

Л. А. Рыбак, д-р техн. наук, проф., **Е. В. Гапоненко**, канд. техн. наук, доц.,
Д. И. Малышев, аспирант, rl_bgту@intbel.ru,
Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова

Разработка алгоритмов и управляющих программ для реализации движений выходного звена робота-гексапода для 3D-печати прецизионных изделий*

Рассмотрена задача компьютерного моделирования движений, выполняемых роботом-гексаподом для реализации аддитивных технологий послойной 3D-печати изделий. Синтезированы алгоритмы для реализации возвратно-поступательных и вращательных движений выходного звена, имеющие циклическую архитектуру. Разработан программный комплекс, являющийся аналогом дорогостоящего специализированного программного обеспечения, включающего комплекс САЕ-модулей и постпроцессоров. Представлены результаты визуализации с отображением траектории движения выходного звена робота в виртуальной среде.

Ключевые слова: алгоритм, робот-гексапод, моделирование, 3D-печать, контроллер, программный модуль

Введение

Одним из актуальных вопросов в современном машиностроении, строительстве и других сферах является использование новых технологий и материалов, обеспечивающих высокие эксплуатационные характеристики деталей. Решение данной задачи вместе с достижением роста технико-экономических показателей возможно путем разработки прогрессивных технологических процессов проектирования 3D-моделей и реализации исполнения их непосредственно в реальном масштабе, что позволяет с наибольшей эффективностью использовать достоинства трехмерной печати, существенно снизить затраты на подготовку производства новых деталей и перейти от крупносерийного и массового производства продукции к производственным системам нового поколения для серийного производства высокотехнологичного строительства под индивидуальный заказ.

Основные решения, направленные на создание роботизированных комплексов для автоматической печати сооружений, деталей конструкций и зданий, в настоящий момент сосредоточены за пределами России. При этом среди имеющихся образцов технических решений, которые являются конечными продуктами для потребителей, можно назвать лишь несколько единичных экземпляров. Как было отмечено в статье [1], будущие системы проектирования с автоматизированными комплексами должны решить множество задач, стоящих на данный момент перед человечеством, в том числе проблему

отсутствия достаточного обеспечения, средств и методик для эффективного и дешевого способа возведения домов. Среди российских публикаций наблюдаются поверхностные описания технологий [2–4]. Известны разработки подобных принтеров в России фирмы ЗАО "Спецавиа" (г. Ярославль) [5].

Одним из решений в области автоматизации строительства путем применения 3D робототехнических комплексов является прототип принтера компании Contour Crafting, которую возглавляет профессор университета Южной Калифорнии Behrokh Khoshnevis, имеющий большое число статей, посвященных различным вопросам 3D-печати строительных конструкций, описанных, например, в работе [6]. В работе [7] рассматриваются вопросы создания роботизированных комплексов для автоматизированного строительства. Кроме того, описывается достаточно новаторский проект по возможности печати колонии на других объектах помимо Земли, при этом, как заявлено, NASA уже поддержало проект строительства такой колонии на Луне.

Перспективным направлением в робототехнике является использование роботов с параллельной кинематикой (параллельных роботов), у которых все координаты связаны, и движение по какой-либо одной координате требует согласованного изменения всех других.

Большинство ведущих производителей роботов с параллельной кинематикой и систем управления ими, как правило, предлагают собственные разработки, что, с одной стороны, является плюсом с точки зрения производственной эксплуатации и обслуживания, а с другой стороны, является существенным недостатком. Все производители подобного оборудования комплектуют свои механизмы

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, Соглашение № 16-19-00148.

системами управления, которые работают либо по заранее определенному алгоритму, либо имеют ряд надстроек от производителя с узкоограниченной областью применения. Возможности формировать собственные программные интерфейсы и менять структуру системы управления для выполнения более широкого круга задач не предусмотрено.

В настоящее время существуют предприятия, которые выпускают оборудование на основе механизмов с параллельной кинематикой, однако, как правило, оно имеет ограниченную функциональность. В частности, корпорация "ФАНУК Роботикс Россия" [8] занимается изготовлением роботизированных станочных приспособлений на основе механизмов с параллельной кинематикой. Однако существенным недостатком является то, что данное приспособление программируется производителем на выполнение конкретной технологической операции и не имеет возможности быстрой перенастройки. Система управления имеет закрытую программно-аппаратную архитектуру, таким образом, любое изменение технологического процесса приводит к необходимости постоянного обращения к производителю данной продукции для изменения программных настроек. Аппаратно-программная часть не имеет библиотек для программирования функционала под конкретные нужды технологического процесса. Система управления отрабатывает только заранее запрограммированную производителем траекторию перемещения и позиционирования.

Компания "Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG" (Германия) [9] специализируется на производстве гексаподов и триподов для прецизионного позиционирования с использованием различных структурных схем. Компания предлагает к продаже готовые системы управления механизмами, которые имеют закрытую аппаратно-программную архитектуру. Возможности настройки сведены к установке конечного положения платформы, на которую она должна выйти при заданных кинематических характеристиках. Система управления не предусматривает подключения сторонних программных модулей и компонентов, в том числе тех, которые могли быть разработаны заказчиком. Следует отметить, что максимально возможные смещения подвижной части данных механизмов не превышают 50 мм, что делает невозможным использование данных механизмов во многих технологических процессах.

В связи с этим поставлена задача создания алгоритмов, позволяющих универсализировать каждую из управляющих программ для выполнения сходных технологических задач, с возможностью удобного перенастраивания в зависимости от исходных данных и необходимых траекторий движения выходного звена.

Особенности робота-гексапода при использовании для 3D-печати

Наряду с традиционными "последовательными" кинематическими схемами роботов, допускающими независимое изменение узлов по одной из координат при неизменном значении других координат, в последние годы появился новый класс роботов с "параллельной" кинематикой, у которых все координаты связаны, и перемещение по любой одной координате требует одновременного согласованного изменения всех других. Отличительной особенностью робота является способность воспринимать и передавать нагрузки подобно пространственным фермам и обеспечивать шесть степеней свободы выходному звену (платформе) в сочетании с его высокоточным позиционированием относительно основания. Рабочая платформа и неподвижная платформа связаны между собой шестью приводными механизмами, каждая из которых представляет собой поступательную пару (рис. 1, см. вторую сторону обложки). Приводные механизмы соединены с неподвижной и рабочей платформой сферическими шарнирами.

Инновационный характер роботов с параллельной кинематикой, помимо оригинальности, определяется их существенными преимуществами в некоторых областях использования перед роботами с традиционной кинематикой, а именно:

- высокой точностью, так как приводные механизмы работают только на растяжение—сжатие, отсутствуют изгибательные нагрузки;
- оптимальными условиями хранения (значительно меньшей массой подвижных частей и постоянством их массы);
- значительным упрощением конструкции (простое основание, значительное уменьшение числа узлов и общего числа деталей, отсутствие "наслоения" одних узлов на другие, все приводы перемещения узлов и измерительные системы одинаковы, повторяемость деталей);
- значительным уменьшением общей массы робота;
- высокой жесткостью несущей системы робота;
- легкой сборкой робота.

Образец робота-гексапода, находящийся в распоряжении лаборатории мехатроники и робототехники БГТУ им. В. Г. Шухова, имеет высокие технические характеристики: грузоподъемность более 100 кг, точность позиционирования $\pm 0,1$ мм, а также достаточно большую рабочую область в пределах 700 мм для выполнения широкого спектра задач. В зависимости от выполняемых различных операций в качестве рабочего органа робота может быть целый ряд исполнительных механизмов.

Рассмотрим задачу программирования робота, предусматривающую выполнение операций, включающих возвратно-поступательное движение выходного звена вдоль определенной оси, а также по-

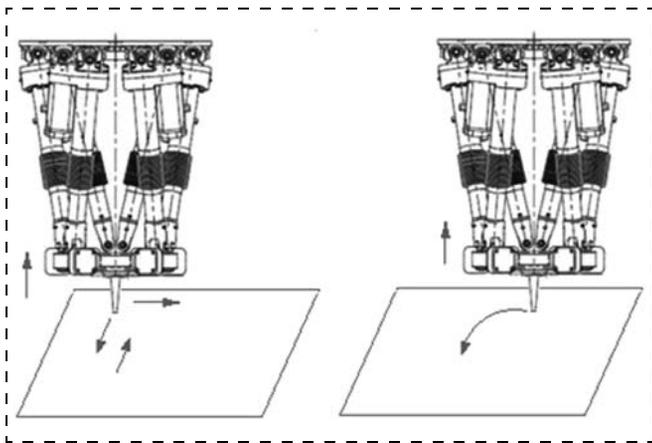


Рис. 2. Схема основных движений, выполняемых роботом

ступательные движения вдоль оставшихся осей после каждого цикла серии возвратно-поступательных движений, либо цикла серии вращательных движений (рис. 2).

Построение управляющего алгоритма для реализации возвратно-поступательных движений

Особенностью разрабатываемого алгоритма для послойной печати является использование циклического метода построения управляющей программы, а также регистров, которым присвоены, либо присваиваются в ходе выполнения программы определенные значения [10]. Большое число процессов, а также условий, входящих в алгоритм, имеют внутри себя циклы и счетчики, которые позволяют выполнить поставленную перед блоком задачу. Кроме этого, в алгоритм входят элементы, отвечающие за выставление регистрам стандартных значений в начале управляющей программы, либо, при необходимости, в ином месте, а также за выполнение команд, таких как возвращение выходного звена в "домашнюю" точку, расположенную выше зоны, в которой движется звено в ходе работы.

Робот-гексапод, на котором реализуется разрабатываемый алгоритм, имеет 200 числовых регистров, 16 регистров являются служебными для данного алгоритма и используются для счетчиков и разграничителей слоев. Остальные 184 числовые регистра используются для ввода исходных данных, характеризующих рабочий инструмент и геометрию получаемого покрытия, либо печатаемой детали. Ввод значений регистров может осуществляться вручную на пульте управления робота, либо с компьютера с помощью специальной программы, анализирующей геометрию и записывающей числовые значения в регистры робота. Алгоритм имеет большое число циклов, осуществляющих проверку и поиск необходимых значений в числовых регистрах на всех "уровнях", начиная от координат точек отдельно взятой линии и направления

движения с включенным либо выключенным экструдером и заканчивая числом слоев, которые должен выполнить робот. Ввиду громоздкости блок-схема алгоритма в статье не приводится.

Для выполнения алгоритма используются исходные данные в числовых регистрах (R_1, R_2, \dots, R_{200}) и позиционных регистрах ($PR_1, PR_2, \dots, PR_{100}$), использованных частично. В каждом числовом регистре записано определенное число. Для первых 20 числовых регистров и последнего регистра эти числа позволяют характеризовать основные параметры выполнения программы, такие как диаметр сопла, высота вертикального смещения после каждого слоя, число слоев, а также представляют собой различные счетчики, используемые по ходу выполнения алгоритма. Остальные 179 регистров ($R_{21}, R_{22}, \dots, R_{199}$) используются для специальной записи координат рабочих точек. Рабочая точка — точка с координатой, при достижении которой начинается или прекращается подача вещества. В ячейке записано число, состоящее из двух частей.

В разрабатываемом алгоритме применена система упрощенной записи значений координат. Рассмотрим запись координат геометрической фигуры (рис. 3). Примем ширину распыляющего сопла равной 10 мм. Регистр R1 имеет значение 3110, что означает, что 110 мм от начала координат будет первой точкой в линии в ходе трех прохождений распыляющего сопла. Регистр R11 имеет значение 2000, что, в свою очередь, значит, что два раза третья точка в линии будет отсутствовать. Данный способ записи регистров значительно облегчает задачу оператора и не перегружает систему числовыми значениями в случаях, когда требуется работать с линейными гранями, имеющими одинаковое значение по оси возвратно-поступательного движения исполнительного механизма.

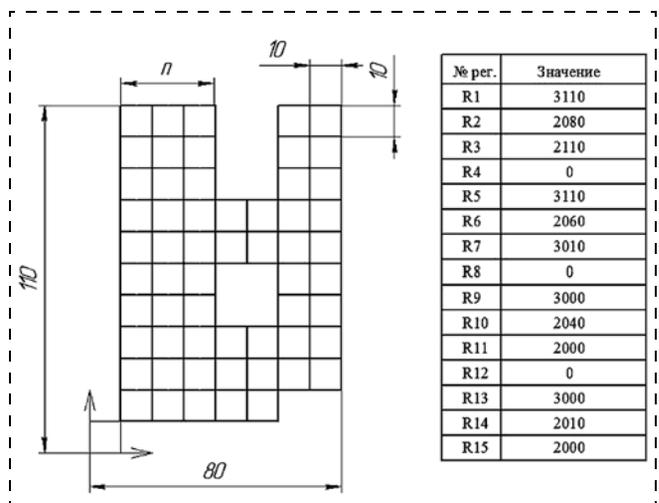


Рис. 3. Значения диапазона регистров для геометрической фигуры

Алгоритм используется для выполнения программы по траектории, предполагающей четыре диапазона однотипных слоев (имеющих абсолютно одинаковую геометрию). Числа, описывающие геометрию каждого из четырех слоев, записаны в диапазонах $R_{21}...R_{64}$, $R_{66}...R_{109}$, $R_{111}...R_{154}$, $R_{156}...R_{199}$ соответственно.

Перед шагами, предполагающими непосредственные вычисления и условия, выполняется обнуление необходимых регистров-счетчиков. Например, если регистр R_{14} номера слоя в ходе выполнения прерванной программы на 28 слое получил значение 28 либо имел любое другое, он принимает значение 1, так как программа начинает печатать с первого слоя. Работает алгоритм следующим образом.

Шаг 1. Вычисление базовой точки слоя. Изменение значения позиционного регистра (PR_1), имеющего координату базовой точки слоя с учетом значения вертикального смещения (R_3) на каждый слой и значения регистра (R_{14}), используемого как счетчик номеров слоев. При выполнении первого слоя данная координата базовой точки слоя совпадает с базовой точкой печати ($\Delta z_1 = (R_{14} - 1) \times R_3 = 0$).

Шаг 2. Нахождение диапазона регистров слоя. В соответствии с текущим диапазоном однотипных слоев происходит выбор диапазонов регистров среди регистров $R_{21}...R_{64}$, $R_{66}...R_{109}$, $R_{111}...R_{154}$, $R_{156}...R_{199}$. Для этого вычисляется регистр $R_{10} = 21 + (45 \times R_5 - 45) - (43 \times R_{13} - 43)$.

Шаг 3. Проверка условия реверсивного направления. Значение числового регистра направления движения (R_{13}) изменяется после достижения крайней точки направления. Значение "0" означает реверсивное направление, значение "1" означает прямое направление. Проверяется, какое значение имеет числовой регистр направления движения.

Шаг 3.1 (для прямого движения). Нахождение диапазона n -й точки линии. Перебор числовых регистров в диапазоне рабочего слоя для вычисления рабочего диапазона n -й точки линии. Перебор происходит на основании значений регистров, используемых как счетчик номера линии слоя (R_1) и счетчик номера точки в линии (R_2).

Шаг 3.1 (для реверсивного движения). Нахождение начала диапазона точек. Механизм перебора регистров для реверсивного движения усложнен тем, что, например, координата смещения первой точки линии для прямого направления записана, соответственно, в первом регистре R_{21} диапазона слоя, а координата первой точки линии для реверсивного направления записана последней, и требуется перебором вычислить номер данного регистра.

Шаг 3.2 (для реверсивного движения). Проверка завершения линии. Проверка наличия оставшихся рабочих числовых регистров диапазона для данной линии. В случае завершения линии происходит переход к шагу 10.

Шаг 3.2.1 (для незавершенного реверсивного движения). Нахождение диапазона n -й точки линии. Перебор числовых регистров в диапазоне рабочего слоя для вычисления рабочего диапазона n -й точки линии. Перебор происходит на основании значений регистров, используемых как счетчик номера линии слоя (R_1) и счетчик номера точки в линии (R_2).

Шаг 4. Вычисление координаты смещения. Разбиение значения числового регистра n -й точки линии на две составляющие: число раз наличия этой точки в качестве рабочей подряд, а также координата смещения.

Шаг 5. Проверка условия реверсивного направления. Проверяется, какое значение имеет числовой регистр направления движения.

Шаг 5.1 (для прямого движения). Проверка завершения линии. Проверка наличия оставшихся рабочих числовых регистров для данной линии. В случае завершения линии происходит переход к шагу 10.

Шаг 5.2 (для реверсивного движения). Проверка начала линии. Проверка наличия координаты смещения для n -й точки линии. В случае отсутствия координаты смещения, например значения регистра $R_{33} = 3000$, происходит переход к шагу 3.2 для реверсивного движения.

Шаг 6. Изменение координаты точки. Изменение координат рабочей точки на вычисленную координату смещения.

Шаг 7. Проверка подачи вещества. Значение числового регистра (0 или 1) подачи вещества (рабочее и холостое движение) изменяется после достижения рабочей точки. Проверяется, какое значение имеет числовой регистр подачи вещества.

Шаг 7.1 (для рабочего движения). Медленное выполнение точки. Движение в рабочую точку на пониженной скорости.

Шаг 7.2 (для холостого движения). Быстрое выполнение точки. Движение в рабочую точку на повышенной скорости.

Шаг 8. Включение/выключение подачи вещества. Изменение значения числового регистра подачи вещества на противоположное.

Шаг 9. Проверка завершения линии. Проверка наличия оставшихся рабочих числовых регистров для данной линии.

Шаг 9.1 (в случае незавершенной линии). Проверка условия реверсивного направления. Проверяется, какое значение имеет числовой регистр направления движения. В случае если направление реверсивное, происходит переход к шагу 3.2 для реверсивного движения. В случае если направление прямое, происходит переход к шагу 3.1 для прямого движения.

Шаг 10. Проверка завершения слоя. Проверка числа пройденных линий в слое. В случае незавершенного слоя происходит переход к шагу 3.

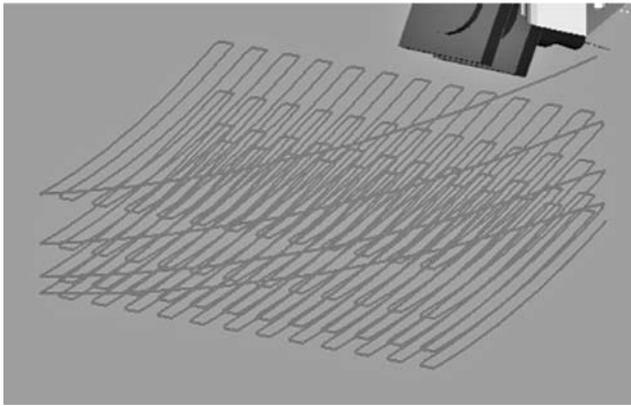


Рис. 4. Визуализированная траектория алгоритма возвратно-поступательных движений

Шаг 11. Проверка выполнения всех слоев. Проверка числа выполненных слоев. В случае наличия оставшихся слоев происходит переход к шагу 1.

Визуализированная траектория (рис. 4) позволяет оценить правильность алгоритма. Выходное звено робота движется в плоскости возвратно-поступательно, смещаясь на шаг, также задаваемый пользователем в регистрах. После выполнения слоя робот переходит в начальную точку следующего слоя без распыления рабочего вещества.

Построение алгоритма для реализации вращательных движений

Алгоритм для реализации вращательных движений (рис. 5) имеет более простую структуру по сравнению с алгоритмом возвратно-поступательного движения. Это обусловлено отсутствием реверсивных движений и записью геометрии окружностей с занижением меньшего объема памяти числовых регистров. Алгоритм также основан на цикличности, включающей изменяющийся параметр радиуса окружности, по которой движется рабочее звено с приращением по вертикальной оси координат. Визуализированная траектория выполнения блок-схемы вращательных движений показана на рис. 6.

Разработка программного обеспечения

Разработан специализированный комплекс программного обеспечения, предназначенный для связи между роботом-гексаподом и персональным компьютером, открывающий широкий спектр возможностей перед пользователем. Контроллер в системе управления робота связан с компьютером с помощью Ethernet-соединения. Состав программного комплекса показан на рис. 7.

Для полной визуализации процесса выполнения роботом управляющей программы предназначен графический модуль 1, который позволяет воссоздать реальные объекты и окружающую среду,

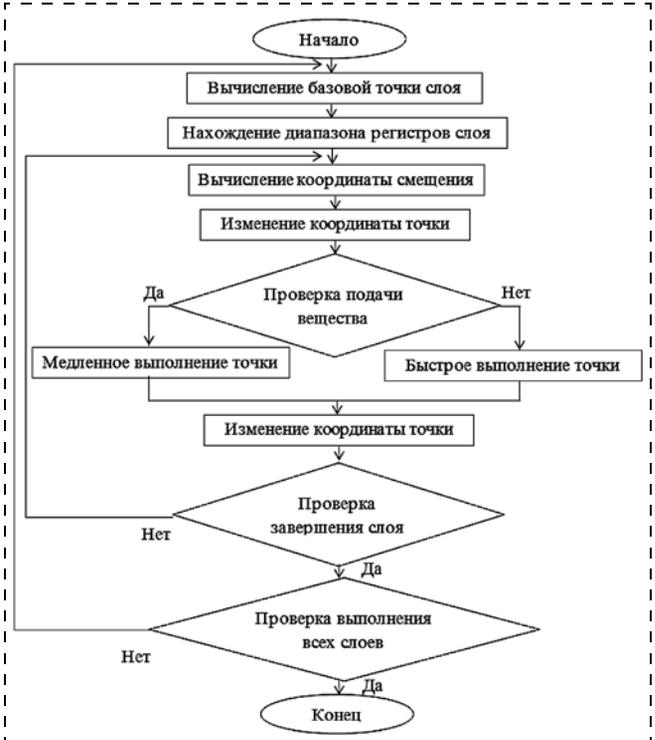


Рис. 5. Блок-схема для реализации вращательных движений

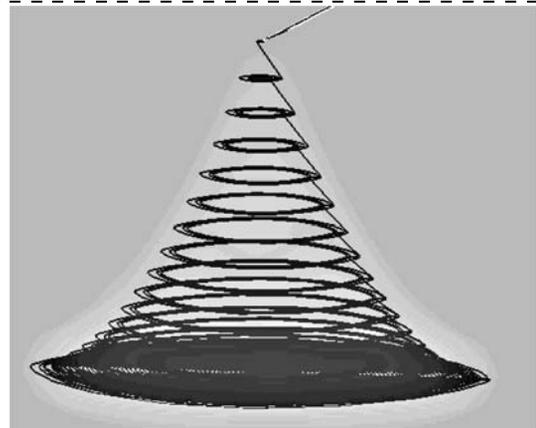


Рис. 6. Визуализированная траектория выполнения алгоритма вращательных движений



Рис. 7. Состав программного комплекса

в которой работает робот. Также визуализируются и устанавливаются в виртуальной среде приспособления, рабочий инструмент и другое оборудование, так или иначе связанное с работой робота (рис. 8, см. вторую сторону обложки). В интерфейсе программы отображается виртуальная копия управляющего пульта, осуществляющего ручное управление. Виртуальный пульт полностью идентичен реальному. Данная функция открывает полный функционал работы и настройки робота с персонального компьютера.

Настройка объектов окружающей среды, а также построение модели рабочего инструмента связано с деревом проекта. В специальном окне задаются координаты, углы поворота осей координат инструмента, а также масштаб трехмерных САД-моделей, импортируемых в программный комплекс (рис. 9, см. третью сторону обложки).

В состав программного комплекса входит программирующий модуль 2, позволяющий создавать управляющие программы, а также прорабатывать их, учитывая геометрические ограничения по траектории и рабочей зоне.

В программном комплексе в модуле 3 реализована возможность создания, редактирования и сохранения на персональном компьютере проектов, включающих в себя информацию об используемых роботах, их настройках в данный момент времени, всех управляющих программах контроллера, окружающей среде, добавленной в данный проект. Создание проекта возможно без соединения с роботом, с помощью набора файлов, передаваемых с контроллера на USB-накопитель, подключаемый к ручному пульта управления, либо другому USB-выходу на контроллере. Установив на любом компьютере программный комплекс, можно работать с проектами, либо создавать проекты с помощью файлов, получаемых от контроллера.

Запуск управляющей программы сопровождается визуализацией перемещения робота с рабочим инструментом, а при необходимости и оборудования, например, конвейера. Пользователь может наблюдать и сделать выводы о правильности траектории конечной точки рабочего органа, также визуализируемой в рабочем окне программы. Указанные возможности реализованы в модуле симулирования управляющего ручного пульта 4.

Результаты 3D-печати некоторых изделий с заданной точностью в пределах 0,2 мм с использованием экспериментального комплекса представлены на рис. 10 (см. третью сторону обложки).

Заключение

Разработаны и реализованы алгоритмы в составе управляющих программ, позволяющие универ-

сализировать их для выполнения сходных технологических задач, в частности, послойной печати различных прецизионных изделий сложной формы с высокой точностью в пределах 0,2 мм. Возможность удобного переналаживания в зависимости от исходных данных и необходимых траекторий движения выходного звена реализована через использование числовых регистров робота.

Разработанные алгоритмы являются аналогами используемого дорогостоящего специализированного программного обеспечения, производства компании Фанук (Япония), включающего комплекс САЕ-модулей и постпроцессоров. Управляющая программа, построенная по разработанным алгоритмам, имеет ряд преимуществ и отличительных особенностей, среди которых использование одной программы с изменением регистров, а также простота переналадки программы при выполнении простейших задач получения покрытий и 3D-печати.

Созданные управляющие программы экспериментально проверены с использованием робота-гексапода, а также визуализированы в комплексе программного обеспечения с отображением траектории движения выходного звена робота в виртуальной среде, дублирующей реальную окружающую среду в лабораторных условиях, включающую приспособления и другие объекты, находящиеся в непосредственной близости от рабочей зоны.

Список литературы

1. **John G. E., Hiroshi S.** Construction automation: demands and satisfiers in the United States and Japan // Journal of construction Engineering and Management. 1996. Vol. 122. P. 147–151.
2. **Веевник И. С.** 3D Принтеры // Матер. 70-й науч.-техн. конф. студентов и аспирантов "Актуальные проблемы энергетики. СНТК 70", Минск 2014. С. 230.
3. **Шейко Т. И., Литвинова Ю. С., Максименко-Шейко К. В.** Аналитическая идентификация 3D-дома для реализации технологий 3D-печати // XII Всеросс. совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. С. 9364–9373.
4. **Мальшева В. Л., Красмирова С. С.** Возможности 3d принтера в строительстве // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2013. № 12-2. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnosti-3d-printera-v-stroitelstve> (дата обращения 25.05.2016).
5. **Строительные 3D принтеры.** URL: <http://specavia.pro/catalog/stroitelnye-3d-printery/> (дата обращения 24.05.2016).
6. **Khoshnevis B. D. Hwang, K. Yao, Z. Yeh.** Mega-Scale Fabrication using Contour Crafting // International Journal of Industrial & Systems Engineering. 2006. Vol. 1, N. 3. P. 301–320.
7. **Behrokh K.** Automated construction by contour crafting-related robotics and information technologies // Automation in Construction. The best of ISARC 2002. January 2004. Vol. 13, Iss. 1. P. 5–19.
8. URL: <http://www.fanuc.eu/ru/ru/> (дата обращения 24.03.2016).
9. URL: <http://www.physikinstrumente.com/> (дата обращения 24.03.2016).
10. **Магергут В. З., Игнатенко В. А., Бажанов А. Г., Шалтала В. Г.** Подходы к построению дискретных моделей непрерывных технологических процессов для синтеза управляющих автоматов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2013. № 2. С. 100–102.

Development of Algorithms and Control Programs for Implementation of the Movements of the Output Link of a Robot-Hexapod for 3D Printing of Precision Products

L. A. Rybak, rl_bgtu@intbel.ru✉, E. V. Gaponenko, D. I. Malyshev, rl_bgtu@intbel.ru, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod

Corresponding author: **Rybak Larisa A.**, D. Sc., Professor, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod, 308012, Russian Federation, e-mail: rl_bgtu@intbel.ru

Received on May 31, 2016

Accepted on June 27, 2016

The article deals with modeling of the movements performed by a hexapod robot. The aim of development is creation of the control programs, making possible production of layered volume 3D-press products or obtaining of coatings without the use of post-processors. The objective is to develop special algorithms used in the control programs. Algorithms were constructed on the basis of the principle of a cyclic program. Due to the internal robot-hexapod's numeric registers a possibility was realized of a simplified data input to the path of movement of the tool, which can act as an extruder, or another tool with a nozzle for spraying of the working substance. With the help of the cycles in the control program sorting out of values was done within certain ranges of the numeric registers. As a result of the sorting, the control program determines a correct setting of the program, or coordinate, which is to be followed at the moment. The obtained algorithms are intended for the reciprocating and rotational movement of the working body on the trajectory. The control program is small and can easily be reconfigured for other dimensions of the resulting surface, or other parameters such as the diameter of the nozzle, number of layers, starting point and spray rate. The operation control programs were tested on a real hexapod robot in a laboratory. In addition, with the help of the software a system project, including a copy of the virtual environment, was created, in which the robot operated, as well as a virtual remote control, which made it possible to write a control program or change the numerical value of the registers. This control program was tested in a virtual environment, with a clear visualization of the robot and display of the motion path of the output link.

Keywords: algorithm, robot-hexapod, modeling, 3D-printing, controller, program module

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Science Foundation, Agreement number 16-19-00148.

For citation:

Rybak L. A., Gaponenko E. V., Malyshev D. I. Development of Algorithms and Control Programs for Implementation of the Movements of the Output Link of a Robot-Hexapod for 3D Printing of Precision Products, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 12, pp. 821–827.

DOI: 10.17587/mau.17.821-827

References

1. John G. E., Hiroshi S. Construction automation: demands and satisfiers in the United States and Japan, *Journal of construction Engineering and Management*, 1996, vol. 122, pp. 147–151.
2. Veevnik I. S. 3D Printery (3D Printers), *Materialy 70-j nauchno-tehnicheskoy konferencii studentov i aspirantov "Aktual'nye problemy jenergetiki. SNTK 70"*, Minsk, 2014, p. 230 (in Russian).
3. Shejko T. I., Litvinova Ju. S., Maksimenko-Shejko K. V. Analiticheskaja identifikacija 3D-doma dlja realizacii tehnologij 3D-pechatii (Analytical identification of 3D-house for implement 3D-printing technology), *XII Vserossijskoe soveshhanie po problemam upravlenija VSPU-2014*, pp. 9364–9373.
4. Malysheva V. L., Krasimirova S. S. *Vozmozhnosti 3d printera v stroitel'stve* (Possibilities of the 3D printer in construction), *Aktual'nye problemy gumanitarnyh i estestvennyh nauk*, 2013, no. 12-2, available at: <http://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnosti-3d-printera-v-stroitelstve> (date of access 25.05.2016).
5. *Stroitel'nye 3D printery* (Construction 3D printers), available at: <http://specavia.pro/catalog/stroitelnye-3d-printery/> (date of access 24.05.2016).
6. Khoshnevis B. D. Hwang, K. Yao, Z. Yeh. Mega-Scale Fabrication using Contour Crafting, *International Journal of Industrial & Systems Engineering*, 2006, vol. 1, no. 3, pp. 301–320.
7. Behrokh K. Automated construction by contour crafting-related robotics and information technologies, *Automation in Construction, The best of ISARC 2002*, January 2004, vol. 13, iss. 1, pp. 5–19.
8. Available at: <http://www.fanuc.eu/ru/ru/> (date of access 24.03.2016).
9. Available at: <http://www.physikinstrumente.com/> (date of access 24.03.2016).
10. Magergut V. Z., Ignatenko V. A., Bazhanov A. G., Shap-tala V. G. *Podhody k postroeniju diskretnyh modelej nepreryvnyh tehnologicheskikh processov dlja sinteza upravljajushhih avtomatov* (Approaches to the construction of discrete models of continuous processes for the synthesis of automatic control) / V. Z. Magergut, *Vestnik Belgorodskogo Gosudarstvennogo Tehnologicheskogo Universiteta im. V. G. Shuhova*, 2013, no. 2, pp. 100–102 (in Russian).