по моделированию теплового напряжения. Для моделирования траектории движения обрабатывающего инструмента предлагается использовать метод движения относительно направления градиента, а конкретно движение по направлению, перпендикулярному вектору наибольшей скорости изменения значений функции. Функционально-воксельное моделирование контура осуществляется посредством R-функционального пересечения нулевых отрезков, выраженных функцией локального обнуления (ФЛОБ), на положительной области. Применение метода градиентного спуска к полученной модели позволило сконструировать равномерно заполняющую контур траекторию, имитирующую движение обрабатывающего инструмента.

Ключевые слова

Функционально-воксельное моделирование, ФЛОБ, метод градиентного спуска, траектория движения инструмента, фрезерование, карманная область.

Functional-voxel Modeling of the Toolpath when Milling a Pocket Area

A.A. Sycheva¹, A.M. Plaksin¹

¹ V.A. Trapeznikov Institute of Control Science of Russian Academy of Sciences, 65 Profsoyuznaya street, Moscow, 117997, Russia

Abstract

Increasing the accuracy of manufactured details requires the improvement of workpiece machining processes. It also requires the development of new and the upgrading of existing computer models of details and technological processes. The production of details with complex geometric shapes, such as pocket areas, requires the simulation of all physical processes occurring in the material to take into account their influence on the shape of the resulting part and further adjustment of the

ГрафиКон 2022: 32-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 19-22 сентября 2022 г., Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, Рязань, Россия

EMAIL: a.a.sycheva@mail.ru (А. А. Сычева); a.m.plaksin@gmail.com (А. М. Плаксин)

ORCID: 0000-0003-3230-4271 (А. А. Сычева); 0000-0001-9390-8322 (А. М. Плаксин)



© 2022 Copyright for this paper by its authors.

Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

control program. The method of functional-voxel modeling has previously been applied to the simulation of thermal stress arising in the process of cutting during machining of details. The application of functional-voxel approaches to tool path design will extend the field of application of the method in technological processes, complementing the earlier research. The pocket area proposed in the earlier works is chosen for the development and investigation of the required tool. The method of motion relative to the gradient direction is proposed for modeling the tool path. Specifically, the motion along the direction perpendicular to the vector of the highest rate of change of function values. Functional-voxel modeling of the contour is carried out by R-function interruption of zero segments, expressed by the local zeroing function (FLOZ), on the positive area. Applying the gradient descent method to the resulting model allowed us to construct a path that uniformly fills the contour, simulating the motion of the machining tool.

Keywords

Functional voxel modeling, FLOZ, gradient descent method, toolpath, milling, pocket area.

1. Введение

Активное развитие высокоточных производств выдвигает все более жесткие требования к точности геометрии получаемых деталей, определяемой не только точностью компьютерной модели детали, но и процессом ее обработки. Возникающие в процессе обработки физические процессы, в том числе тепловые, оказывают значительное влияние на форму образуемой поверхности. Также значительная роль в создании геометрии детали отводится методу обработки, выбранному инструменту, процессу обработки и другим факторам. Необходимость обработки деталей сложной геометрической формы, например, карманных областей, требует развития имеющихся и разработки новых подходов к моделированию как самих заготовок, так и процесса их обработки. Создание карманных областей осуществляется посредством фрезерования на станках с ЧПУ. При этом актуальной является задача автоматизированного построения траектории движения обрабатывающего инструмента [1]. Также нельзя упускать необходимость моделирования протекающих при фрезеровании физических процессов для учета их влияния на точность получаемой детали.

В настоящее время активно развивается метод функционально-воксельного моделирования [2], являющийся перспективным подходом к компьютерному представлению аналитических функций. При этом функционально-воксельной моделью функции будет являться набор соразмерных ей графических образов-моделей (*М-образов*), отражающих локальные геометрические характеристики в каждой точке области функции. В рамках этого метода разрабатывается все больше инструментов для применения в самых разнообразных областях [3-6].

В проведенном ранее исследовании [7], касающегося применения функционально-воксельного метода в металлообработке для моделирования тепловых процессов, рассматривался карман сложной формы (рисунок 1).

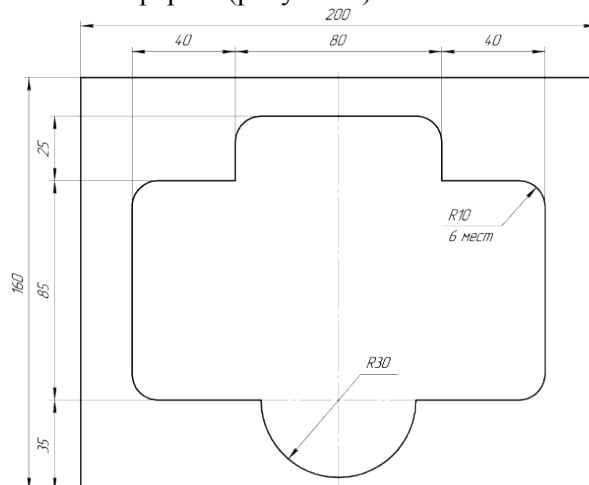


Рисунок 1 – Пример кармана сложной формы

На данном примере были показаны геометрические аспекты распространения теплового напряжения при точечном и распределенном приложении тепла на разные области контура кармана, а также последующее тепловое расширение материала (рисунок 2), промоделированные функционально-воксельным методом. Это говорит о возможностях применения функционально-воксельного метода в моделировании физических процессов, протекающих при обработке.

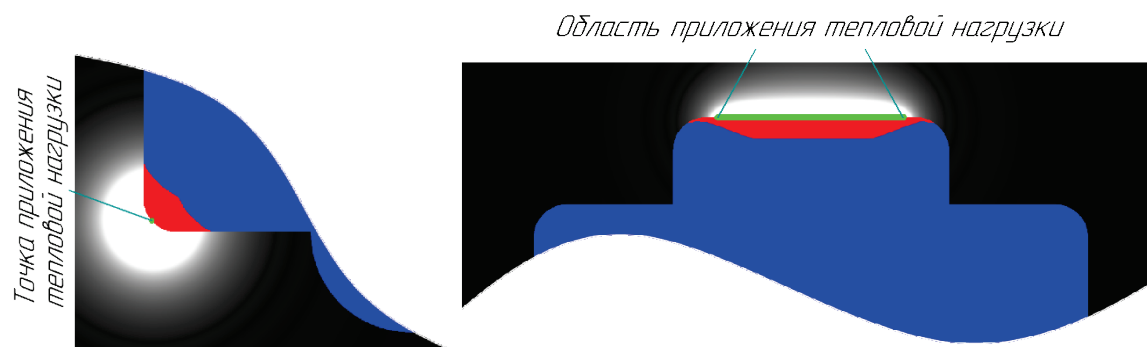


Рисунок 2 – Пример точечного и распределенного теплового воздействия на контур кармана

Разработка функционально-воксельных средств моделирования траектории движения обрабатывающего инструмента позволит дополнить уже имеющийся инструментарий и расширить область применения данного метода в механообработке.

2. Инструменты функционально-воксельного метода

Для решения поставленной задачи в рамках функционально-воксельного метода возможно применить метод градиентного спуска, успешно применяющийся для решения задач поиска пути [3, 6]. Только в отличие от движения по вектору направления максимального убывания локальной функции траекторию необходимо конструировать в перпендикулярном к нему направлении. Возникает необходимость разработки подходящей функционально-воксельной модели фрезеруемого кармана, а именно модели с гладкой поверхностью внутри области контура, достаточно высокой пиковой точкой внутри его области и плавным спуском к границам.

Построить функционально-воксельную модель сложного контура возможно различными способами.

Функциональное описание приведенного кармана, да и любого сложного контура, является трудоемкой задачей, требующей хорошей математической подготовки.

Также возможно построение сложного контура посредством его R-функционального моделирования [8] из отдельных составляющих. Так, функционально-воксельное моделирование предложенного в работе [7] кармана осуществлялось разбиением его на простые контуры (7 окружностей и 2 прямоугольных контура) с последующим их соединением посредством R-функциональных операций. На рисунке 3 представлен М-образ полученной функционально-воксельной модели кармана.

На образованной поверхности невооруженным глазом наблюдаются контуры фигур, из которых составлялась необходимая форма кармана. При этом не образуется общей поверхности всего кармана, а каждая составляющая фигура отделена от остальных. Подобная форма образованной поверхности не позволит применить имеющиеся функционально-воксельные средства построения траекторий движения, что усложняет решение поставленной задачи. R-функциональное описание необходимого контура иными способами разбиения на подконтуры возможно позволит получить необходимую форму поверхности, однако также значительно математически усложнит его моделирование.

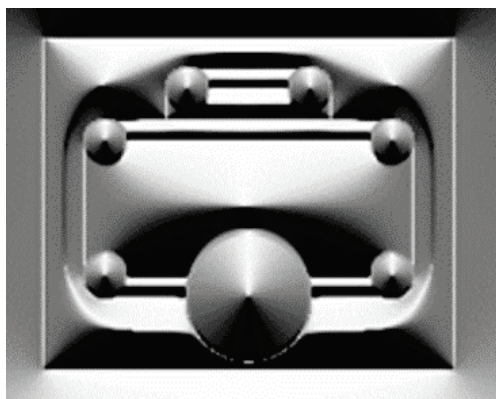


Рисунок 3 – Образ функционально-воксельной модели кармана, полученного с помощью RFM

Перспективным инструментом функционально-воксельного моделирования контуров является функция локального обнуления – ФЛОБ [9]. ФЛОБ представляет собой выраженный алгебраической квадратичной функцией нулевой отрезок на положительной области функции. R-функциональное пересечение последовательности ФЛОБов создаст положительную область с вычерченным на ней нулевым контуром. При этом образуемая поверхность может иметь как более плавные переходы локальных характеристик (в случае квадратичного пересечения), так переходы, выражающиеся в последовательности экстремальных точек (в случае линейного пересечения). Посредством ФЛОБа возможно моделирование как параметрических кривых, так и ломаных линий и иных контуров [10]. При этом в случае замкнутых форм возможно определение отрицательной области полученных моделей, что позволяет применять к ним R-функциональные операции. Таким образом возможно построение сложных невыпуклых контуров, в том числе с вырезами во внутренней области (рисунок 4).

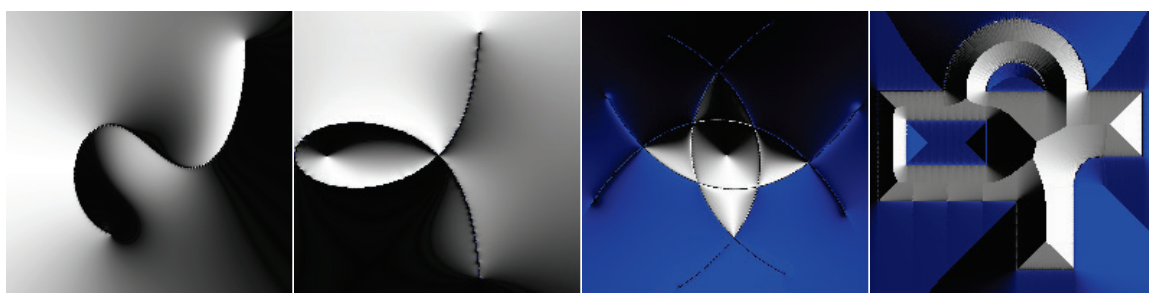


Рисунок 4 – Примеры ФЛОБ-конструированных контуров

3. Построение ФВ-модели контура и траектории движения инструмента

Построение ФЛОБ-конструируемой модели кармана будет осуществляться посредством параметризации 7 окружностей и 7 отрезков. Гладкость образуемой поверхности и время, затраченное на построение модели, будет зависеть от шага дискретизации элементов. В результате получаем функционально-воксельные модели контура в случае линейной (рисунок 5 а) и квадратичной (рисунок 5 б) реализации операции пересечения ФЛОБов.

Помимо нулевого контура моделируемого кармана во внутренней области возможно наблюдать образуемую поверхность всего контура. При этом в квадратичном случае наблюдается пиковая точка поверхности контура, а в линейном – последовательность экстремальных точек. Форма этой последовательности с одной стороны приближена к форме линейного скелета фигуры, но с другой может смещаться в зависимости от последовательности построения отдельных сегментов контура.

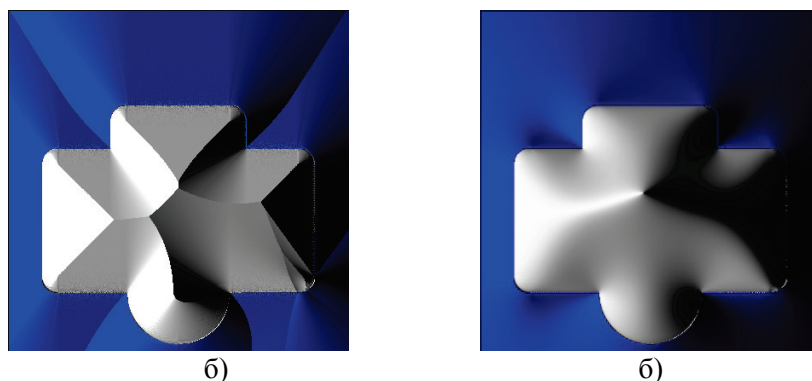


Рисунок 5 – Примеры ФЛОБ-конструированных контуров

Полученная геометрия поверхности не создает необходимого для применения метода градиентного спуска равномерного плавного перехода к самым границам контура, в связи с чем полученная траектория не равномерна, а работа алгоритма завершается раньше достижения границ (рисунок 6).

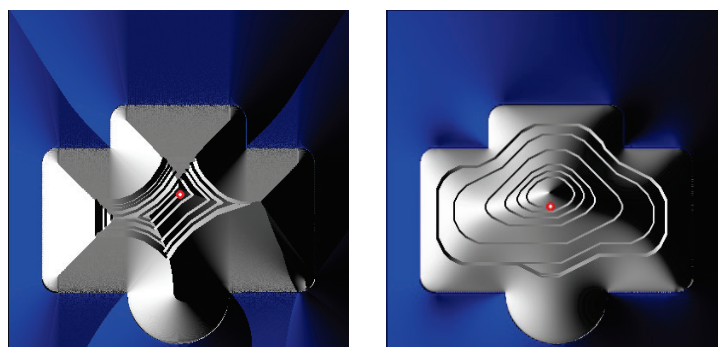


Рисунок 6 – Визуализация проблемы неполного заполнения моделируемого контура

Для решения данной проблемы возможно разбиение моделируемого контура на более простые составные части и построение отдельных траекторий движения инструмента для каждой из них. При этом нет необходимости разбивать контур на элементарные составляющие, как в случае с R-функциональным моделированием контура. Достаточно разбить контур на несколько выпуклых замкнутых областей, ФЛОБ-конструирование которых осуществляется гораздо проще, чем функциональное описание или R-функциональное моделирование.

В данном случае целесообразно разбиение исходного контура на 3 составляющие – нижнюю область полукруга, центральную прямоугольную область с 4 закругленными углами и верхнюю прямоугольную область с 2 закругленными углами (рисунок 7).

Причем, для создания геометрии, подходящей для применения алгоритма градиентного спуска, в зависимости от формы контура необходимо применять квадратичное или линейное пересечение ФЛОБов.

R-функциональное объединение полученных фрагментов создает искомый контур. При этом внутренняя его область разбита на три замкнутых контура, поверхность которых создает необходимый постепенный подъем. Также для имитации работы системы автоматизированного построения траектории движения фрезы необходимо отступить от краев контура определенное расстояние – диаметр используемого инструмента (рисунок 8).

Построение искомой траектории будет осуществляться отдельно внутри каждого из составляющих контура.

Управление получаемой траекторией осуществляется посредством выбора точки начала градиентного спуска и шага работы алгоритма. Шаг влияет на гладкость образуемой траектории а также на близость друг к другу витков образуемой спирали. При выборе исходной точки и шага необходимо учитывать уклон поверхности контура, а также его форму.



Рисунок 7 – Фрагменты моделируемого контура

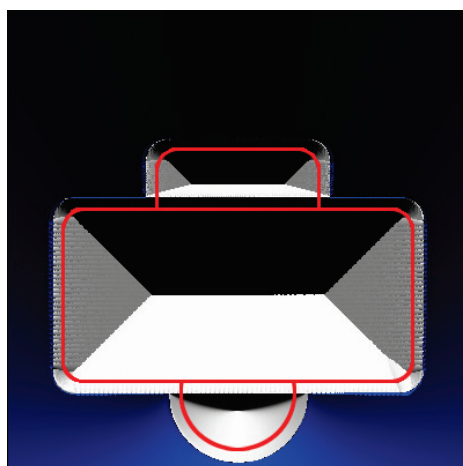


Рисунок 8 – Результирующая модель кармана

На рисунке 9 представлен пример построения траектории движения обрабатывающего инструмента для предложенного контура.

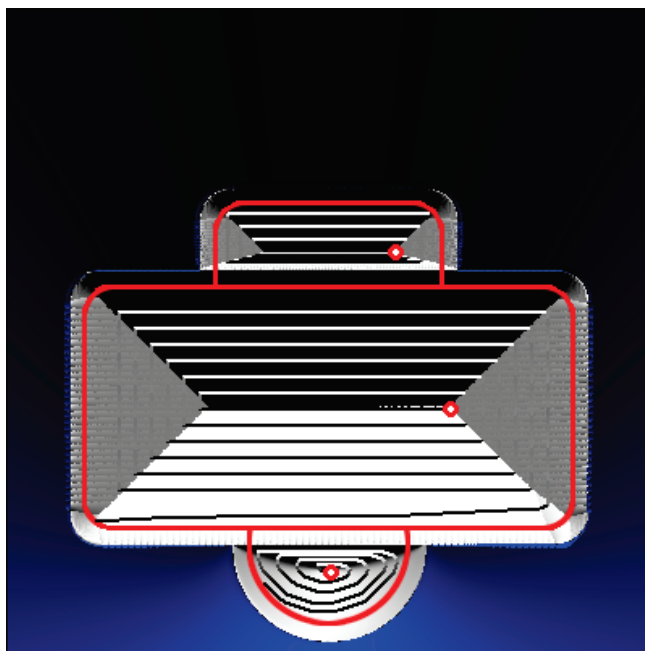


Рисунок 9 – Построение траектории движения обрабатывающего инструмента

4. Заключение

Приведенное исследование наглядно показывает, что метод функционально-воксельного моделирования возможно применять для решения задачи автоматизированного построения траектории движения инструмента при фрезеровании. Дальнейшее развитие этого направления позволит комбинировать результаты исследования с подходами к моделированию физических величин, расширяя таким образом прикладную область метода.

5. Список источников

- [1] Панчук К. Л., Мясоедова Т.М., Крысова И. В. Геометрическая модель генерации семейства контурно-параллельных линий для автоматизированного расчета траектории режущего инструмента // Геометрия и графика. 2019. Т. 7, № 1. С. 3–13.
- [2] Толок А.В. Локальная компьютерная геометрия : учебное пособие. М.: Ай Пи Ар Медиа, 2022. 147 с. DOI: <https://doi.org/10.23682/120286>.
- [3] Локтев М. А. Особенности применения функционально-воксельного моделирования в задачах поиска пути с препятствиями // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2016. № 1(161). С. 45-49.
- [4] Воксельно-математическое моделирование при решении задач определения площади для поверхностей деталей / А. В. Толок, Д. А. Силантьев, Е. А. Лоторевич, С. А. Пушкарев // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2013. № 3(151). С. 29-33.
- [5] Геометрическое моделирование средств визуализации напряжения на основе функционально-воксельного метода / А. М. Плаксин, С. А. Пушкарев, А. А. Сычева, П.М. Харланова // Геометрия и графика. 2020. Т. 8. № 3. С. 36–43. DOI: 10.12737/2308-4898-2020-36-43.
- [6] Петухов П. А., Толок А. В. Исследование метода функционально-воксельного моделирования на основе средств потенциальных полей к задачам поиска пути // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019 (Москва, 17–20 июня 2019) : Сборник трудов XIII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2019, 2019 года / Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2019. С. 3173-3178. DOI 10.25728/vspu.2019.3173.
- [7] Плаксин А. М., Пушкарев С. А. Геометрическое моделирование тепловых характеристик объектов функционально-воксельным методом // Геометрия и графика. 2020. Т. 8. № 1. С. 25-32. DOI 10.12737/2308-4898-2020-25-32.
- [8] Рвачев В. Л. Теория R - функций и некоторые ее приложения. Киев: Наукова думка, 1982. 552 с.
- [9] Tolok A. V., Tolok N. B. Local R-Functional Modelling (LRFM) // 31st International Conference on Computer Graphics and Vision (Nizhny Novgorod, 21-24 September 2021): Proceedings of the 31st International Conference on Computer Graphics and Vision: CEUR Workshop Proceedings, Vol. 3027, 202. P. <http://ceur-ws.org/Vol-3027/paper64.pdf>.
- [10] Сычева А. А. Функционально-воксельное моделирование кривых Безье // Геометрия и графика. 2022. Т. 9. № 4. С. 63-72. DOI: <https://doi.org/10.12737/2308-4898-2022-9-4-63-72>.