

УДК 621.865.8

DOI: [10.26102/2310-6018/2019.27.4.004](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2019.27.4.004)

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ НЕПРЕРЫВНЫМ РОБОТОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМА FABRIK

**В.В. Данилов<sup>1</sup>, Д.Ю. Колпашиков<sup>2</sup>, Н.В. Лаптев<sup>3</sup>**

*Томский Политехнический Университет, Томск, Россия*

<sup>1</sup>*e-mail: [viacheslav.v.danilov@gmail.com](mailto:viacheslav.v.danilov@gmail.com)*

<sup>2</sup>*e-mail: [dyk1@tpu.ru](mailto:dyk1@tpu.ru)*

<sup>3</sup>*e-mail: [nikitalaptev77@gmail.com](mailto:nikitalaptev77@gmail.com)*

**Резюме:** В настоящее время катетерные хирургические операции стали достаточно востребованными за счёт меньшего срока реабилитации пациентов и меньших рисков при проведении подобных вмешательств. Однако данный вид операций выполняется специалистами вручную, что требует соответствующей подготовки специалиста, а также занимает много времени, и тем самым увеличивая риск врачебной ошибки. Имеющиеся сегодня роботизированные решения, являются дорогими и недоступными для большинства больниц, клиник и медицинских центров. Решением данной проблемы может стать разработка простой автоматизированной системы управления. Применение такой системы позволит увеличить точность, повторяемость, а также снизить риски, связанные с человеческим фактором. Катетер – это манипулятор, который способен изгибаться в любой точке своей структуры. Такая особенность строения позволяет манипуляторам работать в местах со сложной геометрией, в том числе и внутри человеческого организма. В связи с этим, катетеры нашли своё применение в многих сферах, включая медицину и промышленность. Однако управление данным видом роботов осложняется наличием гибких звеньев, стремящихся к бесконечности. За позиционирование и ориентацию непрерывных роботов отвечают алгоритмы прямой и обратной кинематики. Одним из наиболее перспективных подходов является алгоритм обратной кинематики прямого и обратного следования (FABRIK). В связи с этим, в данной работе представлена быстрая и надёжная система автоматического управления непрерывным роботом без обратной связи на основе алгоритма FABRIK.

**Ключевые слова:** непрерывный робот, катетер, автоматизация, позиционирование, FABRIK.

**Для цитирования:** В.В. Данилов, Д.Ю. Колпашиков, Н.В. Лаптев Автоматическое управление непрерывным роботом с использованием алгоритма FABRIK. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2019;7(4). URL: [https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2019/11/DanilovSoavtors\\_4\\_19\\_1.pdf](https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2019/11/DanilovSoavtors_4_19_1.pdf) DOI: 10.26102/2310-6018/2019.27.4.004

## AUTOMATIC CONTROL OF A CONTINUOUS ROBOT USING THE FABRIK ALGORITHM

**V.V. Danilov, D.Y. Kolphashchikov, N.V. Laptev**

*Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia*

**Abstract:** Nowadays transcatheter minimally invasive surgery has gained popularity due to the shorter rehabilitation period of patients and lower risks during such interventions. However, this type of surgery is manually performed by surgeons and clinicians, which requires a high skill of specialists. Additionally, transcatheter surgery takes a lot of time and thereby increases the risk of medical error. The robotic solutions available today are expensive and inaccessible to most hospitals, clinics and medical centers. A solution of this problem may be the development of a simple automated control system, the usage of which will increase accuracy, repeatability, and reduce the risks related to the

human factor. A medical catheter represents a manipulator that can bend in any point of its structure. This structural feature allows these manipulators to work in places with complex geometry, including the anatomical structures of the human body. In this regard, catheters have found their application in many fields, including medicine and industry. However, the control of this type of robots is complicated by the presence of flexible links tending to infinity. For positioning and orientation of continuous robots, forward and inverse kinematics algorithms are used. One of the most promising approaches is the Forward And Backward Reaching Inverse Kinematics algorithm (FABRIK). In this regard, this paper presents a fast and reliable system without feedback and based on the FABRIK algorithm for automatic control of a continuous robot.

**Keywords:** continuous robot, catheter, automation, positioning, FABRIK.

**For citation:** V.V. Danilov, D.Y. Kolpashchikov, N.V. Laptev Automatic Control Of A Continuous Robot Using The Fabrik Algorithm. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2019;7(4). URL: [https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2019/11/DanilovSoavtors\\_4\\_19\\_1.pdf](https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2019/11/DanilovSoavtors_4_19_1.pdf) DOI: 10.26102/2310-6018/2019.27.4.004 (In Russ).

## Введение

Непрерывные роботы – это манипуляторы, чья структура способна непрерывно изгибаться. По сравнению с дискретными жёсткими роботами, которые состоят из конечного числа жёстких звеньев, соединённых между собой шарнирами, непрерывные роботы не содержат жёстких звеньев. Длина звеньев непрерывных роботов стремится к нулю, что обуславливает наличие у них бесконечного числа шарниров [1]. Эта особенность даёт им возможность изгибаться в любой точке структуры, что помогает роботам избегать нежелательных столкновений или огибать препятствия в сложном рабочем пространстве. Благодаря этому достоинству, данные роботы применяются в случаях, когда остановка или разборка устройства по каким-либо причинам нежелательна или невозможна. В промышленности эти роботы применяются для неразрушающего контроля и ремонта газотурбинных двигателей [2] и ядерных реакторов [3]. Другой сферой применения непрерывных роботов являются лазерная резка [4] и инспекция космического оборудования [5]. В медицине они широко используются в качестве эндоскопов и хирургических инструментов для малоинвазивной хирургии [6].

С каждым годом растёт использование роботов для автоматизации выполнения задач в труднодоступных условиях. Подобная популярность развития предопределила вхождение робототехники в концепцию "Индустрия 4.0" [7]. Однако управление инструментами с непрерывной структурой, например, бароскопами или медицинскими катетерами, все ещё осуществляется специалистами вручную, даже если сами устройства частично роботизированы. Из-за человеческого фактора, данным вмешательствам свойственны такие недостатки, как низкая точность и повторяемость, а также отсутствие оптимизации траектории движения инструмента. Подобные недостатки приводят к высоким временным затратам и повышенным рискам при проведении хирургических вмешательств. В связи с этим, автоматизация управления подобными системами позволяет устранить эти недостатки. Однако из-за особенностей непрерывных структур данная задача является сложной и комплексной.

## Материалы и методы

Для автоматизации управления роботами требуется решить задачу обратной кинематики, которая позволяет определить какую конфигурацию нужно принять роботу для того, чтобы его наконечник достиг требуемой позиции и ориентации. В настоящее время существует множество решений задачи обратной кинематики для непрерывных

роботов, описанных в работах [8–10]. Однако большинство из них обладают как минимум одним из следующих недостатков: высокая вычислительная сложность, сингулярность, низкая надёжность, и медленная скорость работы. В 2011 году был реализован алгоритм обратной кинематики прямого и обратного следования FABRIK [11], который лишён описанных выше недостатков. Данный алгоритм был применён для расчёта обратной кинематики непрерывных роботов [12–14]. Результаты симуляций показали, что FABRIK обладает множеством преимуществ по сравнению с широко используемыми алгоритмами на основе матриц Якоби. Он прост, надёжен, относительно быстр и лишён сингулярности.

При выполнении данного исследования оценивалась точность позиционирования и ориентирования двухсекционного непрерывного робота с использованием обратной кинематики на основе алгоритма FABRIK [13]. Кинематическая модель в этом алгоритме основана на подходе постоянной кривой (см. Рисунок 1). Согласно данному подходу, непрерывный робот представляет собой серию дуг с постоянной длиной, плавно переходящих друг в друга. Однако алгоритм FABRIK предназначен для работы только с роботами, состоящими из жёстких звеньев, соединённых между собой шарнирами. Поэтому для того, чтобы применить алгоритм FABRIK на непрерывных роботах, каждая дуга секции изгиба заменена на виртуальное жёсткое звено – хорду. Хорды соединяют начало и конец секции изгиба. Поскольку хорды могут иметь любое взаимное пространственное расположение, предполагается, что виртуальные звенья связаны сферическими шарнирами.

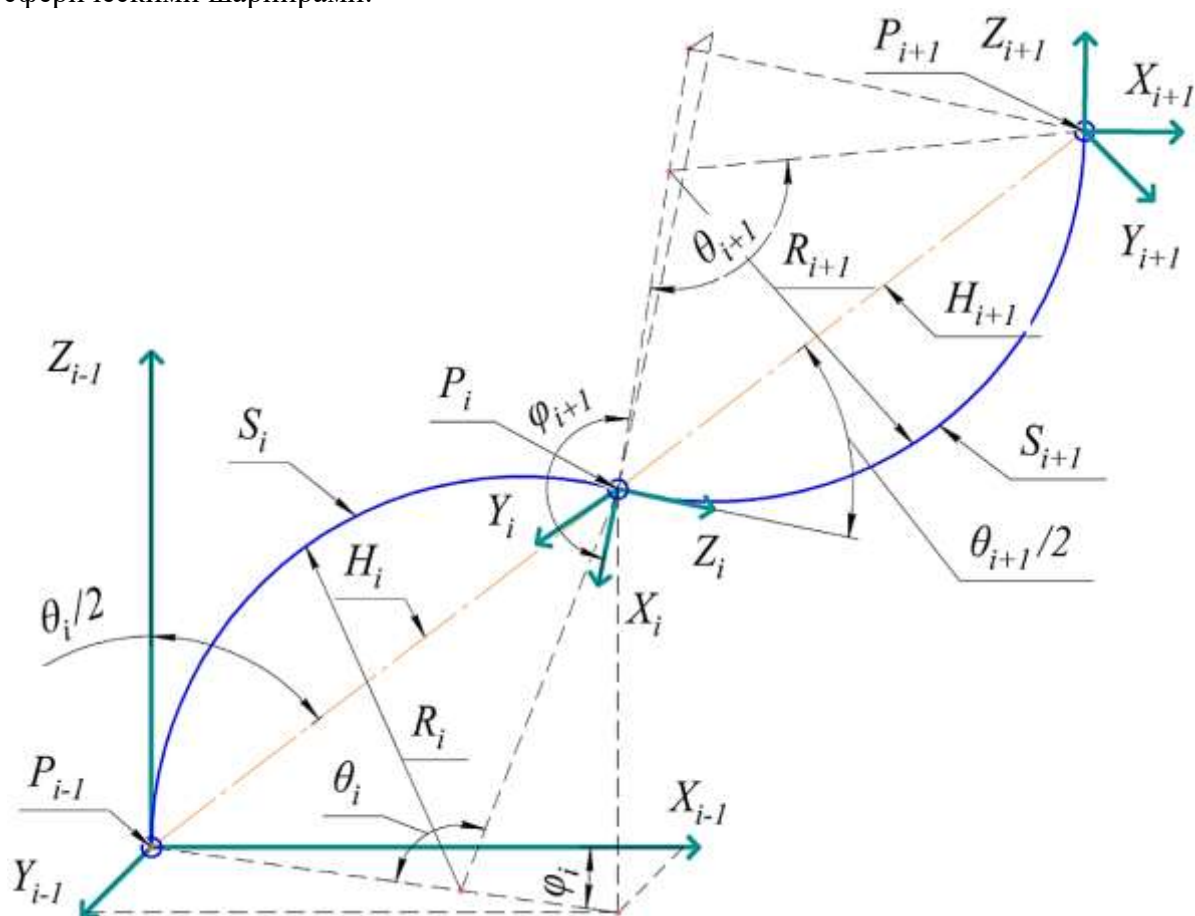
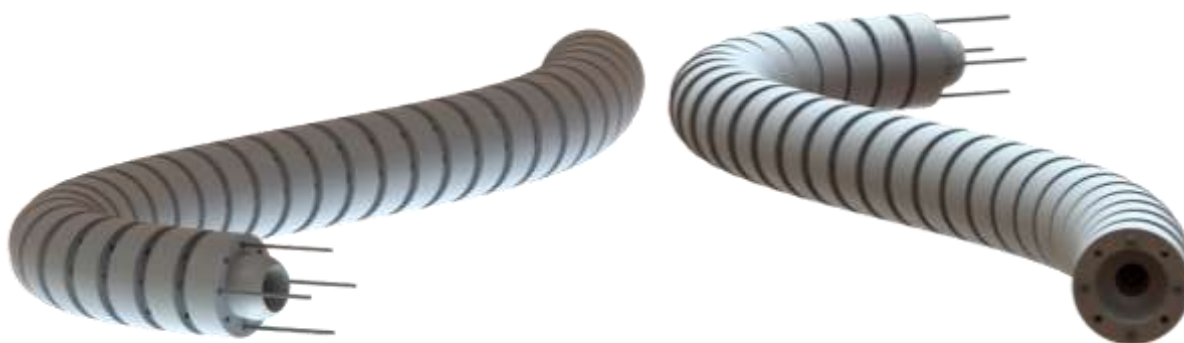


Рисунок 1 – Схема изгиба непрерывного манипулятора

При решении задачи обратной кинематики алгоритм FABRIK находит окончательное решение за несколько итераций. Каждая итерации состоит из этапов

прямого и обратного следования, а также подстройки ориентации наконечника. Как описано в работе [11], на этапе прямого следования алгоритм работает с виртуальными звеньями. В свою очередь, согласно исследованию [1], на этапе обратного следования из виртуальных звеньев с помощью прямой и обратной кинематики для одной секции восстанавливаются дуги, а также определяются положение и ориентация наконечника непрерывного робота. Затем определяется угол между полученной и заданной ориентацией манипулятора. Если угол превышает допустимый, последнее виртуальное звено робота поворачивается так, чтобы требуемая и заданная ориентации совпали, тем самым делая ошибку минимальной (см. работу [13]). Дополнительно алгоритм оценивает расстояние между полученным положением наконечника и указанным в модели. Алгоритм проводит итерации до тех пор, пока разница между заданными и рассчитанными ориентацией и положением дистального конца катетера превышает значения погрешностей, заданных пользователем.

Для проведения эксперимента был использован двухсекционный непрерывный робот, представленный в исследовании [15]. Робот состоит из непрерывной эластичной структуры, на которую установлены сферические шарниры (см. Рисунок 2). В шарнирах проделаны отверстия для размещения нитей-актуаторов. Данные нити установлены на шаговые двигатели. При натяжении шаговым двигателем одной из нитей, непрерывный робот совершает нецентральный изгиб. Пространственный изгиб одной секции робота обеспечивается за счёт четырёх нитей. Нити первой секции закреплены на середине робота, а нити второй секции – на его кончике. Подобное закрепление нитей позволяет независимо управлять обеими секциями робота. Благодаря использованию шарико-винтовой пары, робот имеет возможность совершать линейные перемещения.



(а) Вид со стороны актуаторов

(б) Вид со стороны наконечника

Рисунок 2 – 3D модель гибкого манипулятора

Для контроля положения и ориентации непрерывного робота были использованы алгоритмы машинного зрения. Исходные данные собирались двумя камерами Logitech C922 Pro с разрешением 1980x1080. Данные камеры расположены под углом 90° друг к другу, что позволяет получать изображения робота в двух плоскостях и в дальнейшем даёт стереоскопический эффект. С помощью алгоритмов обработки изображения на исходных графических данных выделяется маска робота. Затем определяется средняя линия маски. Для каждого полученного набора точек производится поиск координат в трехмерном пространстве, после чего наборы точек совмещаются в одну среднюю линию робота в трёхмерном пространстве. По данной линии определяется положение робота, конфигурация и направление дистального конца катетера. Оценка точности и повторяемости перемещения гибкого манипулятора производилась следующим образом: наконечник непрерывного робота перемещался по заранее заданной трёхмерной

траектории, состоящей из 21 точки. С помощью алгоритмов обратной кинематики были рассчитаны различные конфигурации катетера, подходящие для заданных координат и ориентации. Эксперименты по прохождению роботом траектории были выполнены 7 раз. Расчётная и действительная траектории робота представлены на Рисунке 3.

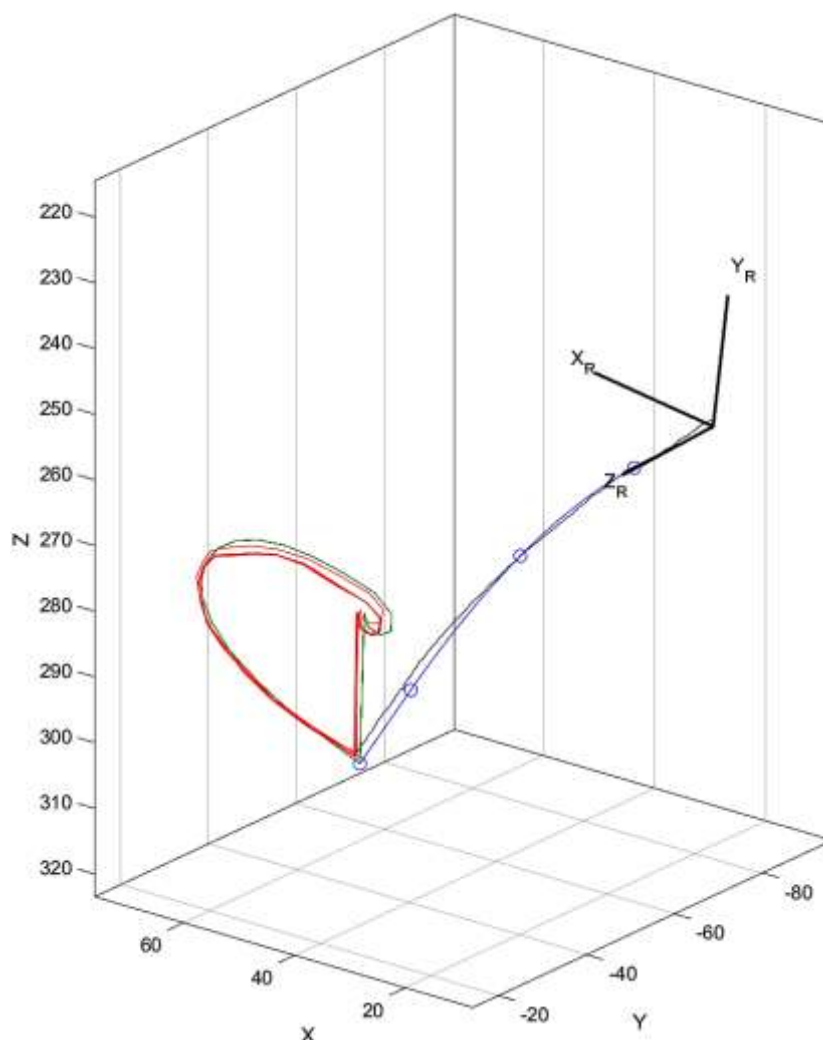
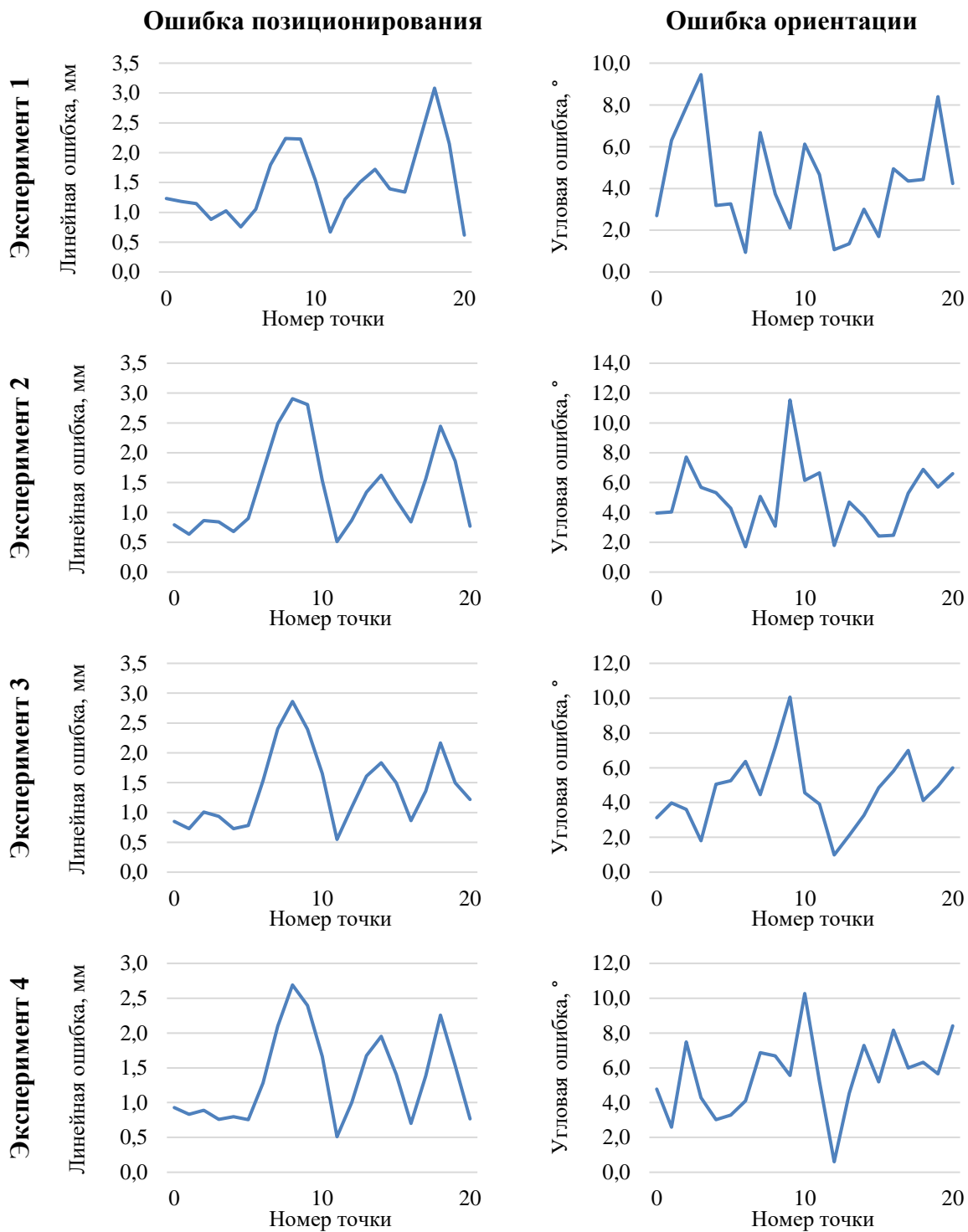


Рисунок 3 – Расчётная траектория (зелёная линия); действительная траектория (красная линия); расчётный скелет робота (синяя линия); скелет робота, обнаруженный машинный зрением (чёрная линия)

### Результаты исследований и обсуждение

При проведении экспериментов были оценены ошибки позиционирования и ориентации, отражённые на Рисунке 4. Ошибка позиционирования представляет собой расстояние между расчётным и действительным положениями наконечника. В свою очередь, ошибкой ориентации является угол между расчётным и действительным вектором ориентации наконечника.





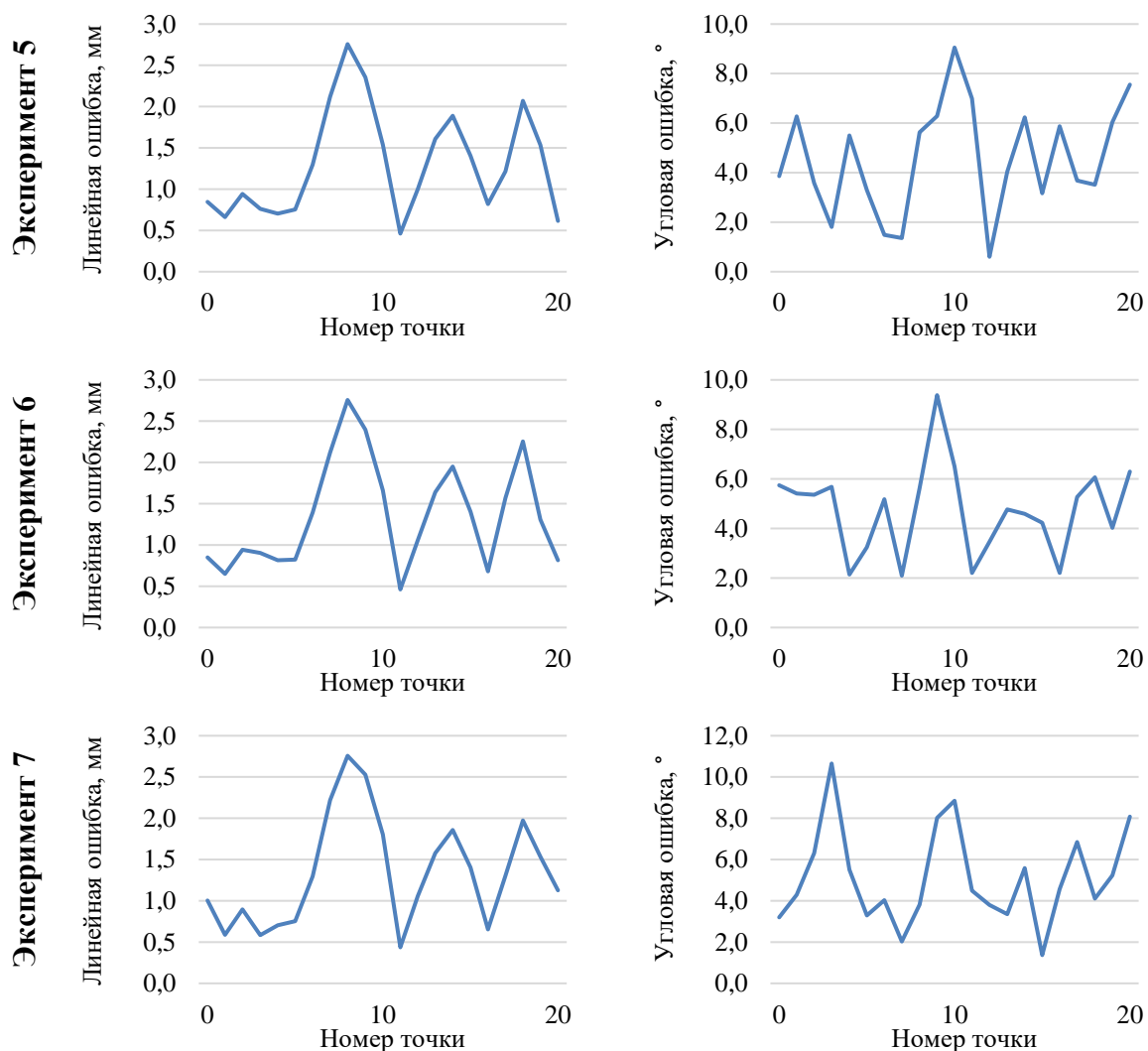


Рисунок 4 – Ошибки позиционирования (а) и ориентации (б) при проведении экспериментов

При проведении визуального анализа можно утверждать, что алгоритм обладает высокой степенью повторяемости и воспроизводимости. Однако, стоит отметить незначительные отличия ошибки ориентации на первом эксперименте. Подобные отличия связаны с высокой первичной ошибкой калибровки, первичным натяжением актуаторов и зазорами в сборке гибкого манипулятора. В ходе экспериментов были определены значения ошибок позиционирования и ориентации, которые отражены в Таблице 1.

На основании полученных результатов линейная ошибка позиционирования составила  $1.4 \pm 0.6$  мм., а угловая ошибка позиционирования –  $4.8 \pm 2.2^\circ$ . В свою очередь, среднеквадратичное отклонение (RMSE) для линейной и угловой ошибок составило 1.5 мм. и  $5.3^\circ$  соответственно. Следует отметить, что линейная и угловая ошибки могут варьироваться в широких пределах. Последнее связано с накоплением ошибок, таких как погрешность изготовления и сборки гибкого манипулятора, погрешность калибровки и так далее. Таким образом, используя обратную кинематику на основе алгоритма FABRIK, управление непрерывным робот может быть автоматизировано для проведения хирургических операций.

Таблица 1 – Оценка значений ошибки по экспериментам

Эксперимент	Линейная ошибка, мм	Угловая ошибка, °
1	1,5±0,7	4,3±2,1
2	1,4±0,7	5,0±2,3
3	1,4±0,6	4,7±2,0
4	1,3±0,6	5,5±2,2
5	1,3±0,6	4,6±2,2
6	1,4±0,6	4,7±1,8
7	1,3±0,7	5,1±2,3
Обобщённое среднее	1,4±0,6	4,8±2,2

### Заключение

В работе проведена оценка угловой и линейной ошибок позиционирования непрерывного робота при автоматизированном управлении. Для этого была решена задача обратной кинематики, основанной на алгоритме FABRIK. В свою очередь, это позволило определить требуемую конфигурацию робота, чтобы его наконечник достиг требуемой нужной позиции и ориентации с минимальной погрешностью.

Проведённые эксперименты подтверждают работоспособность автоматизированной системы. В ходе данных экспериментов были получены результаты по нахождению величины линейной и угловой ошибок позиционирования наконечника катетера. Результаты исследования показали работоспособность данной автоматизированной системы управления, основанной на алгоритме FABRIK. В дальнейшем планируется увеличить точность позиционирования дистального конца катетера с помощью внедрения обратной связи, улучшением методов калибровки и разработки новых конструкций гибкого манипулятора.

*Данная работа выполнена в рамках государственного задания «Наука» № 17.8205.2017/БЧ (дополнительный номер: 4.1769.ГЗБ.2017).*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Walker I.D. Continuous Backbone Continuum Robot Manipulators . *ISRN Robotics*. 2013;2013:1–19. DOI: 10.5402/2013/726506 .
2. Dong X., Axinte D., Palmer D., Cobos S., Raffles M., Rabani A., Kell J. Development of a slender continuum robotic system for on-wing inspection/repair of gas turbine engines. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2017;44:218–229. DOI:10.1016/j.rcim.2016.09.004 .
3. Buckingham R., Graham A. Nuclear snake-arm robots. *Ind. Robot An Int. J.* 2012;39(1):6–11.
4. Mehling J.S., Diftler M.A., Chu M., Valvo M. A Minimally Invasive Tendril Robot for In-Space Inspection. *The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*. 2006. BioRob 2006., Pisa, 2006; 2006: 690-695. DOI: 10.1109/BIOROB.2006.1639170



5. LaserSnake versus Dragon. *OCRobotics*. URL: <http://www.ocrobotics.com/news/lasersnake-versus-dragon/> (дата обращения: 26.09.2019).
6. Burgner-Kahrs J., Rucker D.C., Choset H. Continuum Robots for Medical Applications: A Survey. *IEEE Transactions on Robotics* 2015;31(6):1261–1280. DOI: 10.1109/TRO.2015.2489500
7. Galin R., Meshcheryakov R. Automation and robotics in the context of Industry 4.0: The shift to collaborative robots. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Institute of Physics Publishing*. 2019;537(3). DOI: 10.1088/1757-899X/537/3/032073
8. Jones B.A., Walker I.D Kinematics for multisection continuum robots. *IEEE Transactions on Robotics*, 2006;22(1):43-55 DOI: 10.1109/TRO.2005.861458
9. Zheng L., Liao W., Hongliang R., Haoyong Y. Kinematic comparison of surgical tendon-driven manipulators and concentric tube manipulators, *Mechanism and Machine Theory, Elsevier Ltd*. 2017;107:148–165. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2016.09.018.
10. S. Neppalli, M.A. Csencsits, B.A. Jones, I. D. Walker. Closed-form inverse kinematics for continuum manipulators. *Advanced Robotics*. 2009;23(15):2077–2091. DOI: 10.1163/016918609X12529299964101.
11. Aristidou A., Lasenby J. FABRIK: A fast, iterative solver for the Inverse Kinematics problem. *Graph. Models. Elsevier Inc*. 2011;73(5):243–260.
12. Zhang W., Yang Z., Dong T., Xu K. FABRIKc: an Efficient Iterative Inverse Kinematics Solver for Continuum Robots. *2018 IEEE/ASME Int. Conf. Adv. Intell. Mechatronics. IEEE*, 2018; c. 346–352. DOI: 10.1109/AIM.2018.8452693
13. Kolpashchikov D.Y., Laptev N.V., Danilov V.V., Skirnevskiy I.P., Manakov R.A., Gerget O.M. FABRIK-Based Inverse Kinematics for Multi-Section Continuum Robots. Proceedings of the 2018 18th International Conference on Mechatronics - Mechatronika, ME 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. 2019. 8624888. (Proceedings of the 2018 18th International Conference on Mechatronics - Mechatronika, ME 2018).
14. Kolpashchikov D. et al. Inverse Kinematics for Steerable Concentric Continuum Robots. *Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings". Smart Innovation, Systems and Technologies. Singapore: Springer*. 2019;154:89–100. DOI:10.1007/978-981-13-9267-2\_8.
15. Li Z., Du R. Design and analysis of a bio-inspired wire-driven multi-section flexible robot: Regular paper. *Int. J. Adv. Robot. Syst*. 2013;10.

## REFERENCES

1. Walker I.D. Continuous Backbone Continuum Robot Manipulators . *ISRN Robotics*. 2013;2013:1–19. DOI: 10.5402/2013/726506 .
2. Dong X., Axinte D., Palmer D., Cobos S., Raffles M., Rabani A., Kell J. Development of a slender continuum robotic system for on-wing inspection/repair of gas turbine engines. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2017;44:218–229. DOI:10.1016/j.rcim.2016.09.004 .
3. Buckingham R., Graham A. Nuclear snake-arm robots. *Ind. Robot An Int. J*. 2012;39(1):6–11.
4. Mehling J.S., Diftler M.A., Chu M., Valvo M. A Minimally Invasive Tendril Robot for In-Space Inspection. *The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*. 2006. BioRob 2006., Pisa, 2006; 2006: 690-695. DOI: 10.1109/BIOROB.2006.1639170

5. LaserSnake versus Dragon. *OCRobotics*. URL: <http://www.ocrobotics.com/news/lasersnake-versus-dragon/>(date of access: 26.09.2019). Burgner-Kahrs J., Rucker D.C., Choset H. Continuum Robots for Medical Applications: A Survey. *IEEE Trans. Robot.* 2015;31(6):1261–1280.
6. Galin R., Meshcheryakov R. Automation and robotics in the context of Industry 4.0: The shift to collaborative robots. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Institute of Physics Publishing.* 2019;537(3).
7. Jones B.A., Walker I.D Kinematics for multisection continuum robots. *IEEE Transactions on Robotics*, 2006;22(1):43-55 DOI: 10.1109/TRO.2005.861458
8. Zheng L., Liao W., Hongliang R., Haoyong Y. Kinematic comparison of surgical tendon-driven manipulators and concentric tube manipulators, *Mechanism and Machine Theory, Elsevier Ltd.* 2017;107:148–165. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2016.09.018.
9. S. Neppalli, M.A. Csencsits, B.A. Jones, I. D. Walker. Closed-form inverse kinematics for continuum manipulators. *Advanced Robotics.* 2009;23(15):2077–2091. DOI: 10.1163/016918609X12529299964101.
10. Aristidou A., Lasenby J. FABRIK: A fast, iterative solver for the Inverse Kinematics problem. *Graph. Models. Elsevier Inc.* 2011;73(5):243–260.
11. Zhang W., Yang Z., Dong T., Xu K. FABRIKc: an Efficient Iterative Inverse Kinematics Solver for Continuum Robots. *2018 IEEE/ASME Int. Conf. Adv. Intell. Mechatronics. IEEE*, 2018; с. 346–352. DOI: 10.1109/AIM.2018.8452693
12. Kolpashchikov D.Y., Laptev N.V., Danilov V.V., Skirnevskiy I.P., Manakov R.A., Gerget O.M. FABRIK-Based Inverse Kinematics for Multi-Section Continuum Robots. Proceedings of the 2018 18th International Conference on Mechatronics - Mechatronika, ME 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. 2019. 8624888. (Proceedings of the 2018 18th International Conference on Mechatronics - Mechatronika, ME 2018).
13. Kolpashchikov D. et al. Inverse Kinematics for Steerable Concentric Continuum Robots. *Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings". Smart Innovation, Systems and Technologies. Singapore: Springer.* 2019;154:89–100. DOI:10.1007/978-981-13-9267-2\_8.
14. Li Z., Du R. Design and analysis of a bio-inspired wire-driven multi-section flexible robot: Regular paper. *Int. J. Adv. Robot. Syst.* 2013;10.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Данилов Вячеслав Владимирович**, инженер лаборатории дизайна медицинских изделий Томского Политехнического Университета, Томск, Российская Федерация  
ORCID: 0000-0002-1413-1381

**Danilov V.V.**, Engineer, Medical Product Design Laboratory, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

**Лаптев Никита Витальевич**, аспирант Томского Политехнического университета, инженер лаборатории дизайна медицинских изделий Томского Политехнического Университета, Томск, Российская Федерация.  
ORCID: 0000-0003-0709-9974

**Laptev N.V.**, P.G. of Tomsk Polytechnic University, engineer of the medical device design laboratory Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

**Колпашиков Дмитрий Юрьевич**,  
аспирант Томского Политехнического  
университета, инженер лаборатории  
дизайна медицинских изделий Томского  
Политехнического Университета, Томск,  
Российская Федерация.  
ORCID: 0000-0001-8915-0918

**Kolpashchikov D.Y.**, P.G. of Tomsk  
Polytechnic University, engineer of the medical  
device design laboratory Tomsk Polytechnic  
University, Tomsk, Russian Federation