

РАЗРАБОТКА И СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА ПАРАЛЛЕЛЬНО-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ С ЧЕТЫРЬМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕГО ПОСТОЯНСТВО ТОЧКИ ВВОДА ВЫХОДНОГО ЗВЕНА

Рабичева Т.С.¹, Бровкина Ю.И.¹, Глазунов В.А.²

¹*Московский политехнический университет, Москва;*

²*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва*

Ключевые слова: роботизированная хирургия, механизм параллельно-последовательной структуры, закрытая цепь, постоянство точки ввода выходного звена, структурный анализ механизма, степень свободы.

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы синтеза механизмов с параллельно-последовательной структурой, обеспечивающие постоянство точки ввода выходного звена. Механизмы такой компоновки обладают преимуществами по сравнению с традиционными робототехническими системами по габаритно-массовым и динамическим характеристикам, а также в вопросах управления выходным звеном, и могут применяться в различных областях машиностроения, и в частности в роботизированной хирургии или для обработки деталей сложной формы. В представленной работе выполнен структурный анализ нескольких вариантов конструктивных схем механизмов с параллельно-последовательной структурой, обладающих четырьмя степенями свободы. Показаны структурные особенности каждой схемы, составлены структурные формулы, а также проведен сравнительный анализ синтезированных механизмов, который позволил определить наиболее предпочтительный вариант для проведения малоинвазивных операций в хирургии.

DEVELOPMENT AND STRUCTURAL ANALYSIS OF THE MECHANISM OF A PARALLEL-SEQUENTIAL STRUCTURE WITH FOUR DEGREES OF FREEDOM, ENSURING THE CONSTANCY OF THE INPUT POINT OF THE OUTPUT LINK

Rabicheva T.S.¹, Brovkina Yu.I.¹, Glazunov V.A.²

¹*Moscow Polytechnic University, Moscow;*

²*Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow*

Keywords: robotic surgery, mechanism of parallel-sequential structure, closed circuit, constancy of the input point of the output link, structural analysis of the mechanism, degree of freedom.

Abstract. The article considers the issues of synthesis of mechanisms with a parallel-sequential structure that ensure the constancy of the input point of the output link. Mechanisms of such an arrangement have advantages over traditional robotic systems in terms of dimensional, mass and dynamic characteristics, as well as in control of the output link, and can be used in various fields of mechanical engineering, and in particular in robotic surgery or for processing complex shaped parts. In the presented work, a structural analysis of several variants of constructive schemes of mechanisms with a parallel-sequential structure with four degrees of freedom is performed. The structural features of each scheme are shown, structural formulas are compiled, and a comparative analysis of the synthesized mechanisms is carried out, which made it possible to determine the most preferable option for minimally invasive surgery.

Введение

Современная медицина с каждым днем всё больше прибегает к роботизированной хирургии для проведения малоинвазивных операций в сфере кардиохирургии, урологии, эндокринологии, гинекологии, малоинвазивной полостной хирургии и т.д. Это связано с тем, что роботы позволяют минимизировать травматичность хирургических вмешательств, что ускоряет реабилитационное время пациентов. Поэтому актуальной задачей является вопрос синтеза механизмов [1], которые обеспечивают постоянство точки ввода выходного звена. Решение этого вопроса требует научного подхода [2]. На практике такого рода механизмы актуальны не только в роботизированной хирургии, но и для устройств для исследования плазмы, измерения и обработки деталей сложной формы и т.д.

Одним из известных механизмов, который широко применяется в роботизированной медицине, выступает робот daVinci Surgical System [3] (рис. 1), содержащий четыре манипулятора последовательной структуры, каждый из которой содержит девять звеньев, одну поступательную и восемь вращательных кинематических пар (КП). Робот daVinci позволяет проводить операции, минимизируя вмешательство в организм человека, что приводит к наименьшим кровопотерям и относительно быстрому восстановлению пациента. Кроме того, благодаря большой рабочей зоне робот daVinci позволяет проводить операции в труднодоступных местах. Робот обеспечивает точные траектории движения инструментов, запрограммированные для каждой работы, и позволяет избежать риска ошибки хирурга, таких как тремор рук.



Рис. 1. Робот daVinci Surgical System

Однако робот daVinci Surgical System имеет и ряд недостатков, таких как большая инертная масса и габариты, высокие соотношения массы механизма к полезной нагрузке, несоответствующие габариты звеньев по сравнению с размером рабочей зоны, высокая стоимость как оборудования, так и его обслуживания, и сложность в управлении. Поскольку робот daVinci имеет последовательную структуру, то для обеспечения постоянства точки ввода инструмента необходимы две дополнительные степени свободы, и как следствие этого, избыточное наличие приводов, которые ведут к увеличению массовых и габаритных размеров механизма. Стоит отметить также сложность управления механизмами последовательной структуры, имеющими открытую кинематическую цепь, поскольку они требуют постоянной калибровки [4].

Поэтому актуальной задачей является разработка механизмов, выполняющих аналогичные технологические задачи, но имеющих меньшую массу и габариты, а также простоту обслуживания [5, 6]. Решением этой задачи могут служить механизмы параллельной кинематики. По сравнению с механизмами последовательной структуры, механизмы параллельной структуры отличаются повышенной грузоподъемностью, точностью и жесткостью, за счет чего в последнее время пользуются в машиностроении большой популярностью [7]. Благодаря своей замкнутой структуре, где выходное звено связано с основанием несколькими кинематическими цепями, в большинстве случаев симметричными, механизм воспринимает нагрузку как ферма и позволяет при относительно меньших габаритах и массе воспринимать большую нагрузку.

Методология исследований

В данной статье предложены три вариации механизма параллельно-последовательной структуры с четырьмя степенями свободы, обеспечивающие постоянство точки ввода выходного звена [8, 9]. Все механизмы имеют одинаковые кинематические характеристики, но отличаются структурой, которая дает механизму свои преимущества и недостатки. В основе конструкции синтезируемого механизма лежит сферический механизм, представляющий собой звено в виде треугольной платформы, связанной с тремя параллельными симметричными кинематическими цепями, и допускающий только вращательные движения относительно неподвижной системы координат, а для увеличения рабочей зоны выходного звена последовательно установлен линейный привод, обеспечивающий четвертую линейную подвижность выходного звена вдоль оси, проходящей через точку ввода неподвижной системы координат. Механизмы обеспечивают не только вращение выходного звена по трем координатам относительно заданной точки ввода, но и поступательное перемещение вдоль линий, проходящей также через данную точку ввода.

Рассмотрим первый вариант механизма параллельно-последовательной кинематики с четырьмя степенями свободы, обеспечивающего постоянство точки ввода выходного звена

(рис. 2). Механизм состоит из звена в виде треугольной платформы и трех кинематических цепей, каждая из которых имеет по 3 вращательные кинематические пары, оси каждой из которых пересекаются в одной точке, за счет чего платформа имеет возможность совершать только три вращения относительно точки пересечения осей кинематических пар. Данная конфигурация обеспечивает высокую точность и простоту проектирования и изготовления механизма.

Степень свободы механизма определяется как сумма степеней свободы сферического механизма и степени свободы последовательно установленного линейного привода.

Так как сферический механизм включает в себя 7 подвижных звеньев и 9 вращательных кинематических пар пятого класса, которые пересекаются в одной точке и накладывают одинаковое количество ограничений, то к данному пространственному механизму применима формула П.Л. Чебышева [10]:

$$W_{сфер.м.} = 3n - 2p_5 - p_4 = 3 \cdot 7 - 2 \cdot 9 = 3, \quad (1)$$

где $W_{сфер.м.}$ – степень свободы сферического механизма; n – число подвижных звеньев; p_5 – количество КП 5-го класса; p_4 – количество КП 4-го класса.

Тогда механизм параллельно-последовательной структуры имеет степень свободы, равную:

$$W = W_{сфер.м.} + 1 = 3 + 1 = 4. \quad (2)$$

Далее рассмотрим второй вариант механизма параллельно-последовательной структуры с четырьмя степенями свободы, обеспечивающего постоянство точки ввода выходного звена (рис. 3). В этом механизме заменили 6 вращательных неприводных кинематических пар на цилиндрические. По сравнению с предыдущим вариантом, где все кинематические пары вращательные, за счет второй линейной подвижности цилиндрической пары, которая имеет возможность линейного перемещения при необходимости на небольшой ход, механизм имеет возможность выходить с особых положений, то есть избегать возможности заклинивания.

Для данной конфигурации степень свободы определяется следующим образом.

Параллельный механизм включает 7 подвижных звеньев, соединяемых тремя вращательными одноподвижными парами пятого класса и шестью цилиндрическими двухподвижными кинематическими парами четвертого класса. Так как кинематические пары механизма накладывают разные ограничения, то степень свободы пространственного механизма считаем по формуле Сомова-Малышева [10]:

$$W_{простр.м.} = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1 = 6 \cdot 7 - 5 \cdot 3 - 4 \cdot 6 = 3, \quad (3)$$

где p_3 – количество КП 3-го класса; p_2 – количество КП 2-го класса; p_1 – количество КП 1-го класса.

Тогда механизм параллельно-последовательной структуры имеет степень свободы, равную:

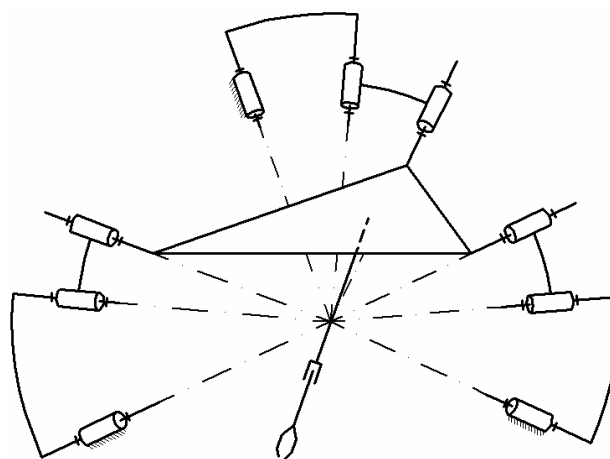


Рис. 2. Схема механизма с 9-ю вращательными КП

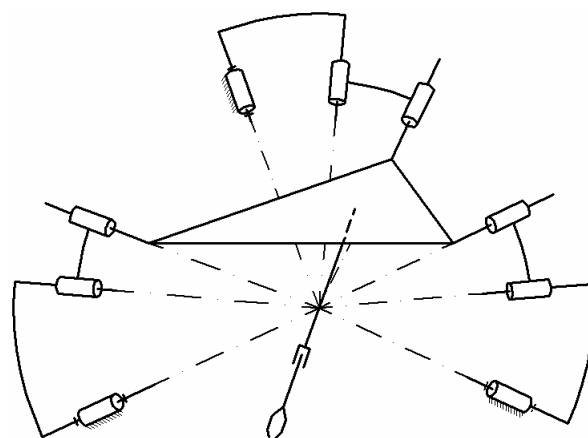


Рис. 3. Схема механизма с 3-мя вращательными КП и 6-ю цилиндрическими КП

$$W = W_{\text{простр.м.}} + 1 = 3 + 1 = 4. \quad (4)$$

Рассмотрим третий вариант механизма параллельно-последовательной структуры с четырьмя степенями свободы, обеспечивающего постоянство точки ввода выходного звена (рис. 4). В этом механизме заменили 3 вращательные кинематические пары, связывающие платформу с тремя кинематическими цепями сферическими кинематическими парами. За счет сферической кинематической пары, которая имеет 3 вращательных подвижности, механизм по сравнению с двумя предыдущими вариантами считается более гибким, что помогает избежать особых положений, то есть предотвратить возможное заклинивание.

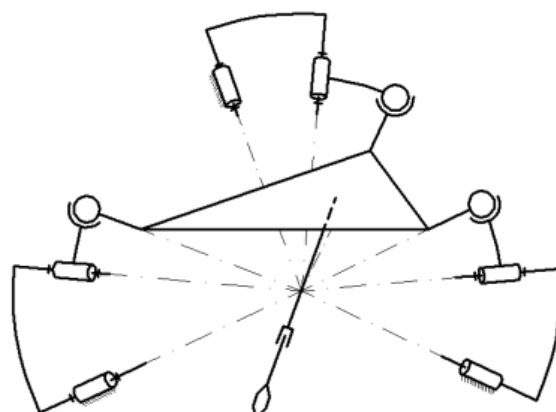


Рис. 4. Схема механизма с 6-ю вращательными КП и 3-мя сферическими КП

Согласно структурному анализу, механизм содержит семь подвижных звеньев, соединяемых шестью вращательными одноподвижными парами пятого класса и тремя сферическими трехподвижными кинематическими парами третьего класса. Так как кинематические пары механизма накладывают разные ограничения, то степень свободы пространственного механизма считаем по формуле Сомова-Малышева [10]:

$$W_{\text{простр.м.}} = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1 = 6 \cdot 7 - 5 \cdot 6 - 3 \cdot 3 = 3. \quad (3)$$

Тогда механизм параллельно-последовательной структуры имеет степень свободы, равную:

$$W = W_{\text{простр.м.}} + 1 = 3 + 1 = 4. \quad (4)$$

В таблице 1 приведены результаты анализа трех приведенных вариантов механизма.

Табл. 1. Сравнительный анализ схем механизмов

	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 2
Особенности структуры	9 вращательных КП	6 цилиндрических и 3 вращательных КП	6 вращательных и 3 сферических КП
Преимущества	Простота изготовления	Возможность механизма самостоятельно выходить из особых положений, избегая заклинивания	Механизм не имеет особых положений и, следовательно, нет возможности заклинивания
Недостатки	При попадании механизма в положение, являющееся особым, появляется возможность заклинивания	Возможность возникновения местной подвижности	Сложность изготовления

Выводы

Учитывая небольшую рабочую зону, необходимую для проведения малоинвазивных операционных работ, среди синтезированных механизмов более предпочтительна первая схема, имеющая 9 вращательных кинематических пар. Поскольку требуется небольшая рабочая зона, то риск заклинивания минимизируется, но при этом данный механизм обладает лучшей технологичностью для изготовления и большой экономической целесообразностью.

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда, проект №23-19-00258.

Список литературы

1. Указ Президента РФ от 01.12.2016 №642 «Об утверждении стратегии научно-технологического развития Российской Федерации».
2. Механизмы перспективных робототехнических систем / Под ред. В.А. Глазунова, С.В. Хейло. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020. – 296 с.
3. Пушкарь Д.Ю., Говоров А.В., Колонтарев К.Б. Робот-ассистированная хирургия // Вестник Российской академии наук. – 2019. – Т. 89, №5. – С. 466-469. – doi.org/10.31857/S0869-5873895466-469.
4. Кошербаева Л.К., Куракбаев К.К., Кумар А.Б., Дуйсекеев А.Д., Надыров К.Т., Калматаева Ж.А. Оценка экономической эффективности внедрения робот-ассистированной хирургической системы «DA VINCI» // Вестник КазНМУ. – 2014. – №4. – С. 434-437.
5. Глазунов В.А. Механизмы параллельной структуры и их применение: робототехнические, технологические, медицинские, обучающие системы. – М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2018. – 1036 с.
6. Богус З.Р., Нджомон М.Н., Шишкин М.В., Корниенко В.Г. Обзор механизмов с параллельной кинематикой // Научные труды КубГТУ. – 2016. – №10. – С. 86-97.
7. Филиппов Г.С. Научное обоснование и разработка механизмов параллельно-последовательной структуры для многокоординатных манипуляционных систем: Автореф. дисс. ... докт. техн. наук. – М.: ИМАШ РАН, 2019. – 32 с.
8. Духов А.В., Романов А.А., Ерофеев М.Н., Кравченко И.Н., Николаев А.В. Разработка и анализ механизма параллельной структуры, имеющего дугообразные направляющие с прорезями и постоянную точку ввода // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2022. – № 1. – С. 31-38. – doi.org/10.18698/0536-1044-2022-1-31-38.
9. Gogu G. Structural Synthesis of Parallel Robots. Part 1: Methodology. – Springer, Dordrecht, 2008. – 706 p.
10. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин. – М.: Наука, 1988. – 640 с.

References

1. Decree of the President of the Russian Federation dated December 01, 2016 No. 642 "On approval of the strategy of scientific and technological development of the Russian Federation".
2. Mechanisms of promising robotic systems / Edited by V.A. Glazunov, S.V. Heilo. – M.: TECHNOSPHERE, 2020. – 296 p.
3. Pushkar D.Yu., Govorov A.V., Kolontarev K.B. Robot-assisted surgery // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2019, vol. 89, no. 5, pp. 466-469. doi.org/10.31857/S0869-5873895466-469.
4. Kosherbaeva L.K., Kurakbaev K.K., Kumar A.B., Duisekeev A.D., Nadyrov K.T., Kalmataeva Zh.A. Evaluation of the economic efficiency of the implementation of the robot-assisted surgical system "DA VINCI" // Bulletin of KazNMU. 2014, no. 4, pp. 434-437.
5. Glazunov V.A. Mechanisms of parallel structure and their application: robotic, technological, medical, educational systems – M.-Izhevsk: Institute of Computer Research, 2018. – 1036 p.
6. Bogus Z.R., Ndzhomon M.N., Shishkin M.V., Kornienko V.G. Review of mechanisms with parallel kinematics // Scientific works of KubSTU. 2016, no. 10, pp. 86-97.
7. Filippov G.S. Scientific substantiation and development of parallel-sequential structure mechanisms for multi-coordinate manipulation systems: Abstract of the diss. ... doct. of tech. sc. – M.: IMASH RAS, 2019. – 32 p.
8. Dukhov A.V., Romanov A.A., Yerofeev M.N., Kravchenko I.N., Nikolaev A.V. Development and analysis of the mechanism of a parallel structure having arc-shaped guides with slots and a constant point of entry // News of Higher educational institutions. Mechanical engineering. 2022, no. 1, pp. 31-38. doi.org/10.18698/0536-1044-2022-1-31-38.
9. Gogu G. Structural Synthesis of Parallel Robots. Part 1: Methodology. – Springer, Dordrecht, 2008. – 706 p.
10. Artobolevskiy I.I. Theory of mechanisms and machines – M.: Science, 1988. – 640 p.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Рабичева Татьяна Сергеевна – преподаватель	Rabicheva Tatyana Sergeevna – teacher
Бровкина Юлия Игоревна – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой	Brovkina Yuliya Igorevna – candidate of technical sciences, associate professor, head of the Department
Глазунов Виктор Аркадьевич – доктор технических наук, профессор, директор	Glazunov Viktor Arkadyevich – doctor of technical sciences, professor, director
rabichewa_97@mail.ru	

Получена 13.11.2024