

Е. А. Дьяченко, М. Ю. Козенко, А. М. Макаров, А. В. Ваганов

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ КИНЕМАТИК 3D ПРИНТЕРОВ ТЕХНОЛОГИИ FFF/FDM

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: zhenya.dyachenko.1999@gmail.com

Проводится сравнение кинематик, используемых в аддитивных технологиях, с целью определения их преимуществ и недостатков. Самая перспективная кинематика будет использована для создания на ее основе лабораторного стенда.

Ключевые слова: 3D печать, кинематика, Delta, SCARA, Cartesian, Polar.

Е. А. Dyachenko, M. Yu. Kozenko, A. M. Makarov, A. V. Vaganov

ANALYSIS OF EXISTING KINEMATICS OF FFF / FDM 3D PRINTERS

Volgograd State Technical University

A comparison of the kinematics used in additive technologies is carried out in order to determine their advantages and disadvantages. The most promising kinematics will be used to create a laboratory stand based on it.

Keywords: 3D printing, Kinematics, Delta, SCARA, Cartesian, Polar.

Бурное развитие аддитивных технологий, в том числе изготавливающих изделия методом наплавления, приводит к тому, что на рынке появляется огромное количество схожих по принципу действия устройств. Однако далеко не все разработчики готовы экспериментировать с принципиально новыми конструкциями, и в своих работах они выбирают проверенные решения. В данной статье проводится обзор существующих кинематических решений для 3D принтеров и оценивается целесообразность их применения в 3D печати.

Ортогональная кинематика

3D принтеры FFF/FDM картезианской кинематики являются самыми распространенными

ми из всех. Во многом это обусловлено их простотой. Кинематика работает в декартовой системе координат с перемещением рабочих органов (экструдера и платформы) вдоль осей X,Y,Z. Перемещаться могут как платформа для печати, так и экструдер. Наиболее распространен вариант с вертикальным перемещением для платформы и горизонтальным для экструдера [1].

Преимущества:

- Картезианская кинематика самая простая в изготовлении, эксплуатации и ремонте.
- Программное обеспечение не требует много вычислительных ресурсов, каждый привод напрямую привязан к одной из осей, что сводит к минимуму необходимые вычисления.

- Надежность. Высокая повторяемость и стабильность печати.

- Высокая точность печати при использовании низких скоростей перемещения до 50 мм/с.

Недостатки:

- Низкая скорость. Требования к большой жесткости деталей линейного перемещения приводят к увеличению массы узлов, а, следовательно, к высокой инерционности. Несмотря на то, что максимальная скорость, которую можно достичь благодаря этой кинематике составляет 200–250 мм/с, обеспечение удовлетворительного качества поверхности на такой скорости достаточно затруднительно. Именно поэтому оптимальной скоростью печати в большинстве случаев является 60–70 мм/с.

3D принтеры Delta кинематики

Данные 3D принтеры были созданы на основе Delta-роботов зарекомендовавших себя в роли высокоскоростных сортировщиков на конвейерных линиях.

Основным отличием от картезианской кинематики является плоскопараллельное движение экструдера при неподвижном столе. Каретка экструдера попарно соединена шестью рычагами с тремя осями, перемещающимися по параллельным направляющим. Рычаги имеют на концах шарниры, выполненные в виде шарового подшипника скольжения, либо магнитного крепления. Каретки приводятся в движение зубчатыми ремнями от трех электродвигателей в направлении вертикальной оси принтера. Направляющие, являющиеся также зачастую несущими элементами конструкции, расположены в виде равностороннего треугольника [2].

К сожалению, как и любая другая кинематика она имеет свои ограничения. В Delta используется сложный расчет движения. Для перемещения каретки экструдера в горизонтальной плоскости необходимо опускать одну из осей, и немного поднимать две других. Именно из-за этого возникают все недостатки данной кинематики.

Преимуществами данной кинематики являются:

- Компактность. Принтеры занимают мало места и имеют большую высоту зоны печати.

- Скорость. Delta 3D принтеры занимают нишу высокоскоростных устройств. Скорость печати доходит до 300–400 мм/с.

Недостатки:

- Калибровка. Эти 3D принтеры сложно калибровать, так как на поверхности печати обра-

зуются вогнутые и выпуклые поверхности и методика точной настройки до сих пор не разработана.

- Точность. Высокая скорость приводит к падению точности изготовления изделий. Погрешность, возникающая из-за большого количества малых перемещений, имеет накопительный характер.

- Требования к вычислителю. Delta имеет минимальный порог требуемой вычислительной мощности, 8 битные системы слабо справляются с обработкой, в следствии чего появляются дефекты печати. По этой причине на принтерах стоят 32 битные платы, имеющие большую скорость обработки информации. Отдельного внимания заслуживают требования к точности сочленений в конструкции из-за большого влияния люфтов на качество печати.

- Экструдер. Вес используемого экструдера ограничен. Это связано с особенностями крепления каретки. Увеличение веса приводит к ухудшению качества печати и уменьшению скорости [3].

3D принтер на полярной системе координат Polar

Главная особенность этой кинематики – использование полярных координат. Экструдер перемещается в горизонтальной плоскости не по осям X, Y, а по окружности платформы. Положение экструдера задается за счет радиуса и угла поворота. Платформа имеет форму круга, вращается вокруг своей оси и перемещается вдоль одной из осей.

Преимущества:

- Высокая энергоэффективность.

- Удобство при печати тел вращения.

Недостатки:

- Скорость значительно падает в случае печати плоскопараллельных тел, расположенных близко к начальной оси вращения стола.

- Точность не равномерна и сильно падает к периферии.

- Из-за того, что стол должен вращаться, сложно обеспечить его контролируемый нагрев.

- Сложность вычислений и требовательность к системе управления.

3D принтеры кинематики SCARA

Как и Delta, кинематика SCARA пришла в 3D печать из роботов сортировщиков на конвейерных линиях. SCARA кинематика, применяемая в 3D печати, представляет собой механизм, в котором для перемещения конечной

точки используется четыре рычага и два вращающихся привода, объединенных в плоскопа-

раллельную рычажную систему (схема кинематики SCARA представлена на рисунке).

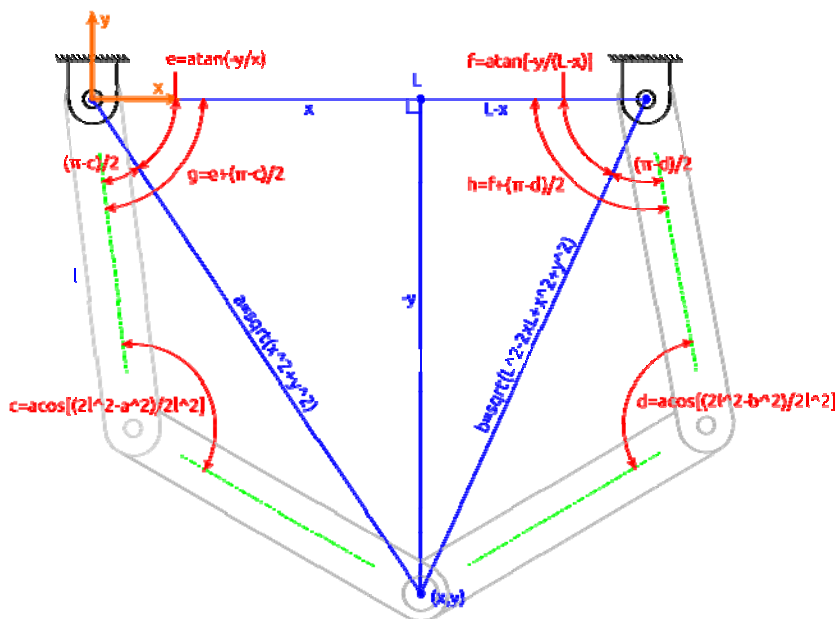


Схема кинематики SCARA

Особенностью данной кинематики является то, что линейные перемещения совершаются только экструдером, плоскопараллельные двумя рычагами, а приводы и еще два рычага, в которых сосредоточена основная масса совершают вращательные движения. Это обуславливает низкую инерционность всей системы, что позволяет добиться больших ускорений и скоростей при использовании одинаковых приводов, по сравнению с картезианской кинематикой.

Преимущество:

- Скорость. Хотя скорость зависит от используемого привода, в общем случае SCARA показывает более высокие скоростные характеристики по сравнению с картезианской и Delta кинематикой.

- Высокая повторяемость результата. Так как в механизме не используются растягивающиеся элементы (приводные ремни), то SCARA может повторять одни и те же действия без потери точности.

Недостатки:

- Неравномерная точность в пределах рабочей области. Максимальная точность достигается в начале координат. По мере удаления от него увеличивается длина рычага SCARA-робота, из-за чего наблюдается снижение точности. Это ухудшение необходимо корректировать программно.

- Требования. SCARA кинематика использует сложное перемещение, что накладывает ограничение на вычислительную мощность контроллера. Рекомендовано использовать 32-битные платы. Требования к точности изготовления рычагов высоки, так как погрешности имеют накопительный характер.

- Сложность настройки. Обеспечение правильности линейных перемещений требует заведомо более высоких требований к точности изготовления деталей. Либо необходима выработка методики юстировки для 3D принтеров на данной кинематике.

Сравнительный анализ кинематик, используемых в 3Dпринтерах, печатающих по технологии FFF/FDM [1–5] показал, что ортогональные принтеры наиболее часто используются благодаря своей простоте, полярные наиболее проигрышные в этом плане, а Delta и Scara имеют перспективы дальнейшего развития, особенно с учетом того, что в последние годы возросла доступность 32 битных систем управления. Для обоих кинематик требуется разработка методики юстировки в 3D печати, позволяющей выполнять ее в бытовых условиях конечным потребителем без специальных средств измерения.

Результаты данной работы обращают внимание на перспективы достаточно редкого в дан-

ной отрасли кинематического решения – SCARA-робота. Таким образом, образуется задел для дальнейших более глубоких исследований, направленных на расчеты жесткости системы, инерционных характеристик, возможностей программной компенсации недостаточной жесткости системы и методов упрощенной ее юстировки.

Результаты исследования используются в настоящее время при создании лабораторного стенда для проведения испытаний и проверки гипотез и расчетов на практике. Стенд представляет из себя SCARA-робот, где рабочим органом выступает экструдер типа Bowden с возможностью установки измерительных приспособлений. SCARA отвечает за перемещение экструдера в горизонтальной плоскости. Платформа стола может при этом передвигаться вертикально по линейным направляющим.

Полученный лабораторный стенд может также использоваться в учебных целях для ознакомления студентов с кинематикой SCARA в рамках образовательной программы, а также при проведении исследований по повышению эффективности 3D-принтеров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Borrelli, V.* Kinematic and dynamic analysis of a machine for additive manufacturing: Master's Degree Thesis Mechanical Engineering. - 2018. - 108 с.

2. *Самойлов, В. Б.* Выбор 3D принтера с параллельной кинематикой для самостоятельной работы студентов / В. Б. Самойлов // Машиностроение и компьютерные технологии. – 2017. – № 10. – С. 57–69. URL: <http://www.tech-pomagelpub.ru/jour/article/view/1322> (дата обращения 16.11.2020)

3. *Киселев, В.* 3D-принтеры с разной кинематикой: сравнение, плюсы и минусы / В. Киселев. Текст: электронный // Аддитивные технологии: Интернет-портал – URL: <https://additiv-tech.ru/publications/3d-printery-s-raznoy-kinematiko-y-s-ravnenie-plyusy-i-minusy.html> (дата обращения: 16.11.2020).

4. Strength Increasing Additive Manufacturing Fused Filament Fabrication Technology, Based on Spiral Toolpath Material Deposition / А. Р. Авдеев, А. А. Швец, И. А. Гушин, И. С. Торубаров, А. В. Дроботов, А. М. Макаров, А. Л. Плотников, Ю. П. Сердобинцев // *Machines* : [Open Access Journal]. – 2019. – Vol. 7, Issue 3. – 18 p. – doi: 10.3390/machines7030057. – URL : <https://www.mdpi.com/2075-1702/7/3/57>.

5. Методика выбора 3D-принтера на основании технико-экономических показателей / Ю. П. Сердобинцев, А. В. Дроботов, Н. В. Гаврилина, А. Р. Авдеев, А. А. Швец, И. А. Гушин // Вестник машиностроения. – 2017. – № 4. – С. 37–40.