

Ю. В. Подураев, д-р техн. наук, проф.,
зав. кафедрой робототехники и мехатроники, директор института, y.poduraev@stankin.ru,
Московский государственный технологический университет "СТАНКИН",
Институт автоматизации и робототехники

Подход и опыт проектирования медицинской коллаборативной робототехники для лазерной хирургии и биопринтинга¹

Проведен анализ современных тенденций развития и методов построения коллаборативных медицинских робототехнических систем. Предложен подход к проектированию медицинской коллаборативной робототехники, который направлен на целенаправленный научно-технический поиск роботических и мехатронных технологий, позволяющих принципиально превысить возможности естественных систем человека при выполнении медицинских операций. Приводятся результаты разработки исследовательских прототипов медицинских роботов и их экспериментального тестирования на операциях лазерной челюстно-лицевой хирургии и биопринтинга, выполненных совместно специалистами Московского государственного технологического университета "СТАНКИН" и Московского государственного медико-стоматологического университета им. А. И. Евдокимова.

Ключевые слова: коллаборативная робототехника, медицинский робот, роботические технологии, мехатронные технологии, роботы для лазерной хирургии, роботы для биопринтинга

Введение

Масштабное развитие индустрии робототехники открывает новые перспективы в использовании роботов и роботических комплексов. Главной особенностью современных роботов является то, что они должны взаимодействовать в одном рабочем пространстве вместе с человеком. Появление манипуляторов, оборудованных специальными встроенными сенсорными и интеллектуальными устройствами, дало возможность развития нового поколения робототехнических систем — коллаборативных. В настоящее время коллаборативные роботические системы тестируются в различных сферах научной и производственной деятельности, одной из наиболее значимых из которых является медицина.

Основной целью коллаборации робототехники и медицины является повышение эффективности лечения и уменьшение рисков нанесения вреда здоровью человека при выполнении обследования или операции. Научно-методическая проблематика медицинской коллаборативной робототехники обусловлена в значительной степени междисциплинарной сущностью ее предмета. Перед разработчиками робото-медицинских систем и технологий стоят уникальные проектные задачи, которые затрагивают предметные основы столь ранее обособленных областей научных и прикладных знаний, как медицина и инженерия. При этом требуется искать эффективные проектные решения на системном пересечении и синергетическом сочетании современных достижений в этих областях. Важно отметить, что в последние годы резко возрос интерес к робото-медицинским системам, что свидетельствует о высоком интересе научного сообщества к данному направлению [1–4].

Постановка задачи

Анализ современных тенденций в развитии коллаборативной медицинской робототехники показал, что актуальной задачей является переход к роботам-хирургам от роботов-ассистентов [1–3]. Роботы-хирурги способны под контролем врача автономно выполнять отдельные операции с функциональными показателями, многократно превышающими мануальные возможности человека при работе с аналогичными медицинскими инструментами (например, медицинскими лазерами, лапароскопами и др.) [4, 5].

Функциональные возможности роботов-хирургов предусматривают:

- строгое соблюдение роботом плана и ограничительных условий, установленных врачом;
- оперативный контроль хода роботической операции врачом в режиме реального времени;
- работу системы безопасности пациента, включающей комплекс информационно-измерительных и аппаратно-программных устройств защиты;
- дружелюбный интерфейс "Врач — Робот", предусматривающий предварительную компьютерную симуляцию операции и визуализацию операционной зоны;
- персонализацию операционного плана для пациента путем использования индивидуальных 3D-графических моделей объектов и зоны операционного вмешательства;
- автоматическую генерацию программ движений робота-хирурга в CAD—CAM-системе;
- использование интеллектуальной системы поддержки решений для оптимизации программ движения робота и режимов работы медицинского инструмента.

Методы исследования

Предлагаемый подход к проектированию медицинской коллаборативной робототехники включает следующие основные этапы:

¹ Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения государственного задания (задание № 9.3408.2017/4.6).

Этап 1. Анализ эффективности мануальных технологий и операций, выполняемых врачами-хирургами с использованием современных медицинских инструментов.

Этап 2. Формирование функциональных требований, совокупности критериев и показателей эффективности операций. Выделение доминирующих критериев и областей варьирования.

Этап 3. Определение актуальных областей для разработки коллаборативной медицинской робототехники, где принципиально достижимо (на сегодняшнем уровне инженерных знаний и состояния техники) существенное превышение медицинским роботом естественных характеристик механических, сенсорных и интеллектуальных систем человека.

Этап 4. Выбор существующего робота (манипулятора и системы управления) и разработка оригинальных программного обеспечения, медицинских рабочих органов, информационных и сенсорных устройств.

Этап 5. Альтернативный вариант: разработка и изготовление оригинального манипулятора и/или оригинальной системы управления, превосходящих имеющиеся аналоги современных роботов по заданным техническим характеристикам.

На базе предложенного подхода разработаны исследовательские прототипы медицинских роботов, предназначенных для лазерной челюстно-лицевой хирургии и биопринтинга, которые были выполнены совместно специалистами Московского государственного технологического университета "СТАНКИН" и Московского государственного медико-стоматологического университета им. А. И. Евдокимова [1].

В состав роботизированного multifunctional хирургического комплекса (МХК) для лазерной челюстно-лицевой хирургии входят манипуляционный робот-хирург, мануальный тренажерный комплекс, фантом головы пациента и рабочее место хирурга (рис. 1, см. третью сторону обложки).

Робот-хирург реализован на базе манипулятора KUKA LBR 4 + и включает лазерный медицинский инструмент, прототип рабочего органа, лазерную координатно-измерительную машину с программным пакетом для обработки данных и оптическую систему безопасности.

На основе проведенного анализа типовых движений и траекторий медицинского инструмента при проектировании использовались следующие функциональные критерии:

- среднеквадратическое отклонение от линейной (полулунной, фестончатой) траектории — отклонение в каждой точке от ее проекции на среднюю линию;
- погрешность значения воздушного зазора между наконечником лазера и обрабатываемой биологической тканью;
- погрешность средней скорости движения медицинского инструмента;

- среднеквадратическое отклонение от средней скорости движения медицинского инструмента.

Экспериментальное тестирование работы МХК на фантоме челюсти показало, что показатели робота-хирурга существенно выше мануальных возможностей врача на лазерных операциях. Проведенные эксперименты доказали, что точность поддержания роботом заданного значения воздушного зазора между наконечником лазера и биологической тканью лучше в 7 раз, стабильность скорости движения лазера лучше в 4 раза. Погрешность отклонения от заданной траектории роботом лучше мануальных показателей в 3...4 раза (в зависимости от вида траектории).

Перспективным направлением для развития коллаборативной робототехники являются технологии роботического биопринтинга. Основу технологии биопринтинга составляет 3D-печать, т. е. послойное создание физического объекта на базе виртуальной трехмерной модели. В качестве физического объекта в биопринтинге выступают живые органы или отдельные их элементы, которые впоследствии пересаживаются пациенту [6—8]. Применение роботических и мехатронных технологий в биопринтинге не только позволяет улучшить качество печати и разрешающую способность биопри- нтера, дает возможность печатать органы с более сложной структурой, но и позволяет перейти к качественно новому этапу развития регенеративной медицины, т. е. биопечати *in vivo* (внутри живого организма) и *in situ* (на месте). Актуальная научная проблематика в области роботического биопринтинга заключается в создании нового вида роботических систем и робото-медицинских технологий для принципиально новых задач биофабрикации на базе аддитивных роботических технологий послойного синтеза как совокупности органических и неорганических слоев. Роботические системы нового поколения отличает повышенная безопасность пациента благодаря использованию оригинального CAD/CAM программного обеспечения, 3D-визуализации операционной зоны, силовых и интегральных сенсоров, применению новых методов и измерительно-информационных устройств роботов.

На рис. 2 (см. третью сторону обложки) представлен экспериментальный стенд роботической биопечати эмали *in situ* для замены поврежденных или утраченных в результате болезни или травмы участков эмали. Разработка выполнена специалистами МГТУ СТАНКИН, Московского государственного медико-стоматологического университета им. А. И. Евдокимова и компании 3D Bioprinting Solutions.

Заключение

В статье предложен общий подход к проектированию медицинской коллаборативной робототехники. Выработаны критерии, позволяющие количественно оценить эффект от внедрения робототех-

нической системы по сравнению с мануальными операциями, выполняемыми человеком.

Рассмотрен разработанный и успешно протестированный мультифункциональный хирургический комплекс (МХК) для лазерной челюстно-лицевой хирургии. МХК доказал возможность использования роботов в медицинской практике. Выполнение операций при этом происходит с большей точностью и стабильностью по скорости по сравнению с человеком, что говорит о перспективности использования роботизированных комплексов в сфере челюстно-лицевой хирургии. Исследованы перспективы аддитивных технологий (биопринтинга) и возможность их реализации на основе готовых робототехнических решений. Разработанная экспериментальная система показывает принципиальную возможность реализации технологий биопринтинга на базе существующих робототехнических комплексов.

Дальнейшая работа включает в себя глубокое исследование точностных и динамических характеристик, необходимых для выполнения хирургических и аддитивных операций, разработку и улучшение программного обеспечения для 3D-визуализации операционной зоны, проектирование сенсорных систем, а также разработку дружественного человека машинного интерфейса.

Список литературы

1. Буйнов М. А., Воротников А. А., Климов Д. Д., Малышев И. Ю., Миронов В. А., Парфенов В. А., Перейра Д. А. С., Подураев Ю. В., Хесуани Ю. Д. Роботические технологии в медицине и биопринтинге: состояние проблемы и современные тенденции // Вестник МГТУ "Станкин". 2017. № 1 (40).
2. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=a2SdbM4qWkU&feature=youtu.be>
3. Колонтарев К. Б., Пушкарь Д. Ю., Говоров А. В., Шептунов С. А. История развития роботических технологий в медицине // Известия ВУЗов. Поволжский регион. Медицинские науки. 2014. № 4 (32). С. 125—140.
4. Базилян Э. А., Чунихин А. А. Малоинвазивные лазерные технологии на основе роботизированных мультифункциональных комплексов в челюстно-лицевой хирургии и стоматологии // Российский стоматологический журнал. 2016. Т. 20, № 5. С. 228—231.
5. Чунихин А. А., Саакян М. Ю., Гажва С. И., Базилян Э. А. Разработка наносекундного лазерного модуля, встраиваемого в роботизированный многофункциональный хирургический комплекс для малоинвазивной терапии патологии челюстно-лицевой области и определение эффектов его воздействия на плазму крови // Современные технологии в медицине. 2016. Т. 8, № 4. С. 30—35.
6. Mironov V., Kasyanov V., Markwald R. Organ printing: from bioprinter to organ biofabrication line // Current Opinion in Biotechnology. 2011. N. 22. P. 667—673.
7. Manyi Wang, Jiankang He, Yaxiong Liu, Meng Li, Dichen Li, Zhongmin Jin. The trend towards in vivo bioprinting // International Journal of Bioprinting. 2015. Vol. 1, N. 1. P. 15—26.
8. Миронов В. А. Технология трехмерной биопечати. URL: http://umedp.ru/news/vladimir_aleksandrovich_mironov_tekhnologiya_trekhmernoy_biopec_hati.html. Дата доступа 30.03.2017.
9. Каган В. Г. 50, 40, 30, 20, 10 лет спустя (размышления после IMTS-2000 и PKM-2). М.: ПАСХН, 2003. 76 с.

Approach and Experience of Designing Medical Collaborative Robotics for Laser Surgery and Bio-Printing

Yu. V. Poduraev, y.poduraev@stankin.ru✉,

Moscow State University of Technology "STANKIN", Moscow, 127994, Russian Federation

Corresponding author: Poduraev Yury V., D. Sc., Professor, Director of the Institute of Automation and Robotics, Head of Robotics & Mechatronics Dept., Moscow State University of Technology "STANKIN", Moscow, 127994, Russian Federation, e-mail: y.poduraev@stankin.ru

Accepted on August 14, 2017

The analysis of modern development trends and methods of construction of collaborative medical robotic systems is carried out. An approach is proposed for the design of medical collaborative robotics, which is aimed at a purposeful scientific and technical search for new robotic and mechatronic technologies. The goal of developing new technologies is a significant excess of the capabilities of natural human systems in the performance of medical operations. In the following work, the state and development trends of medical robotics such as autonomous robotic surgery and recently found application in a medical field additive manufacturing are studied. Design approach applicable to the relatively new medical collaborative robotics is proposed. Several mathematical criteria with respect to both engineering and medical aspects are developed. Based on the analysis of typical movements and trajectories of the medical instrument, the following functional criteria were used in the design:

- the standard deviation from a linear (semilunar, scalloped) trajectory is the deviation value at each point from its projection to the midline;
- the error in the magnitude of the air gap between the laser tip and the treated biological tissue;
- accuracy of the average speed of movement of a medical instrument;
- standard deviation from the average speed of movement of a medical instrument.

Components of efficient surgery robot are described. Results of the development of two experimental setups for the maxillofacial laser surgery robotic system and robotic based 3D bio-printing 'in situ', respectively, are given. Proposed systems exceed the capabilities of human in the performance of medical operations, and can be a basis for the development of principally new maxillofacial laser surgery and 3D bio-printing robotic based systems. This work accomplished by collaboration of Moscow State Technological University "STANKIN" and Moscow State University of Medicine and Dentistry named after A. I. Evdokimov.

Keywords: collaborative robotics, medical robot, robotic technology, mechatronic technologies, robots for laser surgery, robots for bioprinting

Acknowledgements: The work was supported by grant of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Project No. № 9.3408.2017/4.6).

For citation:

Poduraev Y. V. Approach and Experience of Designing Medical Collaborative Robotics for Laser Surgery and Bio-Printing, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 11, pp. 749–752.

DOI: 10/17587/mau.18.749-752

References

1. **Bujnov M. A., Vorotnikov A. A., Klimov D. D., Malyshev I. Yu., Mironov V. A., Parfenov V. A., Perejra D. A. S., Poduraev Yu. V., Hesuani Yu. D.** *Roboticheskie tekhnologii v medicine i bioprintinge: sostoyaniye problemy i sovremennyye tendentsii* (Robotic technologies in medicine and bioprinting: the state of the problem and current trends), *Vestnik MGTU "STANKIN"*, 2017, no. 1 (40) (in Russian).
2. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=a2SdbM4qWkU&feature=youtu.be>
3. **Kolontarev K. B., Pushkar' D. Yu., Govorov A. V., Sheptunov S. A.** *Istoriya razvitiya roboticheskikh tekhnologiy v medicine* (History of the development of robotic technologies in medicine), *Izvestiya Vuzov. Povolzhskiy region. Medicinskie nauki*, 2014, no. 4 (32), pp. 125–140 (in Russian).

4. **Bazikyan Eh. A., Chunihiin A. A.** *Maloinvazivnyye lazernyye tekhnologii na osnove robotizirovannykh multifunktsional'nykh kompleksov v chelyustno-litsevoj hirurgii i stomatologii* (Minimally invasive laser technologies based on robotic multifunctional complexes in maxillofacial surgery and dentistry), *Rossiyskiy Stomatologicheskij Zhurnal*, 2016, vol. 20, no. 5, pp. 228–231 (in Russian).

5. **Chunihiin A. A., Saakyan M. Yu., Gazhva S. I., Bazikyan Eh. A.** *Razrabotka nanosekundnogo lazernogo modulya, vstraivayemogo v robotizirovannyi mnogofunktsional'nyy hirurgical'skiy kompleks dlya maloinvazivnoy terapii patologii chelyustno-litsevoj oblasti i opredelenie ehffektov ego vozdeystviya na plazmu krovi* (Development of a nanosecond laser module embedded in a robotic multifunctional surgical complex for minimally invasive treatment of the pathology of the maxillofacial area and determining the effects of its effect on blood plasma), *Sovremennyye Tekhnologii v Medicine*, 2016, vol. 8, no. 4, pp. 30–35 (in Russian).

6. **Mironov V., Kasyanov V., Markwald R.** Organ printing: from bioprinter to organ biofabrication line, *Current Opinion in Biotechnology*, 2011, no. 22, pp. 667–673.

7. **Manyi Wang, Jiankang He, Yaxiong Liu, Meng Li, Dichen Li, Zhongmin Jin.** The trend towards in vivo bioprinting, *International Journal of Bioprinting*, 2015, vol. 1, no. 1, pp. 15–26.

8. **Mironov V. A.** *Tekhnologiya trekhmernoy biopechati* (Technology of three-dimensional bioprinting), available at: http://umedp.ru/news/vladimir_aleksandrovich_mironov_tekhnologiya_trekhmernoy_biopec_hati.html (in Russian).

9. **Kagan V. G.** 50, 40, 30, 20, 10 let spustya (50, 40, 30, 20, 10 years later), Moscow, RASKHN, 2003, 76 p. (in Russian).

УДК 004.896

DOI: 10.17587/mau.18.752-758

Д. Н. Степанов, нач. лаборатории, dnstepanov@rtc.ru, **Е. Ю. Смирнова**, нач. отдела, eus@rtc.ru,
Центральный научно-исследовательский институт робототехники и технической кибернетики,
Санкт-Петербург

Метод коррекции оценки положения мобильного робота с использованием визуальной локации естественных ориентиров

Представлен подход к использованию визуальной локации известных ориентиров для повышения точности навигации мобильного робота (МР). Подход основывается на анализе изображений от одной или нескольких телевизионных камер МР и применении нелинейной фильтрации для коррекции навигационной оценки по визуальной локации. Ключевыми достоинствами является возможность коррекции положения и ориентации МР по любому числу ориентиров (начиная с одного), а также возможность использования произвольного числа камер. Проведенные экспериментальные исследования показали, что метод позволяет достичь погрешностей по смещению в плоскости дороги порядка 10 см и менее 1° по углу ориентации МР в пределах всей траектории.

Ключевые слова: мобильный робот, автономное транспортное средство, визуальная навигация, визуальная локация, техническое зрение, фильтр Калмана, комплексирование, оптимальная фильтрация

Введение

Задача определения положения беспилотного автомобиля (мобильного робота) при движении по дорогам общего пользования и пересеченной местности в настоящее время чаще всего решается с применением комплекса дорогостоящих многолучевых лазерных дальномеров (лидаров). Активное развитие систем технического зрения позволяет создавать значительно менее дорогие и громоздкие системы, базирующиеся на анализе изображений от телевизионных камер мобильных роботов (МР). В ряде случаев такие системы по-прежнему дополняются относительно дешевыми однолучевыми лидарами небольшого радиуса действия для конт-

роля положения транспортного средства на проезжей части. Однако существуют ситуации, когда такой дальномер использован быть не может, например, при проезде перекрестков он не позволяет определить края проезжей части и дорожной разметки. В таких ситуациях МР приходится полагаться только на использование GPS (ГЛОНАСС) и внутренних сенсоров и систем — одометров и БИНС [1]. Это ограничивает точность прохождения перекрестков, приводит к резкому маневрированию при выезде с перекрестка (когда лидар снова может быть применен для определения полосы движения) и потенциально может приводить к столкновениям с дорожной инфраструктурой.