

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРИВОДОВ МАНИПУЛЯТОРОВ ДЛЯ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПОДВИЖНЫХ ПЛАТФОРМ

Зубков М.К.¹, Курасов Д.А.²

¹*Московский университет СИНЕРГИЯ, Москва;*

²*Тюменский индустриальный университет, Тюмень*

Ключевые слова: гексапод, эксцентриситет, кинематическая схема, платформа, приводы, зубчатый эксцентриковый подшипник, винтовая передача, позиционирование.

Аннотация. Статья посвящена сравнительному анализу кинематических компоновок гексапода и разработке перспективного решения для повышения эффективности его приводов. Проведена оценка достоинств и недостатков каждой схемы: 6х6, 6х3, 3х6, 3х3. Выявлено, что ключевым ограничением широкого внедрения высокоточных гексаподов является сложность и высокая стоимость традиционных электромеханических приводов на основе винтовых передач. В качестве решения предложена замена винтовых передач на зубчатый эксцентриковый подшипник. Показано, что конструкция зубчатого эксцентрикового подшипника существенно проще, обладает повышенной жесткостью и устойчивостью к перекосам, что потенциально снижает производственные затраты и стоимость эксплуатации. Внедрение зубчатого эксцентрикового подшипника способно повысить надежность и доступность высокопроизводительных гексаподных систем для задач прецизионного позиционирования в машиностроении, робототехнике и испытательном оборудовании. Обозначены направления дальнейших исследований для валидации предложенного решения.

IMPROVEMENT OF MANIPULATOR DRIVES FOR POSITIONING MOBILE PLATFORMS

Zubkov M.K.¹, Kurasov D.A.²

Moscow University SINERGIA, Moscow;

Tyumen Industrial University, Tyumen

Keywords: hexapod, eccentricity, kinematic diagram, platform, drives, gear eccentric bearing, screw gear, positioning.

Abstract. The article is devoted to a comparative analysis of the kinematic arrangements of the hexapod and the development of a promising solution to improve the efficiency of its drives. The advantages and disadvantages of each scheme were evaluated: 6x6, 6x3, 3x6 3x3. It has been revealed that the key limitation of the widespread introduction of high-precision hexapods is the complexity and high cost of traditional electromechanical drives based on screw gears. The replacement of helical gears with a gear eccentric system is proposed as a solution. It is shown that the design of the gear eccentric bearing is significantly simpler, has increased rigidity and resistance to distortion, which potentially reduces production costs and operating costs. The introduction of the gear eccentric bearing is capable of increasing the reliability and availability of high-performance hexapode systems for precision positioning tasks in mechanical engineering, robotics, and test equipment. The directions of further research for the validation of the proposed solution are outlined.

Введение

Современные технологии в области автоматизации и робототехники активно развиваются, предлагая новые решения для высокоточного управления движением. Одним из таких решений являются механизмы с параллельной кинематикой, среди которых особое место занимает гексапод (рис. 1). В отличие от традиционных последовательных роботов, где звенья соединены последовательно, гексапод основан на параллельной структуре, что обеспечивает ему высокую жесткость, точность и динамическую стабильность. Гексапод нашел широкое применение в различных областях, включая авиа- и машиностроение (симуляторы полета, вибростенды), медицинскую робототехнику (хирургические системы), станкостроение (фрезерные и шлифовальные станки), а также в научных исследованиях.



Рис. 1. Гексапод

Управление таким механизмом требует сложных алгоритмов кинематики и динамики, что делает разработку соответствующих систем управления актуальной задачей.

Материалы и методы исследования

Гексапод представляет собой механизм параллельной кинематики, обеспечивающий подвижной платформе шесть степеней свободы и характеризующийся высокой точностью позиционирования. Кинематическая структура механизма (рис. 2) основана на соединении платформы и основания шестью независимыми телескопическими штангами (ногами), каждая из которых образует поступательную кинематическую пару. Крепление штанг к основанию и платформе осуществляется посредством сферических шарниров, при этом конструкция исключает вращение штанги вокруг собственной продольной оси [1].

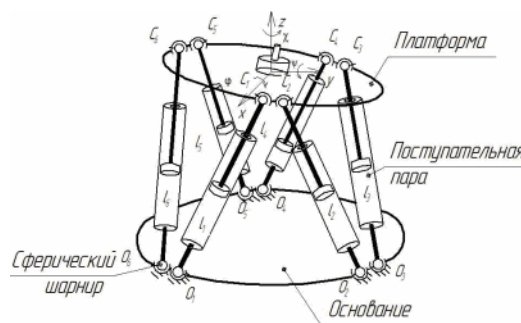


Рис. 2. Схема гексапода

Компоновка станочного оборудования на базе гексапода варьируется в зависимости от расположения основания относительно рабочей зоны. Основание может быть установлено в нижней, верхней части станка или на боковой стойке, что определяет вертикальную, горизонтальную или промежуточную (с боковым основанием) компоновку [2]. Хотя наиболее распространено крепление инструментальной головки непосредственно к подвижной платформе, существуют конфигурации, в которых гексапод приводит в движение стол с заготовкой, расположенный под статично закрепленным инструментом.

Размещение и конструкция рабочего стола являются важными аспектами проектирования, влияющими на рабочую зону, технологические возможности и удобство обслуживания. Стол может крепиться: в геометрическом центре основания или платформы; вне пространства, ограниченного конструкцией гексапода.

Приводная система гексаподов может быть реализована на основе различных технологий: электромеханические приводы (включая варианты как с самотормозящимися передачами, так и без них); пьезоэлектрические приводы; электрогидравлические приводы; электромагнитные приводы.

В системах управления технологическим оборудованием типа «гексапод» находят применение различные датчики обратной связи: акселерометры, датчики скорости, тензометрические датчики (датчики напряжения), силоизмерительные датчики (силомеры) и другие [3].

Существует четыре схемы компоновки гексапода: 3х3, 3х6, 6х3, 6х6 (рис. 3).

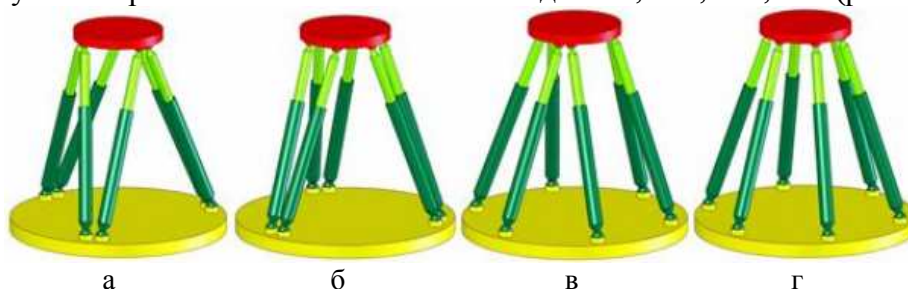


Рис. 3. Компоновочные схемы гексапода: а) 3х3, б) 3х6, в) 6х3, г) 6х6

Достоинства компоновки 6х6 (рис. 3, г).

1. Экономическая эффективность: конструкция использует стандартные шаровые или универсальные шарниры для соединения всех шести штанг с основанием и платформой, что упрощает производство и снижает затраты.

2. Высокая угловая подвижность: при использовании идентичных линейных приводов данная схема обеспечивает больший диапазон угловых перемещений платформы за счет большего угла наклона штанг относительно плоскости платформы.

Недостаток компоновки 6х6 (рис. 3, г): сложность математической модели: кинематическое описание системы требует решения высокоразмерной системы нелинейных уравнений, что усложняет анализ и синтез управления [4].

Достоинства компоновки 6х3 (рис. 3, в) и 3х6 (рис. 3, б).

1. Упрощенная кинематика: соединение штанг с платформой только в трех узлах существенно снижает сложность кинематических уравнений по сравнению со схемой 6х6, уменьшая количество неизвестных переменных.

2. Сниженная инерционная нагрузка: меньшее количество шарниров на подвижной платформе способствует уменьшению ее массы, что теоретически позволяет достигать более высоких скоростей и ускорений перемещения, чем в компоновке 6х6.

3. Сниженные потери на трение: уменьшение числа шарнирных соединений на платформе прямо ведет к снижению общих потерь мощности на трение в этих узлах.

Недостаток компоновки 6х3 (рис. 3, в) и 3х6 (рис. 3, б): высокая стоимость специализированных компонентов: реализация данной схемы требует применения дорогостоящих сдвоенных сферических шарниров, производимых ограниченным числом компаний [5].

Достоинства компоновки 3х3 (рис. 3, а).

1. Минимальная масса: использование наименьшего количества шарниров среди рассматриваемых схем обеспечивает минимальную общую массу подвижной части механизма.

2. Простота моделирования: данная компоновка обладает наиболее простым кинематическим описанием, что значительно упрощает алгоритмы управления и повышает точность позиционирования [6].

3. Минимальные потери на трение: благодаря минимальному числу шарнирных соединений в системе наблюдаются наименьшие потери энергии на трение.

Недостатки компоновки 3х3.

1. Необходимость использования шести специализированных шарниров (аналогичных или идентичных применяемым в схеме 6х3) обуславливает высокую стоимость конструкции.

2. Сниженная кинематическая чувствительность: основным кинематическим недостатком является меньшая чувствительность платформы к изменению длины штанг. Для достижения сопоставимого изменения положения и, особенно, ориентации платформы по сравнению с другими схемами (особенно 6х6) требуется большее абсолютное изменение длины приводов [7].

Результаты

Традиционные электромеханические приводы обладают, как достоинствами, так и недостатками. Несмотря на широкое распространение и преимущества в эксплуатации электромеханические приводы на основе шарико-винтовых пар (ШВП) или роliko-винтовых передач (РВП) обладают существенными конструктивными недостатками [8]. Высокая точность позиционирования и нагрузочная способность таких приводов достигаются за счет значительной сложности изготовления и сборки. Требования к точности геометрии винта, гайки, шариков/роlikов и их траекторий движения, а также к качеству поверхностей являются крайне жесткими. Это приводит к существенному удорожанию производства компонентов и повышенным затратам на прецизионную сборку и регулировку. Кроме того, сложная кинематическая цепь (двигатель → муфта → подшипники опор → ШВП/РВП) содержит большое количество деталей и сопряжений, что снижает общую жесткость системы, увеличивает массу, инерцию и вероятность возникновения люфтов или отказов [9].

В качестве перспективной альтернативы винтовым передачам в линейных приводах гексаподов предлагается использовать зубчатый эксцентриковый подшипник (ЗЭП) [10] (рис. 4). Он состоит из ведущего вала 1, закреплённой на нём внешней шестерни 2, внутреннего кольца 3 с внутренними зубьями, нескольких сателлитов 4 разного диаметра (обеспечивающих эксцентриситет), ведомого звена 5 и гибкой муфты 6, жёстко связанной с ведомым звеном. Принцип действия ЗЭП основан на преобразовании вращательного движения входного вала в линейное перемещение выходного звена посредством

эксцентриситета и зубчатого зацепления. Конструкция гексапода на основе ЗЭП представлена на рисунке 5.

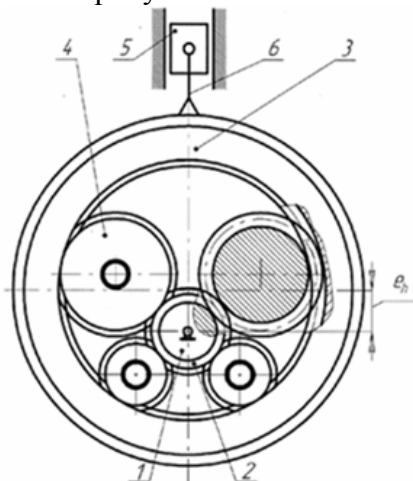


Рис. 4. Зубчатый эксцентриковый подшипник (ЗЭП)

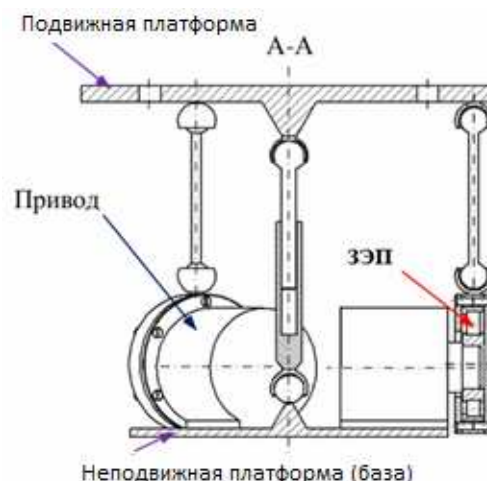


Рис. 5. Устройство типа гексапод на базе ЗЭП

Основными элементом привода на основе ЗЭП является внешнее зубчатое кольцо, жестко связанное с корпусом привода или неподвижной частью гексапода. Ведущий вал ЗЭП вращается от двигателя. Выходной элемент 5 совершает возвратно-поступательное движение.

Ключевые преимущества перед винтовыми передачами.

Сниженная сложность и меньшее количество деталей. Конструкция ЗЭП существенно проще по сравнению с ШВП/РВП. Отсутствуют длинный точный винт, гайка сложной конструкции, система рециркуляции шариков/роликов. Значительно уменьшено количество прецизионных сопряжений. Повышенная жесткость и компактность. Компактная «блочная» конструкция с короткой силовой цепью обеспечивает высокую радиальную и крутильную жесткость привода, что критично для точности позиционирования платформы гексапода. Упрощение производства и снижение стоимости. Требования к точности изготовления отдельных компонентов ЗЭП (особенно по сравнению с винтом и гайкой ШВП) являются не высокими. Отсутствие необходимости в длинных прецизионных хонингованных или шлифованных валах снижает производственные затраты. Конструкция ЗЭП более терпима к несоосностям и перекосам, возникающим при работе гексапода, по сравнению с чувствительными к этому ШВП. Меньшая масса подвижных частей (по сравнению с вращающимся винтом в ШВП) и высокая жесткость позволяют достигать высоких ускорений. Модульная конструкция ЗЭП упрощает монтаж, регулировку и замену компонентов.

Заключение

Проведенный анализ показал, что выбор кинематической схемы гексапода (6x6, 6x3, 3x3) определяет ключевые эксплуатационные характеристики системы. Компоновка 6x6 обеспечивает высокую угловую подвижность и экономичность, 6x3 и 3x6 предлагают лучший баланс простоты моделирования и динамики, а 3x3 выделяется минимальной массой и максимальной простотой управления, но требует дорогих специализированных компонентов. Оптимальный выбор зависит от конкретных требований к точности, скорости, нагрузке и стоимости.

Для преодоления ограничений традиционных электромеханических приводов (сложность, высокая стоимость изготовления ШВП/РВП) предложено использование зубчатого эксцентрикового подшипника (ЗЭП). Его более простая конструкция, повышенная жесткость и устойчивость к перекосам потенциально способны снизить затраты на производство и эксплуатацию, повысить надежность и сделать высокоточные гексаподные системы более доступными. Дальнейшие исследования должны быть направлены на экспериментальную валидацию характеристик привода на основе ЗЭП и разработку адаптированных алгоритмов управления.

Список литературы

1. Мамаев Ю.А. Динамика движения робота-станка с параллельной кинематикой (гексапода) для окончательной обработки деталей сложной геометрии: Дисс. ... канд. техн. наук. – Белгород, 2014. – 140 с.
2. Рыбак Л.А., Гапоненко Е.В., Мамаев Ю.А. Новые технологии высокоскоростной механической обработки на станках с параллельной кинематикой // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6. – С. 21.
3. Щелкунов Е.Б., Виноградов С.В., Щелкунова М.Е., Самар Е.В. Механизмы параллельной структуры в металлорежущих станках // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2012. – Т. 1, № 12. – С. 52-61.
4. Huayang Li, Chenkun Qi, Feng Gao, Xianbao Chen, Yue Zhao, Zhijun Chen. Mechanism design and workspace analysis of a hexapod robot // Mechanism and Machine Theory. 2022, vol. 174, p. 104917. doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2022.104917.
5. Jiawang Ma, Guanlin Qiu, Weichen Guo, Peitong Li, Gan Ma. Design, Analysis and Experiments of Hexapod Robot with Six-Link Legs for High Dynamic Locomotion // Micromachines. 2022, vol. 13(9), p. 1404. doi.org/10.3390/mi13091404.
6. Ke Yin, Yue Gao, Feng Gao, Xianbao Chen, Yue Zhao, Xiao Yuguang, Qiao Sun, Jing Sun. Mechanism Design and Motion Planning of a Hexapod Curling Robot Exhibited during the Beijing 2022 Winter Olympics // Engineering. 2024, vol. 35, pp. 15-31. doi.org/10.1016/j.eng.2023.10.018.
7. Akira Fukuhara, Wataru Suda, Takeshi Kano, Ryo Kobayashi, Akio Ishiguro. Adaptive Interlimb Coordination Mechanism for Hexapod Locomotion Based on Active Load Sensing // Front Neurorobot. 2022, vol. 16, p. 645683. DOI: 10.3389/fnbot.2022.645683.
8. Афонин В.Л. Механизмы параллельной структуры. Кинематика и динамика. – М.: ИЦ МГТУ Станкин, 2005. – 180 с.
9. Смирнов В.А., Петрова Л.Н. Динамическая модель механизма с параллельной кинематикой // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2009. – № 11(144). – С. 50-56.
10. Патент №2331000 РФ. Бессепараторный роликовый подшипник качения / Г.Ю. Волков, Д.А. Курасов. – Заявка №2006145161 от 18.12.2006; опубл. 10.08.2008, Бюл. № 12.

References

1. Mamaev Yu.A. Motion dynamics of a parallel kinematics robot machine (hexapod) for the final processing of complex geometry parts: Diss. ... cand. of tech. sc. – Belgorod, 2014. – 140 p.
2. Rybak L.A., Gaponenko E.V., Mamaev Yu.A. New technologies of high-speed mechanical processing on machines with parallel kinematics // Modern problems of science and education. 2012, no. 6, p. 21.
3. Shchelkunov E.B., Vinogradov S.V., Shchelkunova M.E., Samar E.V. Mechanisms of parallel structure in metal-cutting machines // Scientific notes of the Komsomolsky-on-Amur State Technical University. 2012, vol. 1, no. 12, pp. 52-61.
4. Huayang Li, Chenkun Qi, Feng Gao, Xianbao Chen, Yue Zhao, Zhijun Chen. Mechanism design and workspace analysis of a hexapod robot // Mechanism and Machine Theory. 2022, vol. 174, p. 104917. doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2022.104917.
5. Jiawang Ma, Guanlin Qiu, Weichen Guo, Peitong Li, Gan Ma. Design, Analysis and Experiments of Hexapod Robot with Six-Link Legs for High Dynamic Locomotion // Micromachines. 2022, vol. 13(9), p. 1404. doi.org/10.3390/mi13091404.
6. Ke Yin, Yue Gao, Feng Gao, Xianbao Chen, Yue Zhao, Xiao Yuguang, Qiao Sun, Jing Sun. Mechanism Design and Motion Planning of a Hexapod Curling Robot Exhibited during the Beijing 2022 Winter Olympics // Engineering. 2024, vol. 35, pp. 15-31. doi.org/10.1016/j.eng.2023.10.018.
7. Akira Fukuhara, Wataru Suda, Takeshi Kano, Ryo Kobayashi, Akio Ishiguro. Adaptive Interlimb Coordination Mechanism for Hexapod Locomotion Based on Active Load Sensing // Front Neurorobot. 2022, vol. 16, p. 645683. DOI: 10.3389/fnbot.2022.645683.
8. Afonin V.L. Parallel structure mechanisms. Kinematics and dynamics. – M.: PC MSTU Stankin, 2005. – 180 p.
9. Smirnov V.A., Petrova L.N. Dynamic model of a mechanism with parallel kinematics // Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical Engineering. 2009, no. 11(144), pp. 50-56.
10. Patent No. 2331000 RU. Separator-free roller rolling bearing / G.Yu. Volkov, D.A. Kurasov. – Appl. No. 2006145161 from 18.12.2006; publ. 10.08.2008, Bul. No. 12.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Курасов Дмитрий Алексеевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Прикладная механика»	Kurasov Dmitry Alekseevich – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of applied mechanics
Зубков Михаил Константинович – аспирант	Zubkov Mikhail Konstantinovich – postgraduate student
shketgcc@gmail.com	

Получена 27.08.2025