

УДК 621.01

**ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ
МАНИПУЛЯТОРОВ В РОБОТОХИРУРГИИ****Е. И. Велиев¹, академик РАН Р. Ф. Ганиев²,
В. А. Глазунов², Г. С. Филиппов^{2,*}**

Поступило 05.10.2018 г.

Рассматриваются проблемы современной робототехники, связанные с требованиями, предъявляемыми к создаваемым устройствам различного назначения. Проведён анализ роботизированной системы хирургического манипулирования daVinci. Приведена разработанная робототехническая система параллельной структуры, предназначенная для различного рода хирургических операций.

Ключевые слова: хирургический робот для лапароскопии, система daVinci, механизм параллельно-последовательной структуры.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524852166-170>

Значение малоинвазивной хирургии, направленной на минимизацию области вмешательства в организм и степени травмирования тканей, возросло в последние два десятилетия. По прогнозам экспертов глобальный рынок малоинвазивной хирургии достигнет 50 млрд долл. в 2019 г. [1]. Основными преимуществами операций данного вида для пациента являются уменьшение хирургических надрезов, снижение потерь крови и послеоперационных болей, сокращение времени пребывания в лечебных учреждениях [2]. На сегодняшний день широко применяется ручная и роботизированная лапароскопия. Недостатки ручной лапароскопии во многом связаны с тем, что длительное пребывание в зачастую неудобных положениях повышает сложность работы хирурга и может снизить точность его действий.

Применение ассистирующих роботов в малоинвазивной хирургии снижает многие недостатки ручной лапароскопии: уменьшение громоздкости инструмента, повышение степеней свободы, решает проблему точки опоры, исключает дрожание рук [3].

Первый конструктивный шаг в сфере роботизированной хирургии был сделан около 33 лет назад. Это робот PUMA 200 (Питтсбург, Пенсильвания), использовавшийся при биопсии головного мозга [4]. С тех пор роботизированная хирургия получила стремительное развитие и распространение по всему миру. Причиной этому послужили опции, которые отсутствуют при традиционном хирургическом под-

ходе. Самым главным преимуществом роботизированных операций является быстрый период восстановления пациента после хирургического вмешательства [5]. Одним из пионеров в сфере роботизированной хирургии стала платформа daVinci Intuitive Surgical System. Она применяется в урологии, проктологии, гинекологии, кардиохирургии, эндокринологии и других медицинских специальностях [6]. На сегодняшний день существует третье поколение daVinci Surgical System — Xi. Она является ориентиром для появления новых, уже заявленных и проходящих клиническую апробацию роботических платформ. Согласно ежегодному отчёту за 2017 г., во всём мире установлено более 4 тыс. daVinci Surgical System (за всё время), с её применением проводится около 1 млн операций в год [7]. Стоит отметить, что в России первый робот системы daVinci появился в 2007 г. [8]. DaVinci стала самой распространённой и признанной системой в мире и является весомой альтернативой открытым хирургическим вмешательствам.

К недостаткам daVinci Surgical System, помимо высокой стоимости (1,3–1,7 млн долл. само оборудование, около 150 тыс. долл. годовое обслуживание, а также специальные одноразовые инструменты [9]), необходимо отнести чрезвычайно высокие соотношения массы манипулятора к полезной нагрузке, а также размеров звеньев к размеру рабочей зоны.

Проведём структурный анализ роботизированной хирургической системы daVinci. Для этого рассмотрим один из манипуляторов daVinci S (рис. 1). Механизм содержит девять звеньев (1'–9'), одну поступательную (5) и восемь вращательных (1–4, 6–8) кинематических пар, причём схема имеет по-

¹ Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования, Москва

² Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской Академии наук, Москва

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

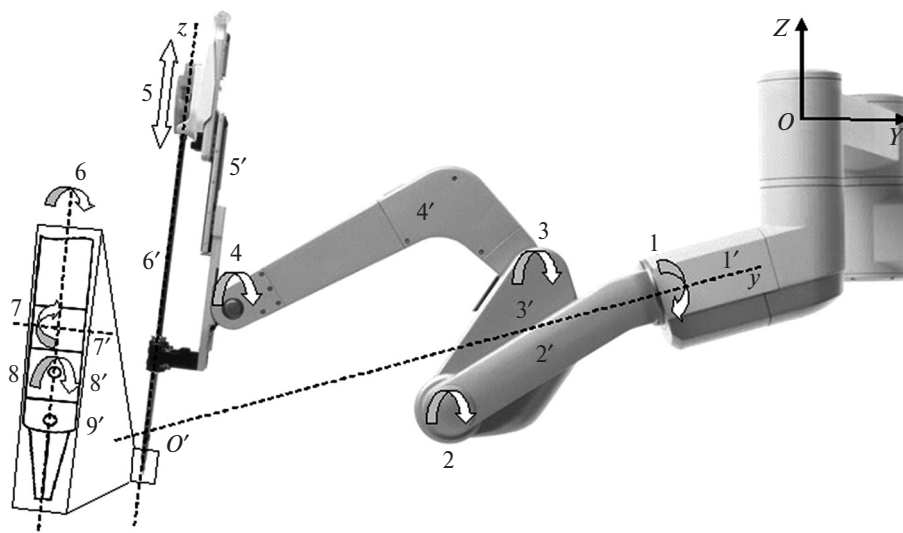


Рис. 1. Один из манипуляторов daVinci S.

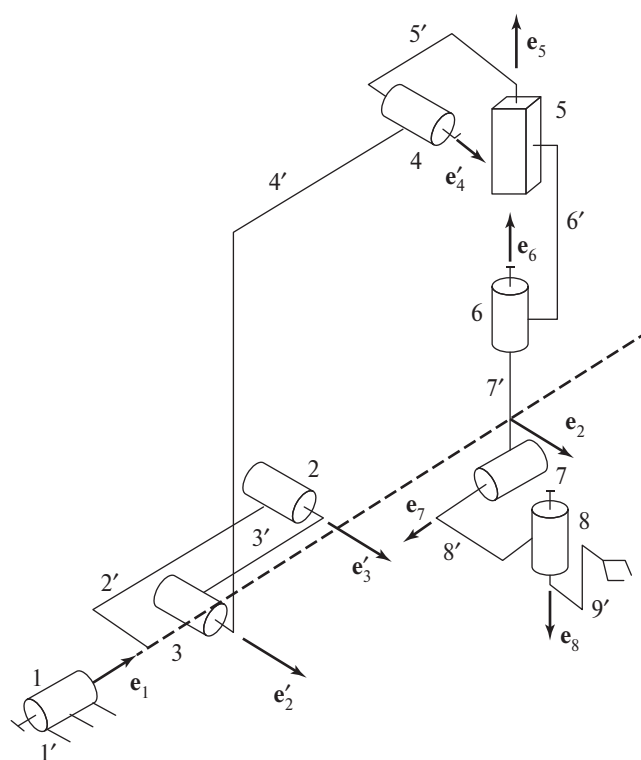


Рис. 2. Кинематическая схема одного из манипуляторов daVinci S.

следовательную структуру (рис. 2). Используя формулу Сомова—Малышева, получим число степеней свободы механизма относительно неподвижного основания:

$$W = 6(n - 1) - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1 = 6 \cdot (9 - 1) - 5 \cdot 8 = 8, \quad (1)$$

где W — число степеней свободы, n — число звеньев кинематической цепи, p_i — количество кинематических пар i -го класса.

Дополнительные степени свободы необходимы для обеспечения постоянства точки ввода инструмента. Для этого используются вращения 1—4, причём кинематическая пара 1 даёт вращение вокруг оси y , а пары 2—4 — вокруг оси, перпендикулярной ей (оси x), но с постоянной точкой пересечения осей O' (рис. 1).

Покажем избыточность используемых в схеме приводов. Рассмотрим единичные винты, проходящие вдоль осей кинематических пар 2, 3, 4. Плюскеры координаты единичных винтов осей кинематических пар в связанной с основанием неподвижной системе координат $OXYZ$ в начальном положении будут: $\mathbf{e}'_2 = (1, 0, 0, 0, y'_2, z'_2)$; $\mathbf{e}'_3 = (1, 0, 0, 0, y'_3, z'_3)$; $\mathbf{e}'_4 = (1, 0, 0, 0, y'_4, z'_4)$. Зададим единичный винт $\mathbf{e}_2 = (1, 0, 0, 0, y_2, z_2)$, где y_2 и z_2 находятся из системы

$$\begin{aligned} \Omega_2 + \Omega_3 + \Omega_4 &= 1, \\ \Omega_2 \cdot y'_2 + \Omega_3 \cdot y'_3 + \Omega_4 \cdot y'_4 &= y_2, \\ \Omega_2 \cdot z'_2 + \Omega_3 \cdot z'_3 + \Omega_4 \cdot z'_4 &= z_2, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\Omega_2, \Omega_3, \Omega_4$ — угловые скорости, которые обеспечивают требуемое расположение оси $\mathbf{e}_2$, в частности на пересечении оси $\mathbf{e}_1$ и оси инструмента.

Нетрудно понять, что при любых y_2 и z_2 решение системы (2) существует, а значит, кинематические пары 2—4 могут быть заменены одной. Таким образом, три кинематические пары с приводами дают только одну степень свободы, следовательно, выходное звено (рабочий орган) имеет 6 степеней свободы.

Следствием выбора последовательной схемы робота daVinci явилась необходимость включения двух дополнительных кинематических цепей с приво-

дами, а принимая во внимание, что каждый следующий привод располагается на конце предшествующего звена и общая длина манипулятора составляет несколько метров (при размере рабочей зоны не более 15 см), общий вес компонентов одной “руки” составил порядка 80 кг (при весе самого инструмента, размещённого на её конце, порядка 20 г), что приводит к снижению позиционной точности [10, 11].

Использование механизмов параллельной структуры сводит к минимуму перечисленные выше недостатки [12, 13]. Указанные манипуляторы, в которых выходное звено связано с основанием несколькими кинематическими цепями, отличаются повышенными показателями по точности и грузоподъёмности в сравнении с обычными роботами, имеющими последовательную структуру и воспринимающими нагрузку как консоль [14, 15].

Альтернативный механизм (рис. 3) имеет параллельную структуру и не требует избыточных приводов. Он включает в себя три кинематические цепи, каждая из которых содержит приводную каретку, расположенную на круглой направляющей, вращательную кинематическую пару и сферическую кинематическую пару, связанную с подвижной платформой, причём оси всех вращательных пар пересекаются в точке O . Кроме того, на подвижной платформе установлен поступательный двигатель, ось которого также проходит через точку O , перемещающий центральную штангу, на конце которой последовательно находятся две вращательные кинематические пары с перпендикулярными друг другу осями и инструмент. Центр O является точкой ввода инструмента.

Проведём структурный анализ представленного механизма. Механизм содержит 11 звеньев ($1'-11'$), одну поступательную (10), 8 вращательных (1–6, 11–12) и 3 сферических (7–9) кинематических пары (рис. 3). Используя формулу Сомова—Малышева, получим число степеней свободы механизма относительно неподвижного основания:

$$W = 6 \cdot (n - 1) - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1 = 6 \cdot (11 - 1) - 5 \cdot 9 - 3 \cdot 3 = 6, \quad (3)$$

где W — число степеней свободы, n — число звеньев кинематической цепи, p_i — количество кинематических пар i -го класса.

Покажем, что движения механизма не меняют положения центра O . Для этого рассмотрим единичные винты, проходящие вдоль осей кинематических пар. Свяжем с основанием неподвижную систему координат $OXYZ$, центр которой совпадает с цент-

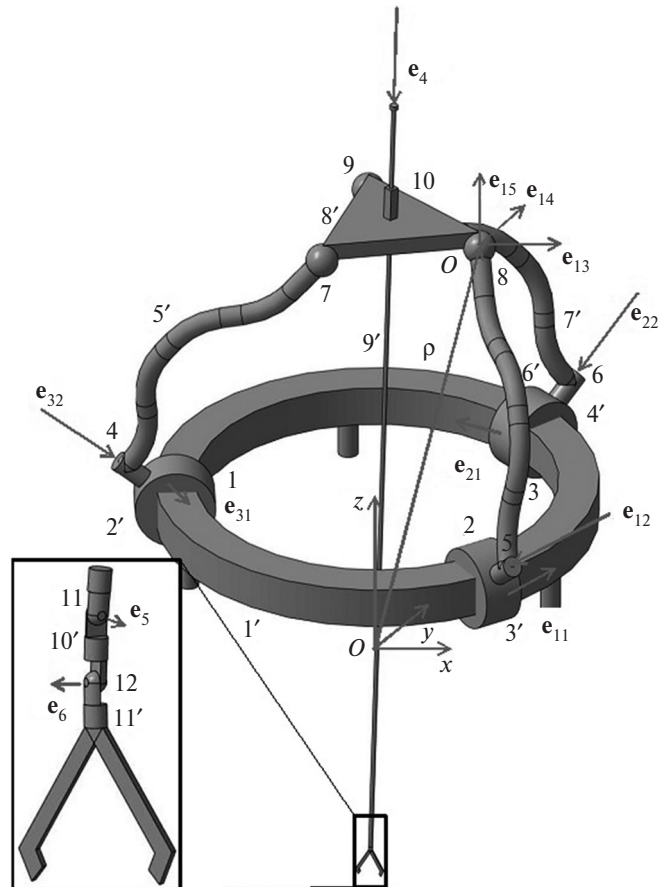


Рис. 3. Схема механизма с шестью степенями свободы для лапароскопических операций.

ром O . Тогда плюккеровы координаты единичных винтов кинематических цепей будут: $\mathbf{e}_{11} = \mathbf{e}_{21} = \mathbf{e}_{31} = (0, 0, 1, 0, 0, 0)$; $\mathbf{e}_{12} = (x_{12}, y_{12}, z_{12}, 0, 0, 0)$; $\mathbf{e}_{13} = (1, 0, 0, 0, y_{13}, z_{13})$; $\mathbf{e}_{14} = (0, 1, 0, x_{14}, 0, z_{14})$; $\mathbf{e}_{15} = (0, 0, 1, x_{15}, y_{15}, 0)$; $\mathbf{e}_{22} = (x_{22}, y_{22}, z_{22}, 0, 0, 0)$; $\mathbf{e}_{23} = (1, 0, 0, 0, y_{23}, z_{23})$; $\mathbf{e}_{24} = (0, 1, 0, x_{23}, 0, z_{23})$; $\mathbf{e}_{25} = (0, 0, 1, x_{23}, y_{23}, 0)$; $\mathbf{e}_{32} = (x_{32}, y_{32}, z_{32}, 0, 0, 0)$; $\mathbf{e}_{33} = (1, 0, 0, 0, y_{33}, z_{33})$; $\mathbf{e}_{34} = (0, 1, 0, x_{33}, 0, z_{33})$; $\mathbf{e}_{35} = (0, 0, 1, x_{33}, y_{33}, 0)$.

Можно показать, что указанные единичные винты обеспечивают движения платформы лишь вокруг точки O (сферические движения). Действительно, оси первых двух кинематических пар каждой цепи ($\mathbf{e}_{11}, \mathbf{e}_{21}, \mathbf{e}_{31}$) проходят через точку O и, следовательно, дают лишь соответствующие вращения, а оси трёх конечных вращательных пар, соответствующих сферическому шарниру, проходят через одну точку (центр сферы) и могут при геометрическом суммировании обусловить одно вращение, ось которого также проходит через центр O .

Пусть вектор ρ соединяет начало координат O и центр рассматриваемого шарнира O_1 . Нетрудно понять, что $y_{13} = \rho_z$, $z_{13} = \rho_y$, $x_{14} = \rho_z$, $y_{14} = \rho_x$, $x_{15} = \rho_y$, $y_{15} = \rho_x$. Из этого следует, что имеется скользящий

Таблица 1. Сравнение параметров механизмов

Манипулятор	Количество степеней свободы (без учёта инструмента)	Количество приводов	Вес без учёта основания, кг	Размер рабочей области (см×см×см)	Позиционная точность, мм	Возможность увеличения рабочей нагрузки	Независимость от импортных поставщиков и поддержки	Использование стандартных лапароскопических инструментов
daVinci S	6	8	80	15×15×15	1,05±0,24	Нет	Нет	Нет
Альтернативный механизм	6	6	8	15×15×15	0,13±0,03	Да	Да	Да

вектор, проходящий через центр O — он определяет скорость в сферической паре. Подобные соотношения существуют для всех трёх кинематических цепей. Соответственно, подвижная платформа совершает вращение лишь вокруг точки O — это обуславливает постоянство центра введения инструмента.

Поскольку оси инструмента проходят через точку O , то движения вдоль оси инструмента, осуществляемые поступательным приводом, расположенным на платформе, не меняют положение указанной точки, т.е. данный механизм обеспечивает сохранение центра ввода инструмента без наличия избыточности приводов, что выгодно отличает его от робота daVinci. Кроме того, приводы установлены ближе к основанию, а кинематические цепи могут содержать лишь достаточно лёгкие звенья. Эти обстоятельства обуславливают снижение веса и габаритов примерно в 10 раз.

Данный механизм с 6 степенями свободы может быть весьма полезен в хирургии не только как аналог обычного лапароскопа, но и как устройство для перемещения видеокамеры, а также других вспомогательных инструментов. В Институте машиноведения РАН изготовлен прототип подобного робота (рис. 4).

Каретки сопрягаются с круговой направляющей посредством зубчатой передачи, при этом на каретках установлены двигатели, осуществляющие вращение приводных зубчатых колёс.

В заключение приведём часть сравнительной таблицы манипуляторов daVinci Surgical System и альтернативного механизма, отражающей основные различия, являющиеся следствием применения принципиально разных структурных схем (табл. 1).

Таким образом, проведён структурный анализ daVinci Surgical System. Предложена разработанная схема хирургического робота, лишённого выявленных проблем, и представлен его прототип.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Minimally Invasive Surgery Market — Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends & Forecast

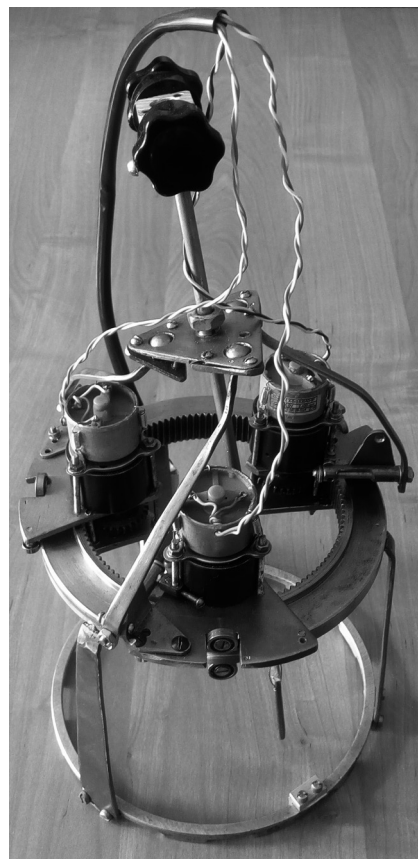


Рис. 4. Прототип механизма параллельной структуры с постоянной точкой входа.

- 2013–2019. Transparency Market Research. Albany (NY), Tech. Rept. 2014.
2. Велюев 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. Rosen J., Hannaford B., Satava R.M. Surgical Robotics. Systems Applications and Visions. B.: Springer / Science+Business Media, 2011. 843 p.
4. Kwoh Y.S., Hou J., Jonckheere E.A., Hayati S. A Robot with Improved Absolute Positioning Accuracy for CT Guided Stereotactic Brain Surgery // IEEE Trans. Biomed. Eng. 1988. V. 35. № 2. P. 153–160.

5. *Maeso S., Reza M., Mayol J.A., Blasco J.A., Guerra M., Andradas E., Plana M.N.* Efficacy of the da Vinci Surgical System in Abdominal Surgery Compared with That of Laparoscopy: A Systematic Review and Meta-analysis // *Ann Surg.* 2010. V. 252. № 2. P. 254–262.
6. *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.
7. *Ann. Rept.* 2017 (2018) Intuitive Surgical.
8. *Краснопольский В.И., Попов А.А., Мананникова Т.Н., Федоров А.А., Слободянюк Б.А., Коваль А.А., Мироненко К.В.* Робот-ассистированная хирургия в онкогинекологии // *Онкогинекология.* 2014. № 3. С. 23–31.
9. *Prewitt R., Bochkarev V., McBride C.L., Kinney S., Oleynikov D.* The Patterns and Costs of the Da Vinci Robotic Surgery System in a Large Academic Institution // *J. Robot. 2008. Surg. V. 2. P. 17–20.*
10. *Kwartowitz D.M., Herrell S.D., Galloway R.L.* Update: Toward Image-Guided Robotic Surgery: Determining the Intrinsic Accuracy of the DaVinci-S Robot // *Int. J. CARS.* 2007. V. 1. P. 301–304.
11. *Tsuda Sh., Oleynikov D., Gould J., Azagury D., Sandler B., Hutter M., Ross S., Haas E., Brody F., Satava R.* SAGES TAVAC Safety and Effectiveness Analysis: Da Vinci® Surgical System (Intuitive Surgical, Sunnyvale, CA) // *Surgical Endoscopy.* 2015. V. 29. Is. 10. P. 2873–2884.
12. *Ганиев Р.Ф., Глазунов В.А.* Манипуляционные механизмы параллельной структуры и их приложения в современной технике // *ДАН.* 2014. Т. 459. № 4. С. 428–431.
13. *Ганиев Р.Ф., Глазунов В.А.* Перспективы теории машин в связи с развитием современного машиностроения // *Инженерный журн. с прил.* 2015. Т. 5. № 218. С. 3–7.
14. *Чунихин А.Ю., Глазунов В.А.* Разработка механизмов параллельной структуры с пятью степенями свободы, предназначенных для технологических роботов // *Пробл. машиностроения и надежности машин.* 2017. № 4. С. 3–11.
15. *Глазунов В.А., Борисов В.А., Левин С.В., Шалюхин К.А., Шаранов И.Б.* Манипулятор параллельной структуры с пятью степенями степени подвижности. Пат. РФ на полезную модель № 169275 // *Бюл.* 2017. № 8.

PARALLEL AND SEQUENTIAL STRUCTURES OF MANIPULATORS IN ROBOTIC SURGERY

**E. I. Veliev, Academician of the RAS R. F. Ganiev,
V. A. Glazunov, G. S. Filippov**

Received October 5, 2018

The problems of modern robotics associated with the requirements for devices designed for various purposes are considered. The daVinci robotic surgical manipulation system is analyzed. The developed robotic system with a parallel structure designed for various kinds of surgical operations is proposed.

Keywords: laparoscopic surgical robot, daVinci Surgical System, parallel-sequential structure mechanism.