

ДАНИЛОВ А.В.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

E-mail: 157304@rambler.ru

ПРИМЕНЕНИЕ РОБОТИЗИРОВАННОЙ РУКИ ДЛЯ АДДИТИВНОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ СКУЛЬПТУРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ПО ПРОТОТИПУ

Аннотация. Рассмотрено применение роботизированной руки с избыточным числом звеньев для аддитивного конструирования малых архитектурных форм, в частности, скульптурных композиций по масштабируемому прототипу. В качестве роботизированной руки используется избыточный манипулятор последовательной структуры с кинематическими параметрами пятого класса в виде шарнира и призмы. Для организации максимальной рабочей зоны предлагается стационарное крепление манипулятора над центром скульптурной композиции. Для управления манипулятором в автоматическом режиме предлагается применение метода «конечного поворота и смещения», способного в режиме реального времени обеспечить систему управления желаемыми значениями обобщенных координат и прохождением через сингулярные точки. Помимо этого, в методе «конечного поворота и смещения» возможно автоматическое управление промежуточными степенями подвижности манипулятора для частичного обхода в рабочей зоне препятствий в виде создаваемой композиции.

Ключевые слова: манипулятор, аддитивные технологии, метод «конечного поворота и смещения».

Введение. Сложившееся в последнее десятилетие формирование объектов в строительстве по аддитивной технологии предполагает выполнение конструирования объекта послойно в горизонтальных плоскостях его сечений с помощью порталных принтеров. Основой существующей схемы конструирования объектов строительной инфраструктуры является применение порталных принтеров, имеющих три поступательные степени подвижности. Дальнейшее развитие технологии аддитивного конструирования связано с необходимостью применения различных материалов в составе формируемых объектов и очередностью их наложения в процессе формирования изделия [1].

Формирование изделия по очередности нанесения материала не всегда возможно порталным принтером и поэтому возникает необходимость применения более гибкого манипулятора с большим числом степеней подвижности. Такими характеристиками обладают манипуляторы последовательной структуры с достаточным числом степеней подвижности, чтобы обеспечить поочередное наложение материалов по аддитивному конструированию изделия. Более того, очередное наложение материала всегда происходит в зоне с уже частично сформированным объектом. Это ограничивает рабочее пространство и может привести к столкно-

вению манипулятора с изделием. Для предотвращения последнего требуется система управления, которая может учитывать имеющиеся ограничения в рабочей зоне и обеспечить безаварийную работу. Метод «конечного поворота и смещения» может применяться в составе систем управления манипуляторами последовательной структуры для определения желаемых значений параметров управления в режиме реального времени и может быть настроен на безаварийную работу с учетом возможных столкновений с объектами в рабочей зоне.

Из всех популярных на сегодняшний день методов, а именно: FABRIK [2, 3], Cyclic Coordinate Descent (CCD) [4–6], Jacobian Transpose [7, 8], Jacobian DLS [9, 10], Jacobian SVD-DLS [11, 12], FTL [13], Триангуляция [14], метод МКПС не уступает самому быстрому эвристическому методу FABRIK и имеет более естественную настройку для конкретного манипулятора [15, 16].

Цель статьи – показать манипулятор последовательной структуры с десятью степенями подвижности для формирования малых архитектурных форм, включая архитектурные композиции в управлении и обходе ограничений в рабочей зоне.

Краткое описание метода. Метод «конечного поворота и смещения» (МКПС) геометрический. С помощью вспомогательных векторов

относительно кинематической пары пятого класса в виде шарнира/призмы определяется однозначное и оптимальное значение поворота/смещения каждого звена для максимально возможного приближения к заданным параметрам положения и ориентации конечного звена (принтера). Более подробно это рассмотрено и доказано в [15, 16]. В случае попадания манипулятора в сингулярные точки в методе МКПС предусмотрен автоматический обход этих точек в соответствии с видом их проявления. На этом потенциальные возможности метода МКПС не исчерпаны. Для частичного решения проблемы

соударения манипулятора с предметами в рабочей зоне возможно автоматическое управление положением промежуточных звеньев для максимального отвода их от центральной рабочей зоны манипулятора.

Объект испытания. В качестве объекта для получения желаемых значений обобщенных координат для системы управления манипулятором-принтером выбран манипулятор последовательной структуры с десятью степенями подвижности. Модель манипулятора-принтера, его кинематическая схема и векторная модель манипулятора-принтера показана на рис. 1.

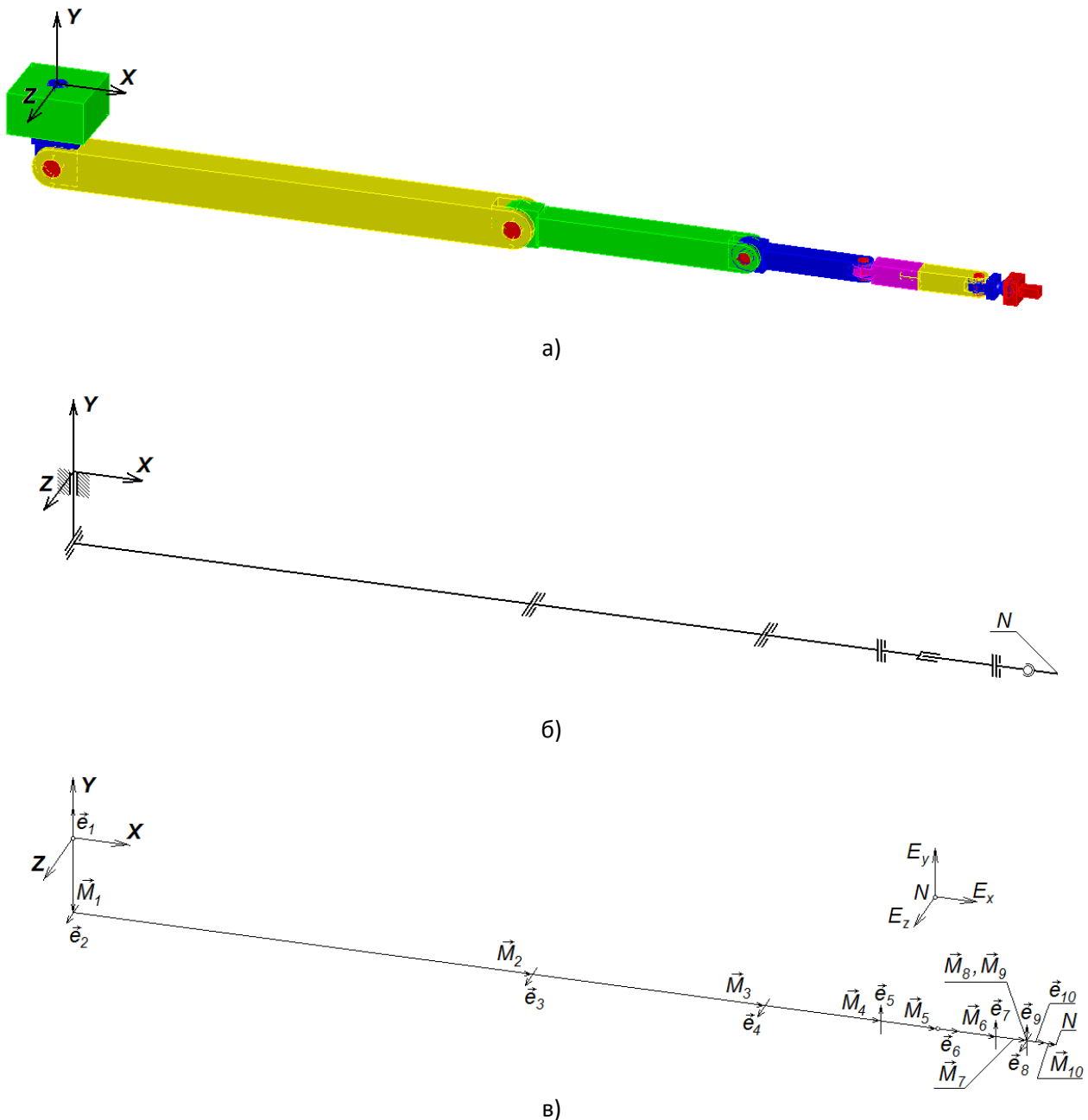


Рис. 1. а) модель манипулятора-принтера последовательной структуры, б) его кинематическая схема, в) векторная модель манипулятора-принтера

В качестве роботизированной руки на рисунке 1а показан манипулятор последовательной структуры с кинематической парой для конечного звена (принтера) в виде пространственного шарнира. Такая кинематическая пара относится к третьему классу, а метод МКПС разработан для кинематических пар пятого класса. Для того чтобы в этом случае использовать метод МКПС необходимо формально кинематическую пару третьего класса разложить на три пары пятого класса с помощью векторов осей шарниров \vec{e}_8 , \vec{e}_9 и \vec{e}_{10} , и векторов звеньев \vec{M}_8 , \vec{M}_9 и \vec{M}_{10} , причем векторы \vec{M}_8 и \vec{M}_9 ввести нулевыми ($|\vec{M}_8| = |\vec{M}_9| = 0$). После такого преобразования имеем манипулятор с кинематическими парами пятого класса, для которого применим метод МКПС.

Получим желаемые значения обобщенных координат по методу МКПС. Для этого зададим исходные и конечные данные. Исходные данные зададим в виде следующих значений обобщенных координат: $\vartheta_1 = 90^\circ$, $\vartheta_2 = -20^\circ$, $\vartheta_3 = -25^\circ$, $\vartheta_4 = -20^\circ$, $\vartheta_5 = 0^\circ$, $\vartheta_6 = -20^\circ$, $\vartheta_7 = -10^\circ$, $\vartheta_8 = 0^\circ$, $\vartheta_9 = 0^\circ$, $\vartheta_{10} = 5^\circ$ и начальных углов Эйлера-Крылова: курс $\phi = 70,855^\circ$, дифферент $\psi = 299,838^\circ$, крен $\theta = 327,957^\circ$. Этим параметрам соответствует однородная матрица начального положения

$$\begin{pmatrix} 0,163 & -0,260 & 0,952 & 0,0522 \\ -0,867 & 0,422 & 0,264 & -3,4545 \\ -0,470 & -0,869 & -0,157 & -3,7613 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \text{ Конечные}$$

и ориентации данные зададим в виде координат характерной точки конечного звена $N(3,6; -1,0; 0,0)$ и его ориентации с помощью углов Эйлера-Крылова: курс $\phi = 0^\circ$, дифферент $\psi = 0^\circ$, крен $\theta = 0^\circ$. Для этих параметров имеем однородную матрицу заданной ориентации в следующем виде

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 3,6 \\ 0 & 1 & 0 & -1,0 \\ 0 & 0 & 1 & 0,0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \text{ После решения ОЗК однород-$$

ная матрица положения и ориентации имеет следующий вид

$$\begin{pmatrix} 1,000 & -0,007 & -0,004 & 3,5995 \\ 0,007 & 1,000 & -0,004 & -0,9999 \\ 0,004 & 0,004 & 1,000 & 0,0000 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \text{ а углы Эй-}$$

лера-Крылова соответствуют следующим значе-

ниям: курс $\phi = 359,772^\circ$, дифферент $\psi = 0,393^\circ$, крен $\theta = 0,253^\circ$. Фактическая точность по положению 0,5 мм, по ориентации 5,4 минуты.

В процессе решения обратной задачи кинематики по методу МКПС получены графики обобщенных координат по итерациям и следующие желаемые значения обобщенных координат: $\vartheta_1 = -8,293^\circ$, $\vartheta_2 = 23,577^\circ$, $\vartheta_3 = -46,097^\circ$, $\vartheta_4 = -61,705^\circ$, $\vartheta_5 = 57,065^\circ$, $\vartheta_6 = 5,830^\circ$, $\vartheta_7 = -59,644^\circ$, $\vartheta_8 = 90^\circ$, $\vartheta_9 = 78,759^\circ$, $\vartheta_{10} = -87,228^\circ$, представленные на рисунке 2. Каждая итерация является конечным поворотом звеньев согласно теоремам в [15]. Приращение обобщенных координат в результате решения ОЗК следующие: $\Delta\vartheta_1 = -98,293^\circ$, $\Delta\vartheta_2 = 43,577^\circ$, $\Delta\vartheta_3 = -21,097^\circ$, $\Delta\vartheta_4 = -41,705^\circ$, $\Delta\vartheta_5 = 57,065^\circ$, $\Delta\vartheta_6 = 25,830^\circ$, $\Delta\vartheta_7 = -49,644^\circ$, $\Delta\vartheta_8 = 90^\circ$, $\Delta\vartheta_9 = 78,759^\circ$, $\Delta\vartheta_{10} = -92,228^\circ$.

Задача определения желаемых значений обобщенных координат для системы управления манипулятором решается последовательно по положению R, по ориентации относительно оси X и относительно Z. Сумма итераций по каждому критерию образует макроитерацию. Графики обобщенных координат по макроитерациям показаны на рис. 3.

Построение траектории заключается в задании на формируемой поверхности положения и ориентации конечного звена (принтера) и нахождения желаемых значений обобщенных координат для последовательности заданных траекторных точек.

С помощью манипулятора-сканера строится математическая модель объекта формирования по прототипу в виде сетчатой структуры. Точки сетки используются для задания положения конечного звена (принтера), а ориентация находится с помощью построения орта к поверхности объекта и выбранного вектора направления движения. По мере формирования объекта узловые точки отодвигаются по ортам от поверхности на толщину укладываемого слоя. Эти данные используются методом МКПС для дальнейшего наращивания материала на изделие. На рисунке 4 показан пример формирования малой архитектурной формы (МАФ) в виде фонтана, представляющего собой вазу на пьедестале, окруженную круглой чашей.

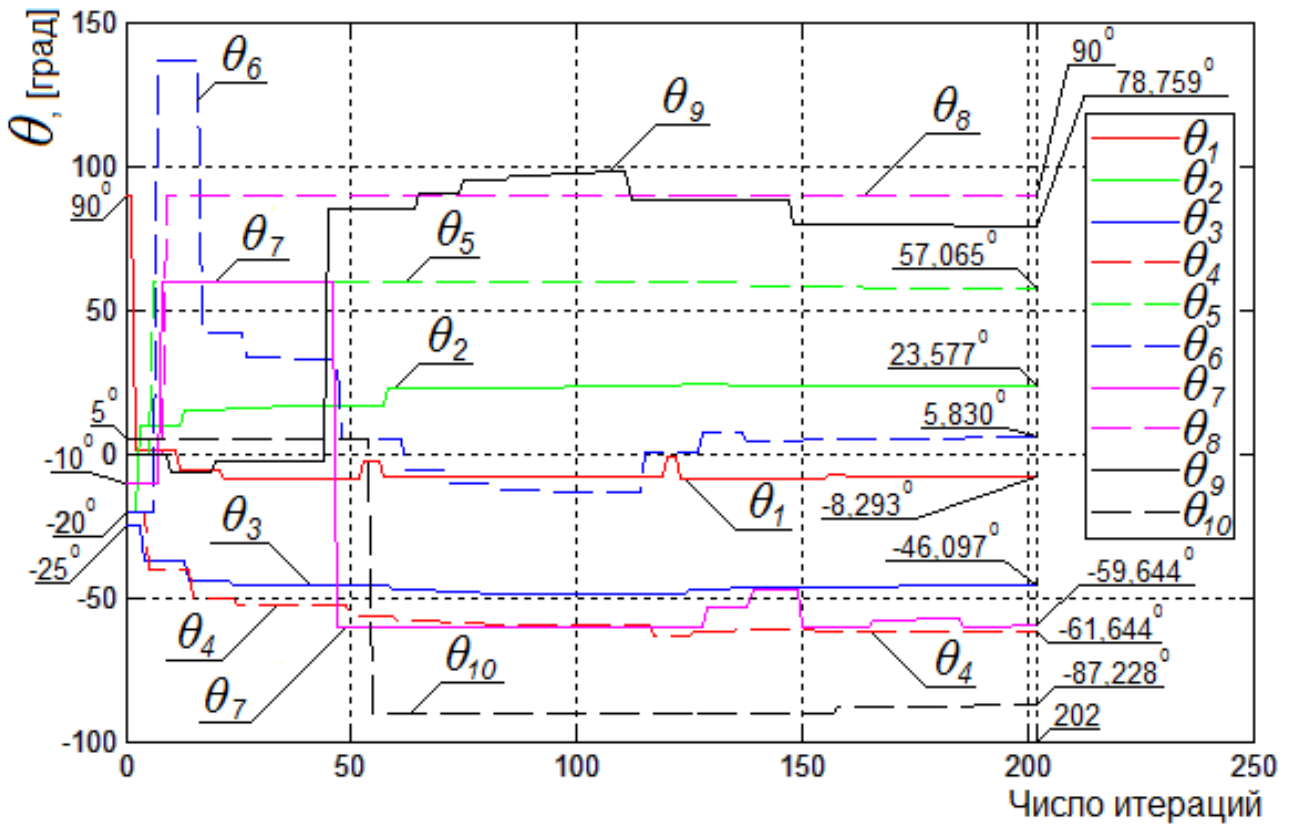


Рис. 2. Графики изменения обобщенных координат по итерациям

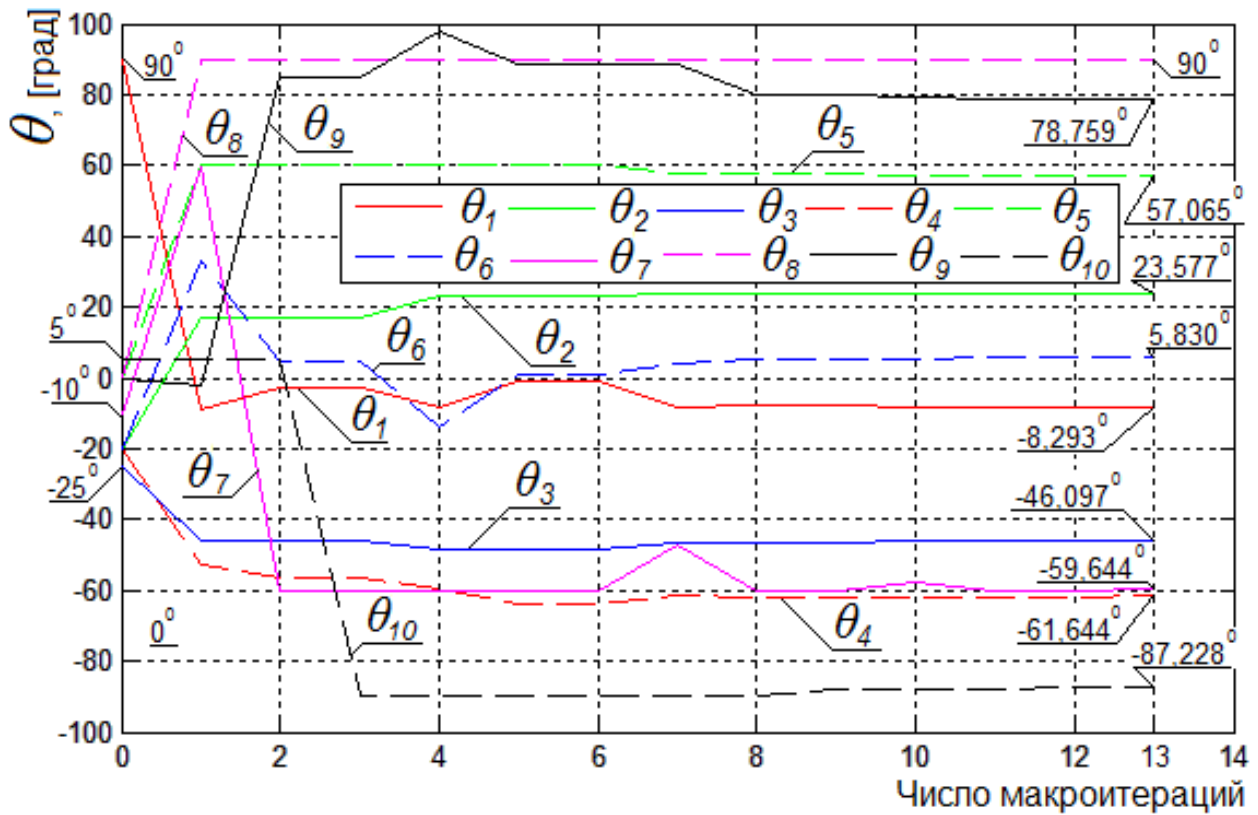


Рис. 3. Графики обобщенных координат по макроитерациям

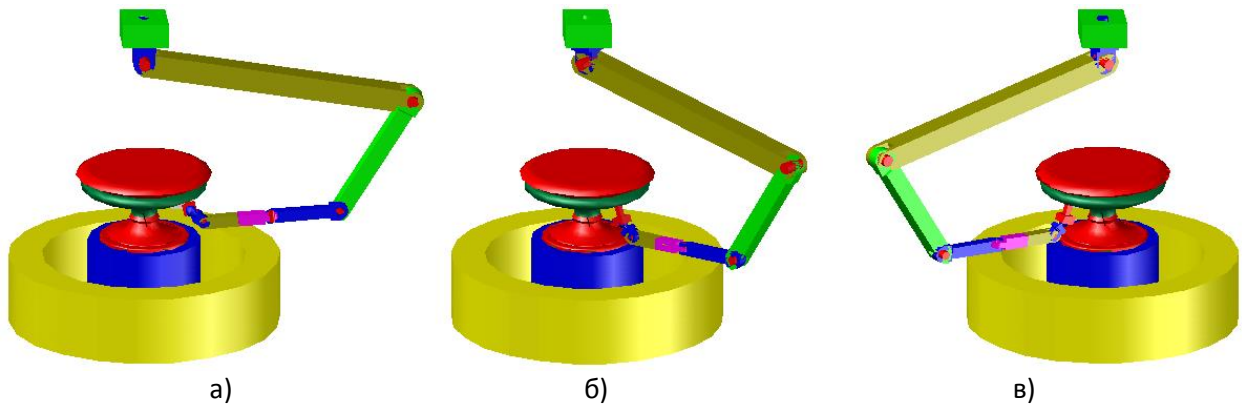


Рис. 4. а) начало движения, б) промежуточное движение, в) конечное движение

Как видно из рисунка 4, для исключения соударения промежуточных звеньев с формируемым объектом МАФ движение конечного звена (принтера) сопровождается движением звеньев манипулятора по принципу максимального удаления от центра рабочей зоны манипулятора. Такое движение обеспечивается выполнением условия ортогональности вектора \vec{e}_3 к радиус-вектору \vec{r} , соединяющему характерную точку принтера N с началом координат XYZ манипулятора, а также при работе принтера в средней части МАФ вводятся программные ограничения

на обобщенные координаты ϑ_2 и ϑ_3 для второго и третьего звеньев. Таким образом, не используя сложную систему тактильных датчиков для всех поверхностей звеньев, можно просто решить проблему отсутствия соударения манипулятора с МАФ в процессе работы. На рисунке 5 показаны графики изменения обобщенных координат в процессе формирования изделия при несовпадении осей изделия и первого шарнира манипулятора на величину равную 0,5 м в плоскости XZ.

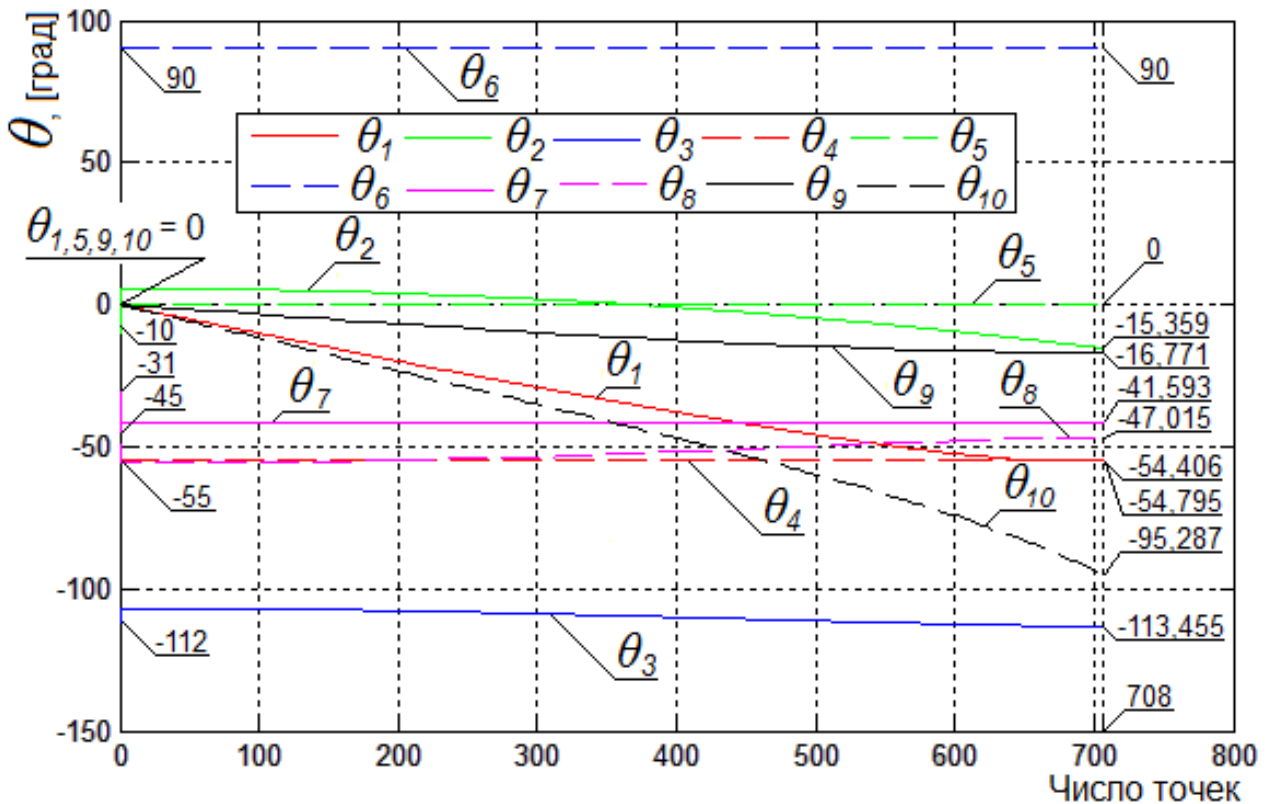


Рис. 5. Графики изменения обобщенных координат при движении по траектории формирования изделия

Выводы. При использовании метода «конечного поворота и смещения» в системе

управления избыточным манипулятором-принтером последовательной структуры появ-

ляется возможность формировать изделия из различных материалов послойно. При этом не надо использовать сложную систему очувствления манипулятора-принтера для формирования малых архитектурных форм различной конфигурации. Малые архитектурные формы изготавливаются в малом масштабе для формирования математической поверхности изделия с помощью малого манипулятора-сканера.

Литература

1. http://isi.sfu-kras.ru/sites/is.institute.sfu-kras.ru/files/Broshyura_3D.pdf. Режим доступа: (дата обращения: 20.10.2019)
2. Aristidou A., Lasenby J. FABRIK: A fast, iterative solver for the Inverse Kinematics problem // *Graphical Models*. 2011. Vol. 73. Iss. 5. Pp. 243–260. doi: 10.1016/j.gmod.2011.05.003
3. Aristidou A., Lasenby J. Inverse Kinematics: a review of existing techniques and introduction of a new fast iterative solver. Cambridge University Engineering Department (CUEDF-INFENG, TR-632). 2009. 60 p.
4. Canutescu A.A., Dunbrack Jr. R.L. Cyclic coordinate descent: A robotics algorithm for protein loop closure // *Protein Science*. 2003. Vol. 12, Iss. 5. Pp. 963–972. doi: 10.1110/ps.0242703
5. Wang L.-C.T., Chen C.C. A combined optimization method for solving the inverse kinematics problems of mechanical manipulators // *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 1991. Vol. 7 (4). Pp. 489–499. doi: 10.1109/70.86079
6. Welman C. Inverse kinematics and geometric constraints for articulated figure manipulation. Master Dissertation, Simon Fraser University, Department of Computer Science, 1993. 77 p.
7. Balestrino A., De Maria G., Sciavicco L. Robust control of robotic manipulators // *IFAC Proceedings Series*. 1985. Pp. 2435–2440.
8. Wolovich W.A., Elliott H. A computational technique for inverse kinematics // *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*. 1984. Pp. 1359–1363.
9. Orin D., Schrader W. Efficient computation of the jacobian for robot manipulators // *The International Journal of Robotics Research*. 1984. Vol. 3, Iss. 4. Pp. 66–75. doi: 10.1177/027836498400300404
10. Wampler C. Manipulator inverse kinematic solutions based on vector formulations and damped least-squares methods // *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. 1986. Vol. 16, Iss. 1, Pp. 93–101. doi: 10.1109/TSMC.1986.289285
11. Baillieul J. Kinematic programming alternatives for redundant manipulators // *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 1985. 1087234. Pp. 722–728. doi: 10.1109/ROBOT.1985.1087234
12. Buss S. Selectively damped least squares for inverse kinematics // *Journal of Graphics Tools*. 2005. Vol. 10(3). Pp. 37–49. doi: 10.1080/2151237X.2005.10129202
13. Brown J., Latombe J.-C., Montgomery K. Realtime knot-tying simulation // *The Visual Computer: International J. of Computer Graphics*. 2004. Vol. 20 (2). Pp. 165–179.
14. Müller-Cajar R., Mukundan R. Triangulation: A new algorithm for inverse kinematics. *Proceedings of Image and Vision Computing*. 2007, December, Hamilton, New Zealand. Hamilton, 2007, Pp. 181–186. Режим доступа: <http://ir.canterbury.ac.nz/handle/10092/743>, Дата обращения 01.02.2016.
15. Данилов А.В., Кропотов А.Н., Трифонов О.В. Общий подход к решению обратной задачи кинематики для манипулятора последовательной структуры с помощью конечного поворота и смещения // *Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша*. 2018. № 81. Режим доступа: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-81> (дата обращения: 20.02.2019)
16. Данилов А.В., Кропотов А.Н., Трифонов О.В. Применение метода конечного поворота и смещения для манипулятора последовательной структуры с кинематическими параметрами пятого класса // *Препринты ИПМ им. Келдыша*. 2018. № 107. Режим доступа: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-107> (дата обращения: 20.02.2019)

Информация об авторе

Данилов Александр Владимирович, младший научный сотрудник НИИСМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: 157304@rambler.ru. Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет). Россия, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, дом 5, с. 1.

DANILOV A.V.

Moscow State Technical University named after N.E. Bauman

E-mail: 157304@rambler.ru

APPLICATION OF ROBOTIC ARM FOR ADDITIVE DESIGN OF SCULPTURAL COMPOSITION USING A PROTOTYPE

Abstract. The application of robotic arm with abundant number of segments for additive engineering of small architectural forms, particularly, for of sculptural composition using a scalable prototype was studied. The redundant manipulator of sequence structure with fifth-class kinematic pair in form of rotational articulation and prism was used as a robotic arm. To arrange the maximal operation zone the stationary fixation of manipulator above the center of sculptural composition was proposed. For automatic operation by manipulator the method of finite rotation and shift, that allow providing on a real-time basis the management system with a desirable values of generic coordinates as well as with transmission of it through a singular points. Also, this method allows automatic control of intermediate degree of freedom of the manipulator for partial collision avoidance within the operation zone. It was realized in form of the developed composition.

Keywords: manipulator, additive technologies, the method of finite rotation and shift.

References

1. http://isi.sfu-kras.ru/sites/is.institute.sfu-kras.ru/files/Broshyura_3D.pdf. Режим доступа: (дата обращения: 20.10.2019)
2. Aristidou A., Lasenby J. FABRIK: A fast, iterative solver for the Inverse Kinematics problem. *Graphical Models*. 2011. Vol. 73. Iss. 5. Pp. 243–260. doi: 10.1016/j.gmod.2011.05.003
3. Aristidou A., Lasenby J. Inverse Kinematics: a review of existing techniques and introduction of a new fast iterative solver. Cambridge University Engineering Department (CUEDF-INFENG, TR-632). 2009. 60 p.
4. Canutescu A.A., Dunbrack Jr. R.L. Cyclic coordinate descent: A robotics algorithm for protein loop closure. *Protein Science*. 2003. Vol. 12, Iss. 5. Pp. 963–972. doi: 10.1110/ps.0242703
5. Wang L.-C.T., Chen C.C. A combined optimization method for solving the inverse kinematics problems of mechanical manipulators. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 1991. Vol. 7 (4). Pp. 489–499. doi: 10.1109/70.86079
6. Welman C. Inverse kinematics and geometric constraints for articulated figure manipulation. Master Dissertation, Simon Fraser University, Department of Computer Science, 1993. 77 p.
7. Balestrino A., De Maria G., Sciavicco L. Robust control of robotic manipulators. *IFAC Proceedings Series*. 1985. Pp. 2435–2440.
8. Wolovich W.A., Elliott H. A computational technique for inverse kinematics. *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*. 1984. Pp. 1359–1363.
9. Orin D., Schrader W. Efficient computation of the jacobian for robot manipulators. *The International Journal of Robotics Research*. 1984. Vol. 3, Iss. 4. Pp. 66–75. doi: 10.1177/027836498400300404
10. Wampler C. Manipulator inverse kinematic solutions based on vector formulations and damped least-squares methods. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. 1986. Vol. 16, Iss. 1. Pp. 93–101. doi: 10.1109/TSMC.1986.289285
11. Baillieul J. Kinematic programming alternatives for redundant manipulators. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 1985. 1087234. Pp. 722–728. doi: 10.1109/ROBOT.1985.1087234
12. Buss S. Selectively damped least squares for inverse kinematics. *Journal of Graphics Tools*. 2005. Vol. 10(3). Pp. 37–49. doi: 10.1080/2151237X.2005.10129202
13. Brown J., Latombe J.-C., Montgomery K. Realtime knot-tying simulation. *The Visual Computer: International J. of Computer Graphics*. 2004. Vol. 20 (2). Pp. 165–179.
14. Müller-Cajar R., Mukundan R. Triangulation: A new algorithm for inverse kinematics. *Proceedings of Image and Vision Computing*. 2007, December, Hamilton, New Zealand. Hamilton, 2007, Pp. 181–186. Access mode: <http://ir.canterbury.ac.nz/handle/10092/743>, date of access: 01.02.2016.

15. Danilov A.V., Kropotov A.N., Trifonov O.V. Obshchij podhod k resheniyu obratnoj zadachi kinematiki dlya manipulyatora posledovatel'noj struktury s pomoshch'yu konechnogo povorota i smeshcheniya [A general approach to solving the inverse kinematics problem for a serial structure manipulator using finite rotation and displacement]. Preprinty IPM im. Keldysha. 2018. No. 81. Access mode: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-81> (date of access: 02.20.2019). (rus)

16. Danilov A.V., Kropotov A.N., Trifonov O.V. Primenenie metoda konechnogo povorota i smeshcheniya dlya manipulyatora posledovatel'noj struktury s kinematicheskimi parami pyatogo klassa [Application of the finite rotation and displacement method for a sequential-structure manipulator with kinematic pairs of the fifth class]. Preprinty IPM im. Keldysha. 2018. No. 107. Access mode: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-107> (date of access: 02.20.2019). (rus)

Information about the authors

Alexander V. Danilov, Junior Researcher. E-mail: 157304@rambler.ru. Moscow State Technical University named after N.E. Bauman. 2-ya, 5/1 Baumanskaya str., Moscow, 105005, Russia.

© Данилов А.В., 2019

Для цитирования:

Данилов А.В. Применение роботизированной руки для аддитивного конструирования скульптурных композиций по прототипу // Технологии аддитивного производства. Т. 1. №4. С. 5–12.

For citation:

Danilov A.V. Application of robotic arm for additive design of sculptural composition using a prototype. Additive Fabrication Technology. 2019. 1(4). Pp. 5–12.