

КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ И ИНФОРМАТИКА

Научная статья

УДК 610.28:621.865.8:531.8

DOI: 10.17072/1993-0550-2025-4-76-86

<https://elibrary.ru/nfpfrh>



**Моделирование кинематики медицинского
манипуляционного робота типа SCARA
с учетом непараллельности осей вращения
и мануального рабочего органа
с четырьмя степенями свободы**

Дмитрий Борисович Смирнов¹, Илья Александрович Фролов²,
Андрей Александрович Воротников³, Андрей Анатольевич Гринь⁴,
Олег Валерьевич Левченко⁵

^{1,2,3,4,5}ФГБОУ ВО "Российский Университет Медицины" Минздрава России НИИ "ТЕХНОБИО-МЕД", Москва, Россия

⁴Научное отделение неотложной нейрохирургии НИИ СП им. Н. В. Склифосовского, Москва, Россия

⁴Департамент здравоохранения города Москвы, Москва, Россия

¹smirnov2000.dmitry@yandex.ru

²frol.451@yandex.ru

³aavorotnikov90@gmail.com

⁴aagreen@yandex.ru

⁵levchenko-ov@msmsu.ru

Аннотация. В работе представлен кинематический анализ двухзвенного манипуляционного робота типа SCARA с учетом непараллельности осей и мануального рабочего органа с четырьмя степенями свободы. Построена кинематическая модель с учетом рабочего органа, решена обратная задача кинематики. Рассмотрен пример медицинского манипуляционного робота для применения полученной модели в проведении операции по транспедикулярной фиксации позвоночника.

Ключевые слова: медицинский манипуляционный робот; кинематический анализ; непараллельность осей; обратная задача кинематики.

Для цитирования: Смирнов Д. Б., Фролов И. А., Воротников А. А., Гринь А. А., Левченко О. В. Моделирование кинематики медицинского манипуляционного робота типа SCARA с учетом непараллельности осей вращения и мануального рабочего органа с четырьмя степенями свободы // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. 2025. № 4(70). С. 76–86. DOI: 10.17072/1993-0550-2025-4-76-86. <https://elibrary.ru/nfpfrh>.



© 2025 Смирнов Д. Б., Фролов И. А., Воротников А. А., Гринь А. А., Левченко О. В. Лицензировано по CC BY 4.0. Чтобы ознакомиться с условиями этой лицензии, посетите сайт <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке ФГБОУ ВО "Российский Университет Медицины" Минздрава России.

Статья поступила в редакцию 15.09.2025; одобрена после рецензирования 15.11.2025; принята к публикации 08.12.2025.

COMPUTER SCIENCE

Research article

Kinematic Modeling of a SCARA-Type Medical Manipulation Robot Accounting for Non-Parallelism of Rotational Axes and a Manual End-Effector With Four Degrees of Freedom

Dmitry B. Smirnov¹, Ilya A. Frolov², Andrey A. Vorotnikov³, Andrey A. Grin⁴, Oleg V. Levchenko⁵

^{1,2,3,4,5}FSBEI HE "ROSUNIMED" of MOH of Russia, Research Institute "TECHNOBIOMED", Moscow, Russia

⁴N. V. Sklifosovsky Research Institute for Emergency Medicine of Health Department of Moscow, Moscow, Russia

⁴Department of Healthcare of Moscow City, Moscow, Russia

¹smirnov2000.dmitry@yandex.ru

²frol.451@yandex.ru

³aavorotnikov90@gmail.com

⁴aagreen@yandex.ru

⁵levchenko-ov@msmsu.ru

Abstract. This paper presents a kinematic analysis of a two-joint SCARA-type medical manipulation robot, accounting for non-parallelism of the rotational axes and incorporating a manual end-effector with four degrees of freedom. A kinematic model integrating the end-effector is developed, and the inverse kinematics problem is solved. The proposed approach is demonstrated on a medical manipulation robot designed for transpedicular spinal fixation procedures.

Keywords: *medical manipulation robot; kinematic analysis; non-parallel axes; inverse kinematics problem (IKP).*

For citation: Smirnov, D. B., Frolov, I. A., Vorotnikov, A. A., Grin', A. A. and Levchenko, O. V. (2025), "Kinematic Modeling of a SCARA-Type Medical Manipulation Robot Accounting for Non-Parallelism of Rotational Axes and a Manual End-Effector With Four Degrees of Freedom", *Bulletin of Perm University. Mathematics. Mechanics. Computer Science*, no 4(70), pp. 76–86, DOI: 10.17072/1993-0550-2025-4-76-86, <https://elibrary.ru/nfpfrh>.

Acknowledgments: the study was carried out with financial support by the FSBEI HE "ROSUNIMED" OF MOH OF RUSSIA.

The article was submitted 15.09.2025; approved after reviewing 15.11.2025; accepted for publication 08.12.2025.

Введение

Роботы обладают геометрическими погрешностями, которые являются следствием неточного изготовления деталей и сборке узлов. Для компенсации данных погрешностей могут применяться различные методы калибровки (например, с использованием оптических измерительных систем, таких как лазерный трекер) [1]. Традиционные модели, не

учитывающие фактические длины звеньев и их относительное расположение, не пригодны для задач медицинской робототехники.

Вопрос сравнения движений хирурга и роботизированной системы активно исследуется в последние годы. В работах [2–5] показано, что роботизированные комплексы обеспечивают сравнительно лучшие показатели по критериям скорости резания, отклонения от заданной траектории и повторяемости движений. Однако эти исследования сосредоточены на полностью активных системах. В случае гибридных архитектур, сочетающих роботизированное позиционирование с мануальным введением инструмента, подобные критерии требуют пересмотра, поскольку финальная фаза вмешательства остается под контролем хирурга.

В настоящее время существуют решения, где робот управляется хирургом с помощью удаленного пульта управления [6, 7]. Также в современных роботизированных системах для транспедикулярной фиксации, таких как ROSA Spine, ExcelsiusGPS и Mazor X, робот выполняет точное позиционирование направляющей втулки в соответствии с предоперационным планом, после чего хирург вручную вводит инструмент или винт по заданной траектории [8–10]. Здесь же предлагается несколько иной подход, где ориентация задается не роботом программно, а хирургом мануально.

В данной работе рассматривается двухзвенный манипуляционный робот типа SCARA, модифицированный для медицинских задач, с явным учетом непараллельности осей вращения звеньев – фактора, обычно, игнорируемого в традиционных моделях. Особое внимание уделяется интеграции мануального рабочего органа, устанавливаемого через сферический шарнир, который позволяет осуществлять ориентирование рабочего органа вручную, что особенно ценно в условиях операционной.

Целью настоящей работы является разработка и верификация алгоритма решения обратной задачи кинематики (ОЗК) для указанной системы с учетом относительного расположения звеньев и мануального рабочего органа.

Описание конструкции медицинского манипуляционного робота

В данной работе рассматривается медицинский манипуляционный робот, который обладает четырьмя степенями подвижности, предназначенный для проведения операций по транспедикулярной фиксации позвоночника. Его конструкция приведена на рис. 1. Первая и вторая степени подвижности используются для позиционирования в плоскости перпендикулярной оси вращения первого звена, третья и четвертая – для ориентации рабочего органа. Введение хирургического инструмента обеспечивается хирургом мануально в целях повышения безопасности пациента.

С целью упрощения управления и позиционирования манипулятора предлагается не использовать третью и четвертую степени подвижности, с фокусом на первых двух. Так как на механический интерфейс устанавливается рабочий орган со сферическим шарниром, обеспечивающий три степени свободы для задания требуемой ориентации инструменту. Это компенсирует неиспользование третьей и четвертой степеней подвижности. Подобный подход позволяет использовать упрощенную кинематическую модель в виде двухзвенного манипулятора с непараллельностью осей.

Кинематическая модель двухзвенного манипуляционного робота с учетом непараллельности осей вращения

Представлена модифицированная кинематическая схема SCARA-манипулятора, где ось вращения второго звена наклонена под углом α относительно оси первого звена на

рис. 2. Поскольку первая ось вращения также может быть наклонена относительно вертикали вследствие особенности конструкции (погрешности установки и/или изготовления), то этот случай математически эквивалентен повороту всей мировой системы координат. Для направления оси вращения первого звена $n1$ по z .

Ввиду этого рассматривается упрощенная модель с наклоном второй оси $n2$ относительно $n1$ (на углы α, β ($n1$ и $n2$ скрещивающиеся прямые)). Центр первого звена находится в точке $P0$, длина первого и второго звена: $l1$ и $l2$ соответственно; $q1$ и $q2$ – обобщенные координаты.

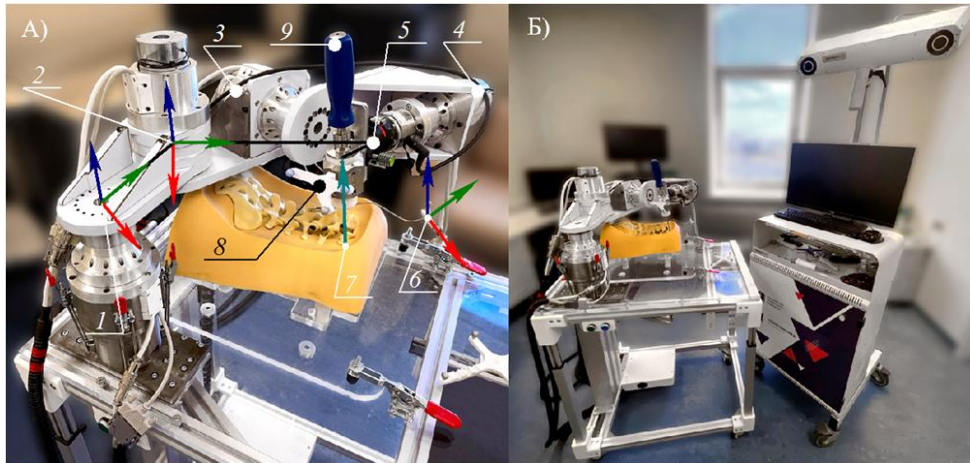


Рис. 1. А) медицинский манипуляционный робот с четырьмя степенями подвижности: 1 – первая степень подвижности, 2 – вторая, 3 – третья, 4 – четвертая, 5 – сферический шарнир (часть рабочего органа), 6 – мировая система координат (рамка, закрепленная на позвонке), 7 – целевое положение на фантоме с заданной ориентацией, 8 – рамка со светоотражающими маркерами для определения ориентации и положения с помощью навигационной системы, 9 – инструмент, установленный в рабочем органе.

Б) Общий вид системы для проведения хирургических операций по транспедикулярной фиксации позвоночника: медицинский манипуляционный робот закреплен на столе, справа от него – навигационная система

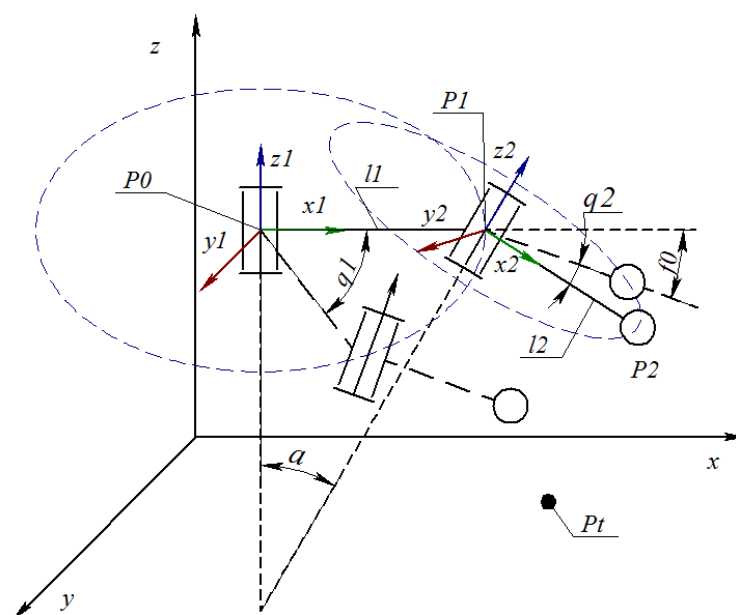


Рис. 2. Кинематическая схема двухзвенового манипулятора с наклонной осью вращения

При $q1 = 0$ первое звено направлено вдоль оси X . Положение второго шарнира можно выразить как:

$$P1(q1) = P0 + l1 \begin{bmatrix} \cos(q1) \\ \sin(q1) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $P0 = [x0, y0, z0]^T$.

С вращением первого звена вектор вращения второго звена будет также изменяться:

$$n2(q1) = \begin{bmatrix} \sin(a) \cos(q1 + f0) \\ \sin(a) \sin(q1 + f0) \\ \cos(a) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Начальное направление второго звена (при $q2 = 0$):

$$j2 = \begin{bmatrix} \cos(a) \cos(q1 + f0) \\ \cos(a) \sin(q1 + f0) \\ -\sin(a) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Положение конца второго звена может быть выражено с использованием формул (1)–(3):

$$P2 = P1(q1) + l2 \cdot j2(q1, q2), \quad (4)$$

где

$$j2(q1, q2) = \cos(q2) \cdot j2 + \sin(q2) \cdot (n2(q1) \times j2),$$

$$n2(q1) \times j2 = \begin{bmatrix} -\sin(q1 + f0) \\ \cos(q1 + f0) \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Обратная задача кинематики (ОЗК) для двухзвенного манипулятора с наклонной осью вращения второго звена. Для решения ОЗК используется формула для концевой точки $P2$, выведенная ранее (4). Для этого необходимо решить систему уравнений:

$$\begin{cases} x = x0 + l1 \cos(q1) + l2(\cos(q2) \cos(a) \cos(q1 + f0) - \sin(q2) \sin(q1 + f0)) \\ y = y0 + l1 \sin(q1) + l2(\cos(q2) \cos(a) \sin(q1 + f0) + \sin(q2) \cos(q1 + f0)) \\ z = z0 - l2 \cos(q2) \sin(a) \end{cases}. \quad (5)$$

Из последнего уравнения системы находим $q2$:

$$q2 = \arccos\left(\frac{z0 - z}{l2 \sin(a)}\right). \quad (6)$$

Обозначим $\phi = q_1 + f_0$, тогда система (5) примет вид:

$$\begin{cases} A = U \cos(\phi) + V \sin(\phi) \\ B = -V \cos(\phi) + U \sin(\phi) \\ \arccos\left(\frac{z_0 - z}{l_2 \sin(\alpha)}\right) \end{cases}, \quad (7)$$

где

$$\cos(\phi - f_0) = \cos(\phi) \cos(f_0) + \sin(\phi) \sin(f_0),$$

$$\sin(\phi - f_0) = \sin(\phi) \cos(f_0) - \cos(\phi) \sin(f_0),$$

$$A = x - x_0,$$

$$B = y - y_0,$$

$$U = l_1 \cos(f_0) + l_2 \cos(q_2) \cos(\alpha),$$

$$V = l_1 \sin(f_0) - l_2 \sin(q_2).$$

Тогда

$$q_1 = \arctan\left(\frac{UB+AV}{AU-BV}\right) - f_0. \quad (8)$$

Мануальный рабочий орган: геометрическая декомпозиция

Поскольку мануальный рабочий орган вводится хирургом вручную, его выдвижение, ориентация могут быть выставлены до перемещения робота с помощью навигационной системы. Это возможно, так как целевая ориентация, положение конца рабочего органа, а также глубина погружения винта предопределены в ходе планирования. Это позволяет декомпозировать задачу.

На рисунке 3 представлена кинематическая схема мануального рабочего органа. Расстояние d между центром сферического шарнира и осью направляющей может быть определено экспериментально с использованием оптической навигационной системы: для этого регистрируются координаты двух точек, лежащих на оси направляющей, после чего вычисляется расстояние от центра шарнира до полученной прямой.

Поскольку на этапе предоперационного планирования заданы целевая точка P_t , единичный вектор требуемой ориентации инструмента \mathbf{v} , а также расстояние d , задача сводится к однозначному определению положения точки P_2 точки крепления рабочего органа к манипулятору. Эта точка вычисляется геометрически как положение, из которого инструмент, ориентированный вдоль \mathbf{v} и проходящий через направляющую, достигает целевой точки P_t .

Исходя из этого, можно однозначно получить точку P_2 . Используя рис. 3, имеем:

$$P_2 = P_t - d \cdot dv - lt \cdot v. \quad (9)$$

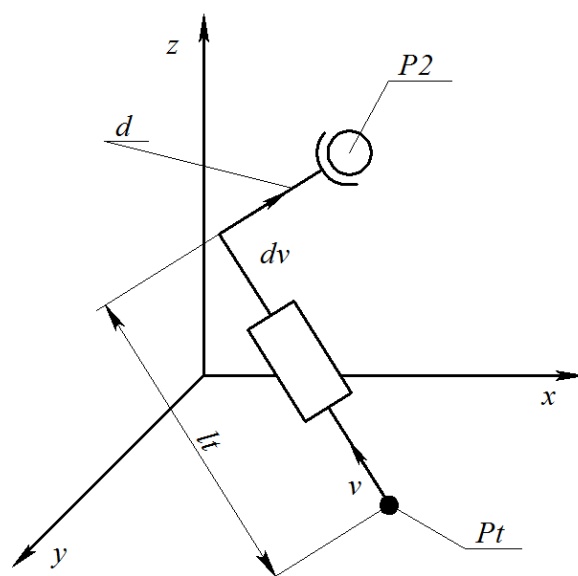


Рис. 3. Кинематическая схема мануального рабочего органа с четырьмя степенями свободы

Использование полученной модели для медицинского манипуляционного робота. Идентификация начальных параметров

Для определения фактических длин звеньев l_1 , l_2 и направления осей вращения n_1 , n_2 необходимо последовательно вращать звенья, собирая точки с помощью навигационной системы с меток, расположенных на рамке 8 на рис. 1 А). После того как точки получены, проводится аппроксимация плоскостями для каждой оси вращения, что позволяет определить направление векторов осей вращения. Далее аппроксимация окружностью, например, методом наименьших квадратов (МНК) [11, 12]. После чего можно определить центр основания P_0 и длины звеньев (l_1 , l_2).

Центр сферического шарнира определяется экспериментально. Для этого мануальный рабочий орган освобождается от фиксации, после чего в четырех и более различных положениях регистрируются координаты маркеров на рамке 8, с использованием оптической навигационной системы. Полученное множество точек аппроксимируется сферой методом наименьших квадратов; ее центр принимается за центр сферического шарнира.

Определение взаимного расположения направляющей и центра сферического шарнира определяется следующим образом: по двум положениям фиксации рабочего органа вдоль направляющей строится прямая, задающая ориентацию направляющей в пространстве, что позволяет установить её геометрическую связь с центром сферического шарнира. По двум положениям фиксации рабочего органа вдоль направляющей строится прямая, задающая ориентацию направляющей в пространстве, что позволяет установить её геометрическую связь с центром сферического шарнира.

Информация о целевой точке, требуемой ориентации инструмента и глубине его введения формируется хирургом на этапе предоперационного планирования на основе данных компьютерной томографии. Интраоперационная привязка плана к анатомии пациента осуществляется с помощью оптической навигационной системы, обеспечивающей отображение отклонений текущего положения инструмента от запланированной траектории.

Общий алгоритм применения предложенного метода включает следующие этапы:

1. Идентификация кинематических параметров манипулятора: определение длин звеньев, направлений осей вращения и положения основания с использованием навигационной системы.
2. Идентификация геометрии рабочего органа: определение центра сферического шарнира и ориентации направляющей.
3. Задание целевой конфигурации инструмента: установка требуемой ориентации и глубины выдвижения на основе предоперационного плана.
4. Расчет обобщенных координат манипулятора: решение обратной задачи кинематики и извлечение инструмента из направляющей для безопасного перемещения.
5. Позиционирование манипулятора: перемещение в расчетное положение.
6. Выполнение хирургической манипуляции: повторное введение инструмента в направляющую и его ручное введение в тело пациента в соответствии с запланированной траекторией.

Заключение

В работе предложена и верифицирована кинематическая модель двухзвенного медицинского манипуляционного робота типа SCARA, учитывающая реальные геометрические особенности конструкции. Особенностью предложенной архитектуры является интеграция мануального рабочего органа, закрепленного на сферическом шарнире, обеспечивающем три степени свободы для ручной ориентации инструмента. Разработанный алгоритм решения обратной задачи кинематики учитывает, как геометрию манипулятора с непараллельными осями, так и параметры мануального инструмента, определяемые с использованием оптической навигационной системы. Процедура идентификации геометрических параметров, включая длины звеньев, направления осей вращения, положение центра сферического шарнира и ориентацию направляющей, реализована экспериментально и основана на стандартных методах аппроксимации (метод наименьших квадратов).

Список источников

1. *Nubiola A., Bonev I. A.* Absolute calibration of an ABB IRB 1600 robot using a laser tracker // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2013. Vol. 29, № 1. P. 236–245. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2012.06.004> (дата обращения: 23.08.2025).
2. *Chunikhin A. A., Bazikyan E. A., Poduraev Yu. A.* и др. Comparative experimental assessment of the accuracy of nanosecond laser surgery of the oral cavity when the instrument is moved by a robotic complex and a surgeon // *Russian Open Medical Journal*. 2019. Vol. 8, № 3. Art. e0307. URL: <https://doi.org/10.15275/rusomj.2019.0307> (дата обращения: 23.08.2025).
3. *Vorotnikov A. A., Buinov M. A., Bushuev S. V.* и др. Standard deviation from the average cutting velocity as a criterion for comparing robot trajectories and manual movements of a doctor for performing surgical operations in maxillofacial surgery // *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. 2018. Vol. 7, № 3. P. 319–323. URL: <https://doi.org/10.18178/ijmerr.7.3.319-323> (дата обращения: 23.08.2025).
4. *Vorotnikov A. A., Klimov D. D., Melnichenko E. A.* и др. Criteria for comparison of robot movement trajectories and manual movements of a doctor for performing maxillofacial surgeries // *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. 2018. Vol. 7, № 4. P. 361–366. URL: <https://doi.org/10.18178/ijmerr.7.4.361-366> (дата обращения: 23.08.2025).
5. *Chunikhin A. A., Poduraev Yu. V., Vorotnikov A. A.* и др. Cutting velocity accuracy as a criterion for comparing robot trajectories and manual movements for medical industry //

- Mechanics & Industry. 2017. Vol. 18, № 7. Art. 712. URL: <https://doi.org/10.1051/meca/2017047> (дата обращения: 23.08.2025).
6. Grebenstein M. The DLR MiroSurge – A robotic system for surgery // 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2009. P. 3432–3438. URL: <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2009.5152361> (дата обращения: 23.08.2025).
 7. Cepolina F., Razzoli R. P. An introductory review of robotically assisted surgical systems // The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery. 2022. Vol. 18, № 4. Art. e2409. URL: <https://doi.org/10.1002/rcs.2409> (дата обращения: 23.08.2025).
 8. Lefranc M., Peltier J. Evaluation of the ROSA™ Spine robot for minimally invasive surgical procedures // Expert Review of Medical Devices. 2016. Vol. 13, № 10. P. 899–906. URL: <https://doi.org/10.1080/17434440.2016.1236680> (дата обращения: 23.08.2025).
 9. Haik N. V. и др. Robotic systems in spinal surgery: a review of accuracy, radiation exposure, hospital readmission rate, cost, and adverse events // World Neurosurgery. 2025. Vol. 195. Art. 123721. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2025.123721> (дата обращения: 23.08.2025).
 10. D'Souza M. и др. Robotic-assisted spine surgery: history, efficacy, cost, and future trends // Robotic Surgery: Research and Reviews. 2019. P. 9–23. URL: <https://doi.org/10.2147/rsrr.s190720> (дата обращения: 23.08.2025).
 11. Vorotnikov A. A., Poduraev Yu. V., Romash E. V. Estimation of error in determining the centers of rotation of links in a kinematic chain for industrial robot calibration techniques // Measurement Techniques. 2015. Vol. 58, № 8. P. 864–871. URL: <https://doi.org/10.1007/s11018-015-0809-9> (дата обращения: 23.08.2025).
 12. Vorotnikov A. и др. Uncertainty estimation of axes direction determination of industrial robot using an ellipsoid concentration model // Proceedings of the 27th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation. 2016. P. 0480–0486. URL: <https://doi.org/10.2507/27th.daaam.proceedings.072> (дата обращения: 23.08.2025).

References

1. Nubiola, A. and Bonev, I. A. (2013), "Absolute calibration of an ABB IRB 1600 robot using a laser tracker", Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 29, no 1, pp. 236–245, URL: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2012.06.004> (accessed date: 23.08.2025).
2. Chunikhin, A. A., Bazikyan, E. A., Poduraev, Y. A. et al. (2019), "Comparative experimental assessment of the accuracy of nanosecond laser surgery of the oral cavity when the instrument is moved by a robotic complex and a surgeon", Russian Open Medical Journal, vol. 8, no 3, art. e0307, URL: <https://doi.org/10.15275/rusomj.2019.0307> (accessed date: 23.08.2025).
3. Vorotnikov, A. A., Buinov, M. A., Bushuev, S. V. et al. (2018), "Standard deviation from the average cutting velocity as a criterion for comparing robot trajectories and manual movements of a doctor for performing surgical operations in maxillofacial surgery", International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, vol. 7, no 3, pp. 319–323, URL: <https://doi.org/10.18178/ijmerr.7.3.319-323> (accessed date: 23.08.2025).
4. Vorotnikov, A. A., Klimov, D. D., Melnichenko, E. A. et al. (2018), "Criteria for comparison of robot movement trajectories and manual movements of a doctor for perform-

- ing maxillofacial surgeries", *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, vol. 7, no 4, pp. 361–366, URL: <https://doi.org/10.18178/ijmerr.7.4.361-366> (accessed date: 23.08.2025).
5. Chunikhin, A. A., Poduraev, Y. V., Vorotnikov, A. A. et al. (2017), "Cutting velocity accuracy as a criterion for comparing robot trajectories and manual movements for medical industry", *Mechanics & Industry*, vol. 18, no 7, art. 712, URL: <https://doi.org/10.1051/meca/2017047> (accessed date: 23.08.2025).
 6. Grebenstein, M. (2009), "The DLR MiroSurge – A robotic system for surgery", 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3432–3438, URL: <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2009.5152361> (accessed date: 23.08.2025).
 7. Cepolina, F. and Razzoli, R. P. (2022), "An introductory review of robotically assisted surgical systems", *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, vol. 18, no 4, art. e2409, URL: <https://doi.org/10.1002/rcs.2409> (accessed date: 23.08.2025).
 8. Lefranc, M. and Peltier, J. (2016), "Evaluation of the ROSA™ Spine robot for minimally invasive surgical procedures", *Expert Review of Medical Devices*, vol. 13, no 10, pp. 899–906, URL: <https://doi.org/10.1080/17434440.2016.1236680> (accessed date: 23.08.2025).
 9. Haik, N. V. et al. (2025), "Robotic systems in spinal surgery: a review of accuracy, radiation exposure, hospital readmission rate, cost, and adverse events", *World Neurosurgery*, vol. 195, art. 123721, URL: <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2025.123721> (accessed date: 23.08.2025).
 10. D'Souza, M. et al. (2019), "Robotic-assisted spine surgery: history, efficacy, cost, and future trends", *Robotic Surgery: Research and Reviews*, pp. 9–23, URL: <https://doi.org/10.2147/rsrr.s190720> (accessed date: 23.08.2025).
 11. Vorotnikov, A. A., Poduraev, Y. V., Romash, E. V. (2015), "Estimation of error in determining the centers of rotation of links in a kinematic chain for industrial robot calibration techniques", *Measurement Techniques*, vol. 58, no 8, pp. 864–871, URL: <https://doi.org/10.1007/s11018-015-0809-9> (accessed date: 23.08.2025).
 12. Vorotnikov, A. et al. (2016), "Uncertainty estimation of axes direction determination of industrial robot using an ellipsoid concentration model", *Proceedings of the 27th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation*, pp. 0480–0486, URL: <https://doi.org/10.2507/27th.daaam.proceedings.072> (accessed date: 23.08.2025).

Информация об авторах:

Д. Б. Смирнов – младший научный сотрудник НИИ "ТЕХНОБИОМЕД" ФГБОУ ВО "Российский Университет Медицины" Минздрава России (127006, субъект Российской Федерации, г. Москва, вн.тер.г. Муниципальный Округ Тверской, ул. Долгоруковская, д. 4);

И. А. Фролов – научный сотрудник НИИ "ТЕХНОБИОМЕД" ФГБОУ ВО "Российский Университет Медицины" Минздрава России (127006, субъект Российской Федерации, г. Москва, вн.тер.г. Муниципальный Округ Тверской, ул. Долгоруковская, д. 4);

А. А. Воротников – старший научный сотрудник НИИ "ТЕХНОБИОМЕД" ФГБОУ ВО "Российский Университет Медицины" Минздрава России (127006, субъект Российской Федерации, г. Москва, вн.тер.г. Муниципальный Округ Тверской, ул. Долгоруковская, д. 4);

А. А. Гринь – член-корр. РАН, д. мед. наук; заведующий научным отделением неотложной нейрохирургии НИИ СП имени Н. В. Склифосовского (129090, Российская Федерация, г. Москва, Большая Сухаревская пл., д. 3); ведущий научный сотрудник

НИИ "ТЕХНОБИОМЕД" ФГБОУ ВО "Российский Университет Медицины" Минздрава России (127006, субъект Российской Федерации, г. Москва, вн.тер.г. Муниципальный Округ Тверской, ул Долгоруковская, д. 4); главный нейрохирург Департамента здравоохранения города Москвы (119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 14); О. В. Левченко – профессор РАН, д. мед. наук; проректор, заведующий кафедрой нейрохирургии ФГБОУ ВО "Российский Университет Медицины" Минздрава России, (127006, субъект Российской Федерации, г. Москва, вн.тер.г. Муниципальный Округ Тверской, ул Долгоруковская, д. 4).

Information about the authors:

D. B. Smirnov – Junior Researcher, Research Institute "Technobiomed", "Russian University of Medicine", Ministry of Healthcare of the Russian Federation (4 Dolgorukovskaya St., Tverskoy Municipal District, Moscow, Russian Federation, 127006);

I. A. Frolov – Researcher, Research Institute "Technobiomed", "Russian University of Medicine", Ministry of Healthcare of the Russian Federation (4 Dolgorukovskaya St., Tverskoy Municipal District, Moscow, Russian Federation, 127006);

A. A. Vorotnikov – Senior Researcher, Research Institute "Technobiomed", "Russian University of Medicine", Ministry of Healthcare of the Russian Federation (4 Dolgorukovskaya St., Tverskoy Municipal District, Moscow, Russian Federation, 127006);

A. A. Grin – Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Medical Sciences; Head of the Department of Emergency Neurosurgery, N. V. Sklifosovsky Research Institute for Emergency Medicine (3 Bolshaya Sukharevskaya Square, Moscow, Russian Federation, 129090); Leading Researcher, Research Institute "Technobiomed", "Russian University of Medicine", Ministry of Healthcare of the Russian Federation (4 Dolgorukovskaya St., Tverskoy Municipal District, Moscow, Russian Federation, 127006); Chief Neurosurgeon of the Moscow City Healthcare Department (14 Leninsky Ave., Moscow, Russian Federation, 119071);

O. V. Levchenko – Professor of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Medical Sciences; Vice-Rector, Head of the Department of Neurosurgery, "Russian University of Medicine", Ministry of Healthcare of the Russian Federation (4 Dolgorukovskaya St., Tverskoy Municipal District, Moscow, Russian Federation, 127006).