

УДК 621.01

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАЛОИНВАЗИВНЫЕ РОБОТОХИРУРГИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ

© 2020 г. Е. И. Велиев^{1,*}, академик РАН Р. Ф. Ганиев²,
В. А. Глазунов², Г. С. Филиппов^{2,3,**}

Поступило 22.09.2020 г.
После доработки 13.10.2020 г.
Принято к публикации 14.10.2020 г.

Рассматривается современное состояние роботизированных ассистирующих комплексов в малоинвазивной хирургии. Предложены три различных манипулятора для роботизированной хирургии, отличающиеся от известных зарубежных аналогов рядом преимуществ.

Ключевые слова: хирургические роботы, параллельная структура, роботизированное хирургическое устройство

DOI: 10.31857/S2686740020060206

В настоящее время большое внимание уделяется развитию робототехники и внедрению ее в сферы медицины и здравоохранения [1]. На сегодняшний день развиваются различные направления использования роботизированных систем в медицине: малоинвазивная полостная хирургия (урология, проктология, гинекология, кардиохирургия, эндокринология и другие медицинские специальности), хирургические лазеры, хирургия в области позвоночника [2]. В большинстве случаев использование роботоассистирующих комплексов в малоинвазивной хирургии позволяет значительно снизить кровопотери и реабилитационный период, увидеть недоступные для зрения зоны, убрать тремор рук хирурга и ошибочные движения скальпелем или другим инструментом.

Роботизированная хирургия активно развивается с 90-х годов прошлого века. В 1996 г. успешно выполнили телехирургическую лапароскопическую холецистэктомию свиньи с помощью систе-

мы ARTEMIS, разработанной с открытой консолью и тремя одиночными руками-манипуляторами [3]. Наибольшее распространение и признание в профессиональном сообществе получила платформа daVinci Intuitive Surgical System, применяемая в урологии, проктологии, гинекологии, кардиохирургии, эндокринологии и других медицинских специальностях [4]. Следует отметить, что руки-манипуляторы этого робота, расположенные на общем основании, имеют последовательную структуру. С момента выхода первого поколения daVinci прошло более 20 лет, сроки действия патентов на эту платформу истекли в 2019 г.

Динамичное развитие роботизированной хирургии приводит к созданию новых роботизированных ассистирующих систем. Среди них стоит отметить Telelap ALF-X (Италия) [5], Medtronic (немецкий аэрокосмический центр, Германия) [6], Avatera (Германия, Швейцария), REVO-I (Южная Корея) [7], Medicaoid (Япония) [8], SurgiBot [9] и др. При этом, несмотря на имеющиеся существенные различия и особенности перечисленных систем, схемы механизмов большинства манипуляторов имеют подобную daVinci последовательную структуру и внешне сильно похожи.

Например, конструкция альтернативной роботизированной системы Telelap ALF-X включает три руки-манипулятора последовательной структуры, установленные на трех отдельных основаниях. Задающее устройство представляет собой две ручки, похожие на рукоятки лапароскопиче-

¹ Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования, Москва, Россия

² Институт машиноведения им. А.А. Благоврадова Российской академии наук, Москва, Россия

³ Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

*E-mail: veliev@urotop.ru

**E-mail: filippov.gleb@gmail.com

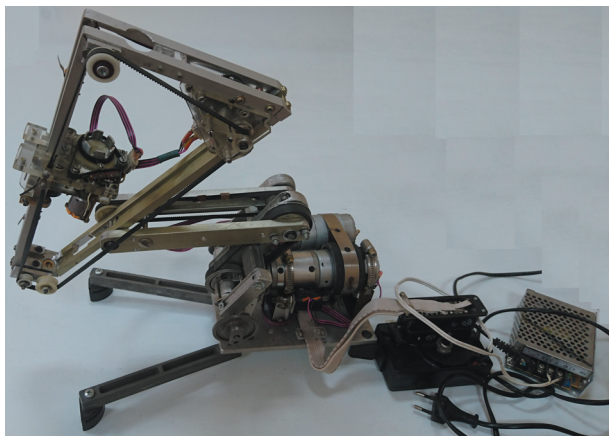


Рис. 1. Механизм для выполнения высокопрецизионных медицинских операций с шарнирным параллелограммом.

ских манипуляторов, с их помощью осуществляется управление инструментами с четырьмя и шестью степенями свободы.

Использование последовательной схемы робота daVinci повлекло добавление двух дополнительных кинематических пар с приводами, увеличение общей длины манипулятора и веса компонентов одной “руки” до ~ 80 кг (при весе самого инструмента, равном ~20 г), что приводит к снижению позиционной точности [10, 11]. При этом применение механизмов параллельной или параллельно-последовательной структуры может значительно снизить данные недостатки [12].

Различные варианты открытых и закрытых кинематических цепей устройств управления у предлагаемых на рынке и разрабатываемых роботизированных систем имеют, как правило, конструкции, отличные от стандартных лапароскопических инструментов. Это приводит к необходимости длительного процесса обучения персонала, может вызвать сложности переучивания при использовании различных роботоассистирующих систем.

В Институте машиноведения им. А.А. Благонравова РАН разработан ряд устройств, эффективно решающих указанную задачу [10, 13, 14].

Манипулятор (рис. 1) содержит основание и расположенный на нем вращательный двигатель, вал которого связан с подвижной платформой. Второй вращательный двигатель размещен на подвижной платформе, причем оси этих двигателей перпендикулярны. Далее размещена рабочая площадка, на которой закреплено выходное звено. Рабочий орган-инструмент установлен на выходном звене с возможностью поступательного и вращательного движения относительно собственной оси. Подвижная платформа дополнительно связана с рабочей площадкой второй кинематической цепью, состоящей из двух последовательно установленных



Рис. 2. Механизм с дугообразными звеньями, обеспечивающий постоянство точки ввода.

ных ременных передач, каждая из которых содержит по два шкива, связанных посредством ремня.

Механизм характеризуется тем, что имеет небольшую массу (порядка 10 кг), достаточно большую рабочую область, постоянство точки ввода, четыре степени свободы. Повышение эффективности устройства манипулирования достигается за счет использования параллельно-последовательной структуры.

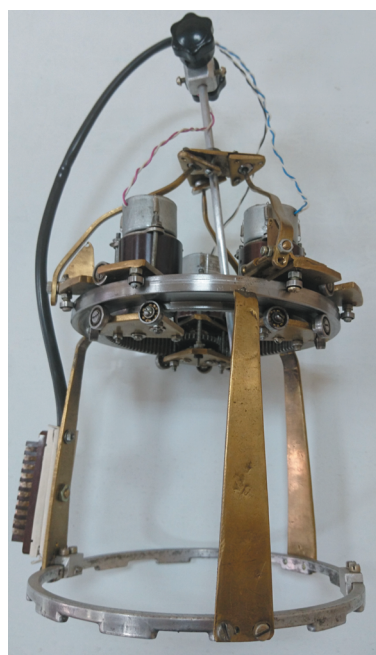


Рис. 3. Механизм с круговой направляющей для лапароскопических операций.

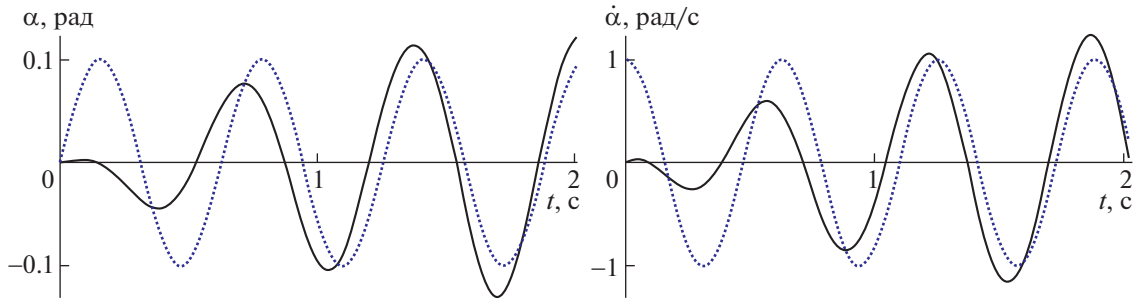


Рис. 4. Моделирование движения выходного звена механизма.

Механизм (рис. 2) имеет основание, на котором располагаются два пересекающихся дугообразных звена. В изменяемой точке пересечения этих звеньев расположена подвижная платформа, на которой последовательно расположены поступательный и вращательный приводы, которые перемещают выходное звено поступательно и вращают его вокруг своей оси.

Необходимый размер рабочей области обеспечивается параметрами механизма. Манипулятор конструктивно обеспечивает постоянство точки ввода, имеет высокую точность и жесткость при сравнительно небольшом весе (~6 кг) и размере.

Манипулятор (рис. 3) включает в себя три параллельно соединенные кинематические цепи. Эти кинематические цепи содержат приводные каретки, расположенные на круговом основании-направляющей. Далее расположена подвиж-

ная платформа с установленным на ней поступательным двигателем, перемещающим центральную штангу, ось которой проходит через точку пересечения всех кинематических пар. Указанная точка является неподвижной точкой ввода инструмента.

Данный робот может использоваться не только с ручным управлением, но и с автоматическим. Для этого разработана динамическая модель с использованием закона управления, который позволяет минимизировать ошибку по положению, скорости и ускорению [15].

Получены выражения для требуемых моментов в приводах M_1 , M_2 , M_3 , расположенных на круговом основании, которые позволяют обеспечить движение выходного звена по заданному закону с требуемой точностью:

$$\begin{aligned}
 M_1 = \frac{1}{Z_n} & \left(\left(J_\zeta \left[\ddot{\gamma}_{mp} - Hg \left(\frac{\omega_\xi \cos \alpha + \omega_\eta \sin \alpha}{\cos \beta} - \dot{\gamma}_{mp} \right) - Hg_1 (\gamma - \gamma_{mp}) \right] - \right. \right. \\
 & \left. \left. - (J_\eta - J_\xi) \omega_\xi \omega_\eta (A_2 B_3 - A_3 B_2) - \right. \right. \\
 & \left. \left. - \left[\left(J_\eta \ddot{\beta}_{mp} - Hg \left(\frac{\omega_\xi \cos \beta \sin \alpha - \omega_\eta \cos \beta \cos \alpha}{-\cos \beta} - \dot{\beta}_{mp} \right) - Hg_1 (\beta - \beta_{mp}) \right] - \right. \right. \\
 & \left. \left. - (J_\xi - J_\zeta) \omega_\xi \omega_\zeta (A_2 C_3 - A_3 C_2) + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \left(J_\xi \left[\ddot{\alpha}_{mp} - Hg \left(\omega_\xi + \frac{(\omega_\eta \sin \alpha + \omega_\zeta \cos \alpha) \sin \beta}{\cos \beta} - \dot{\alpha}_{mp} \right) - Hg_1 (\alpha - \alpha_{mp}) \right] - \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. \left. - (J_\zeta - J_\eta) \omega_\eta \omega_\zeta (B_2 C_3 - B_3 C_2) \right) \right);
 \end{aligned}$$

где $\alpha_{mp}, \dots, \dot{\gamma}_{mp}$ – функции, описывающие требуемые значения координат, скоростей и ускорений выходного звена; Hg, Hg_1 – коэффициенты, определяющие вид и скорость переходного процесса по ошибке; $A_1, A_2, \dots, C_3, Z_n$ – выражения, зависящие от частных производных, связывающих обобщен-

ную скорость во входной паре с проекциями вектора угловой скорости на оси системы координат, связанной с выходным звеном. Для M_2 и M_3 можно составить аналогичные выражения.

Проведено моделирование движения рассматриваемого механизма. С помощью разработанного алгоритма получены фактические изменения коор-

динат, скоростей и ускорений при заданных параметрах. На рис. 4 представлено требуемое движение, выделенное сплошной линией, и фактическое движение, обозначенное пунктирной линией. Оказалось, что при соответствующих коэффициентах, обеспечивающих заданный переходный процесс по ошибке, можно получить приемлемое и устойчивое решение задачи.

Во всех перечисленных механизмах отличительными особенностями является то, что для обеспечения требуемого размера рабочей зоны, числа степеней свободы, обеспечения постоянства точки ввода инструмента не используются дополнительные приводы. При этом часть приводов можно расположить на основании, сделав таким образом остальную часть манипулятора менее массивной. Это обеспечивает снижение массы всего механизма, облегчает управление им, уменьшает габариты. Разработанные прототипы механизмов обладают высокой жесткостью конструкции.

Представленные механизмы способны обеспечить движения выходного звена и инструмента, расположенного на нем, а также задающего устройства управления, максимально похожие на движения стандартного хирургического лапароскопа.

Таким образом, разработанные механизмы и изготовленные прототипы (рис. 1–3) обладают важными для малоинвазивных хирургических систем достоинствами по сравнению с уже признанными в мире, а также создаваемыми в различных странах роботоассистирующими комплексами: невысокими массогабаритными характеристиками при сохранении жесткости конструкции и точности перемещений. Проведенные исследования будут продолжены для развития отечественной роботизированной малоинвазивной хирургии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Minimally invasive surgery market – Global industry analysis, size, share, growth, trends & forecast, 2013–2019 // Transparency Market Research. Albany. N.Y. USA. Tech. Rep. 2014.
2. Велиев Е.И., Голубцова Е.Н., Томилов А.А. Возможности малоинвазивной коррекции недержания мочи после радикального лечения рака предстательной железы // Онкоурология. 2013. № 4. С. 37–42.
3. Schurr M.O., Buess G., Neisius B., Voges U. Robotics and telemanipulation technologies for endoscopic surgery. A review of the ARTEMIS project // Surg Endosc. 2000. V. 14. P. 375–381.
4. Rassweiler J., Autorino R., Klein J., Mottrie A., Ali Serdar Goetzen, Jens-Uwe Stolzenburg, Koon H. Rha, Marc Schurr, Jihad Kaouk, Vipul Patel, Prokar Dasgupta, Evangelos Liatsikos. Future of robotic surgery in urology // Robotics and Laparoscopy BJU Int. 2017. V. 120. P. 822–841.
5. Gidaro S., Buscarini M., Ruzi E. et al. Telelap Alf-X: a novel telesurgical system for the 21st century // Surg. Technol. Int. 2012. V. 22. P. 20–25.
6. Hagn U., Konietschke R., Tobertge A. et al. DLR Miro-Surge: a versatile system for research in endoscopic telesurgery // Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg. 2010. V. 5. P. 183–189.
7. Kim D., Park D., Rha K. Robot-assisted partial nephrectomy with the REVO I-robot platform in porcine models // Eur. Urol. 2016. V. 69. P. 541–542.
8. Dasgupta P., Matsuda T., Rha K., Stark M. Panel Discussion: Robots on the horizon // Accessed November 2016.
9. Haber G.P., Autorino R., Laydner Y. et al. Spider surgical system for urologic procedures with laparoendoscopic single-site surgery from initial laboratory experience to first clinical application // Eur. Urol. 2012. V. 61. P. 415–422.
10. Veliev E.I., Ganiev R.F., Glazunov V.A., Filippov G.S. Parallel and Sequential Structures of Manipulators in Robotic Surgery // Doklady Physics. 2019. V. 64. № 3. P. 106–109.
11. Joseph R.A., Salas N.A., Johnson C., Goh A., Cuevas S.P., Donovan M.A., Kaufman M.G., Miles B., Reardon P.R., Bass B.L., Dunkin B.J. Video. Chopstick surgery: a novel technique enables use of the Da Vinci Robot to perform single-incision laparoscopic surgery // Surg Endosc. 2010. V. 24(12). P. 3224.
12. Ganiev R.F., Ganiev S.R., Kasilov V.P., Pustovgar A.P. Wave technology in mechanical engineering // Co-published by JohnWiley & Sons Inc. Hoboken, New Jersey, and ScrivenerPublishing LLC SalemMassachusetts. USA. Published simultaneously in Canada. 2015.
13. Глазунов В.А. Механизмы параллельной структуры и их применение: робототехнические, технологические, медицинские, обучающие системы. Ижевск: Ижевский институт компьютерных исследований, 2018. 1036 с.
14. Патент РФ на полезную модель № 170656. Манипулятор // Глазунов В.А., Глушков П.С., Левин С.В., Шалюхин К.А., Шептунов С.П. В25J 1/00, Заявка 2016124306, 20.06.2016. Оп. 03.05.2017. Бюл. № 13.
15. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем. Нелинейные модели. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 328 с.

PROMISING MINIMALLY INVASIVE ROBOTIC SURGICAL COMPLEXES WITH PARALLEL STRUCTURE

E. I. Veliev^a, Academician of the RAS R. F. Ganiev^b, V. A. Glazunov^b, and G. S. Filippov^{b,c}

^a *Russian Medical Academy of Continuous Professional Education, Moscow, Russian Federation*

^b *Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^c *Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation*

The paper considers the current state of robotic assisted complexes in minimally invasive surgery. Three different manipulators for robotic surgery are proposed, which differ from well-known foreign analogues in some advantages.

Keyword: surgical robots, parallel structure, robotic surgical device