

ПЛАНИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РУКИ МАНИПУЛЯТОРА ДЛЯ ЗАДАЧ МНОГООСЕВОЙ ПЕЧАТИ

Берсенева К.А.^{1,2}, Огородникова О.М.¹

¹*Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина, Екатеринбург;*

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

Ключевые слова: подготовка производства, аддитивные технологии, многоосевая печать промышленный робот, планирование траектории, компьютерная модель.

Аннотация. В статье рассмотрены методы планирования траекторий для руки шарнирного манипулятора, используемого в многоосевой печати деталей способом послойной наплавки. Рассмотрены методы формирования траекторий как в пространстве задач, так и в пространстве шарниров. Исследованы различные профили движения, включая полиномиальные и трапециевидные, с целью оптимизации параметров траектории для обеспечения высокой точности и плавности перемещений. Разработана компьютерная модель с соответствующим программным обеспечением, которая позволяет проводить кинематический анализ движения манипулятора, анализировать скорости и ускорения звеньев, а также визуализировать траектории.

TRAJECTORY PLANNING OF MANIPULATOR ARM MOTION FOR MULTI-AXIS PRINTING APPLICATIONS

Berseneva K.A.^{1,2}, Ogorodnikova O.M.¹

¹*Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin,
Ekaterinburg;*

²*M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch
of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg*

Keywords: computer-aided manufacturing, additive manufacturing, multi-axis printing, industrial robot, path planning, computer model.

Abstract. The paper addresses the topic of trajectory planning methods for an articulated manipulator arm, designed for use with additive multi-axis printing. The paper considers methods of trajectory generation in both task space and joint space. A variety of motion profiles, including polynomial and trapezoidal profiles, are investigated with the objective of optimizing trajectory parameters to ensure high accuracy and smoothness of movements. The developed software model facilitates the kinematic analysis of manipulator motion, the analysis of link velocities and accelerations, and the visualization of trajectories.

Аддитивные технологии быстро развиваются, эффективно преодолевая проблемы качества деталей, изготовленных способами послойной наплавки. Одновременно ведется проектирование и испытание оборудования, в том числе роботизированного [1]. Многоосевая печать с использованием роботизированных систем становится перспективным направлением благодаря своей гибкости [2] и возможности создания сложных пространственных конструкций. Одним из ключевых преимуществ применения манипуляторов для аддитивной печати

является возможность точного управления положением рабочего органа, что позволяет формировать трехмерные траектории с высокой степенью свободы пространственных движений. В отличие от традиционных методов послойной печати, которые ограничены движением в фиксированных плоскостях, многоосевая печать обеспечивает большую гибкость в управлении траекториями, что особенно важно при создании объектов со сложной геометрией и внутренними функциональными поверхностями [3].

Основной задачей при использовании роботизированных манипуляторов для аддитивной печати является разработка эффективных методов планирования траекторий. Такое планирование включает формирование траекторий в пространстве задач и пространстве шарниров, а также выбор оптимальных профилей движения для обеспечения плавности и точности перемещений [4]. В пространстве задач траектория описывается в терминах координат рабочего органа в рабочем пространстве, тогда как в пространстве шарниров траектория задается углами поворота шарниров манипулятора. Планирование в пространстве задач обеспечивает интуитивно понятное описание целевой траектории, тогда как планирование в пространстве шарниров позволяет учитывать ограничения манипулятора, связанные с его конфигурацией и динамическими характеристиками. Одной из ключевых задач при планировании траекторий является выбор профиля движения [5, 6]. В данной работе рассмотрены полиномиальные траектории, построенные на основе многочленов третьего и пятого порядка.

Анализ ограничен тремя шарнирами руки манипулятора без запястья, поскольку именно рука обеспечивает доставку рабочего органа в любую точку рабочего пространства. Для выполнения кинематического анализа трехзвенной руки манипулятора была разработана специализированная программа, позволяющая визуализировать траектории движения рабочего органа, а также анализировать скорости и ускорения звеньев манипулятора. Программа осуществляет расчет траекторий в пространстве шарниров на основе введенных пользователем параметров, таких как координаты промежуточных точек траектории, линейные скорости и моменты времени прохождения этих точек.

Результаты моделирования можно представить в виде графиков, которые иллюстрируют изменения углов поворота шарниров манипулятора ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$) в зависимости от времени. На рисунке 1 показаны зависимости углов поворота шарниров руки при движении с промежуточными положениями и скоростями рабочего органа. Анализ графиков позволяет выявить критические моменты, когда углы поворота достигают предельных значений, что может привести к возникновению нежелательных динамических эффектов, таких как резкие изменения ускорения или скорости, удары.

Созданная программа также позволяет выбирать различные профили движения, включая полиномиальные 3-го и 5-го порядков, а также трапецевидные. На рисунке 2, а можно наблюдать наличие удара в начальный и конечный момент времени для полинома 3-го порядка (красная линия) и трапецевидного профиля (фиолетовая линия), на графике ускорений. В то время как применение полинома 5-го порядка устраняет удар (синяя линия). На рисунке

2, б представлены графики положений, скоростей и ускорений для каждого из шарниров манипулятора при использовании полинома третьего порядка.

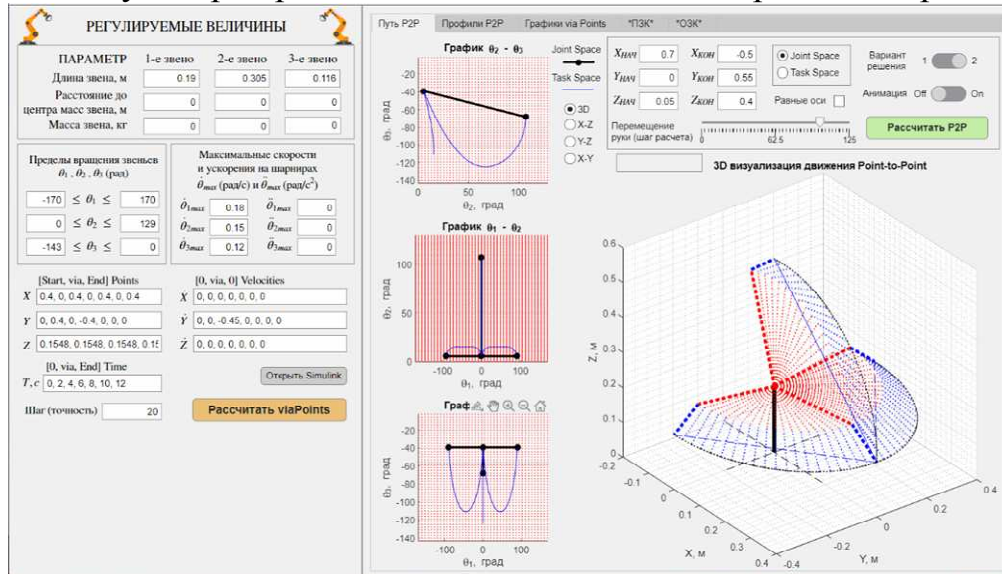
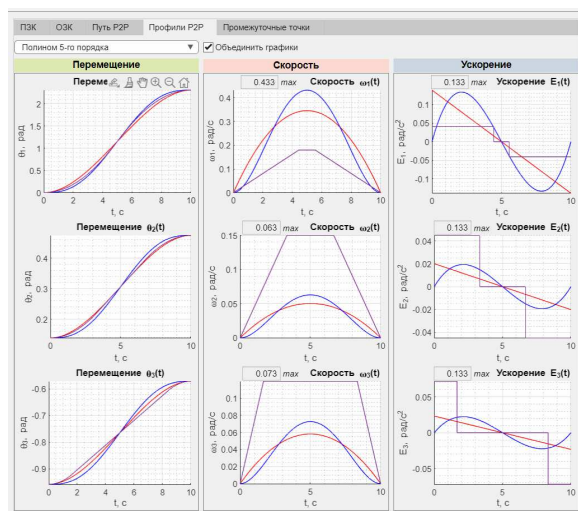
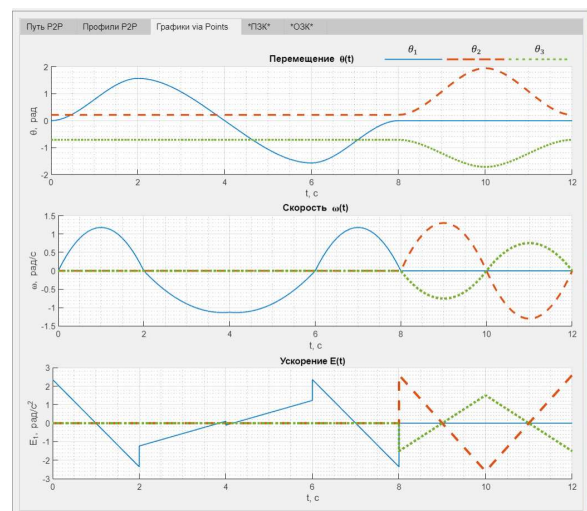


Рис. 1. Результаты моделирования для перемещения руки манипулятора с выбором промежуточных положений и скоростей рабочего органа



а



б

Рис. 2. Графики положений, скоростей и ускорений каждого из трех шарниров руки: а) для перемещения «точка-точка»; б) для перемещения с выбором промежуточных положений и скоростей рабочего органа

Из сравнения графиков следует, что использование полиномов третьего порядка обеспечивают достаточную плавность траектории, а применение трапециевидного профиля движения позволяет контролировать скорость в определенные моменты времени. Однако при использовании этих двух профилей наблюдаются ударные моменты в начальный и конечный моменты времени. Полиномы пятого и более высокого порядка устраняют указанные недостатки, обеспечивая более плавное изменение ускорения вдоль всей траектории.

Разработанная компьютерная модель позволяет визуализировать траектории и анализировать параметры движения руки манипулятора, такие как углы поворота, скорости и ускорения, помогает выявить потенциальные ограничения системы управления и оптимизировать процесс планирования

траектории для повышения точности и плавности движения, что является важным фактором при планировании траекторий для роботизированной аддитивной печати.

Список литературы

1. Огородникова О.М., Ваганов К.А., Юшков И.В. Адаптация стандартов ЕСКД последней редакции для проектирования промышленных роботов в интегрированной программной среде // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2015. – № 2. – С. 49-55.
2. Берсенева К.А., Огородникова О.М. Гибкая производственная ячейка для роботизированного аддитивного производства // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2024. – № 13. – С. 124-127.
3. Yao Y., Cheng L., Li Z. A comparative review of multi-axis 3D printing // Journal of Manufacturing Processes. 2024, vol. 120, no. 2, pp. 1002-1022.
4. Luu Q.K., La H.M., Ho V.A. A 3-Dimensional Printing System Using an Industrial Robotic Arm // IEEE/SICE International Symposium on System Integration, SII 2021. 2021, pp. 443-448.
5. Boryga M., Graboś A. Planning of manipulator motion trajectory with higher-degree polynomials use // Mechanism and Machine Theory. 2009, vol. 44, no. 7, pp. 1400-1419.
6. Wang H., Huang J. Smooth point-to-point trajectory planning for industrial robots with kinematical constraints based on high-order polynomial curve // Mechanism and Machine Theory. 2019, vol. 139, pp. 284-293.

Сведения об авторах:

Берсенева Кирилл Александрович – аспирант, инженер-исследователь;

Огородникова Ольга Михайловна – д.т.н., профессор.