



МРНТИ 55.30.03

Научная статья

DOI: <https://doi.org/10.32523/2616-7263-2024-148-3-141-153>

Экспериментальные исследования подвешенного точечного тросового параллельного робота

А.А. Джомартов*¹

Институт механики и машиноведения им. У.А. Джолдасбекова, Алматы, Казахстан

(E-mail: *legsert@mail.ru)

Аннотация. Спроектирован и изготовлен прототип подвешенного точечного тросового параллельного робота с интерфейсом управления и с тремя поступательными степенями свободы. Прототип точечного тросового параллельного робота состоит из металлической рамы в форме прямоугольного параллелепипеда, возле основания каждой вертикальной стойки размещены лебедки с серводвигателями, предназначенные для намотки (или смотки) тросов. Другие концы тросов, проходящие через шкивы, соединяются с рабочим органом. Направление вращения, а также скорость вращения лебедок с серводвигателями задаются блоком управления, обладают тремя поступательными степенями свободы. Для определения натяжений в тросах подвешенного точечного тросового параллельного робота использовались четыре датчика сил. Датчики сил подключаются к тензометрической измерительной системе ZET 058, которая вместе с программным обеспечением ZETLAB TENZO позволяет собирать информацию в режиме реального времени по четырем каналам одновременно. Проведены экспериментальные исследования прототипа подвешенного точечного тросового параллельного робота путем вычерчивания траектории окружности рабочим органом. Установлено, что отклонение траектории от идеальной окружности происходит в результате колебаний натяжения в тросах. Получены экспериментальные графики натяжений натяжения в тросах при помощи датчиков сил, подключенных к измерительной тензометрической системе ZET 058. Установлено, что для повышения точности работы подвешенного точечного тросового параллельного робота необходим постоянный контроль натяжения его тросов.

Ключевые слова: тросовый параллельный робот, рабочий орган, прототип, датчик силы, натяжение, измерительная тензометрическая система.

Поступила 10.05.2024. Доработана 12.07.2024. Одобрена 12.09.2024. Доступна онлайн 30.09.2024

¹*автор для корреспонденции

Введение

Сегодня в мире широко используется один из видов параллельного робота - тросовый параллельный робот. Для расширения зоны обслуживания обычных параллельных роботов (рисунок 1а) их жесткие звенья заменяют гибкими звеньями (тросами) и в результате получают тросовые параллельные роботы (ТПР) (рисунок 1б). ТПР по сравнению с параллельными роботами с жесткой связью имеют меньшие инерционные характеристики, высокую скорость и ускорение рабочего органа [1]. ТПР широко применяются для решения практических сложных задач вследствие большой рабочей зоны обслуживания [1]. В тросовых параллельных роботах гибкие звенья могут работать только на растяжение и теряют свою работоспособность при сжатии. Данная особенность сильно ограничивает разработку и применение тросовых параллельных роботов и требует ее учета при разработке новых ТПР.

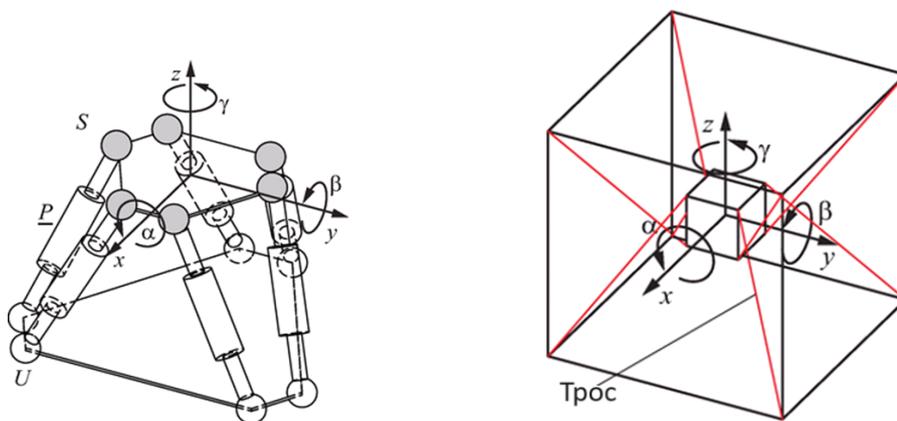


Рисунок 1. Роботы параллельной структуры: а) параллельный робот Стюарта; б) тросовый параллельный робот

ТПР подразделяются на два вида – подвесные и не подвесные, в зависимости от расположения тросов. Если в ТПР все приводные тросы находятся над рабочим органом (РО), а сила тяжести действует как виртуальный трос для поддержания равновесия, то такой ТПР называется подвесным [1-4]. В случае, если в ТПР хотя бы один приводной трос находится ниже рабочего органа РО, то такой ТПР называется не подвесным [5-8].

Особый интерес представляют подвесные точечные ТПР [9]. Подвесные точечные ТПР представляют собой особую группу подвесных ТПР, в которых все тросы прикреплены к одной точке на РО и могут изменять длину для контроля положения РО. Здесь РО моделируется как сосредоточенная масса, расположенная в точке пересечения тросов. Подвесные точечные ТПР хорошо подходят для выполнения операций, аналогичных операциям строительных кранов при подъеме и перемещении грузов. Однако робот с тросовым приводом имеет значительно меньшее колебание полезной нагрузки, чем кран, при выполнении той же операции из-за своей параллельной конструкции.

Подвесной точечный ТПР с 3 степенями свободы и четырьмя приводными тросами показан на рисунке 2 [9]. Конфигурация подвешенного точечного ТПР требует учитывать гравитацию для поддержания равновесия. РО рассматривается как точечная масса, поскольку его размер можно считать незначительным по сравнению с размерами рабочей зоной.

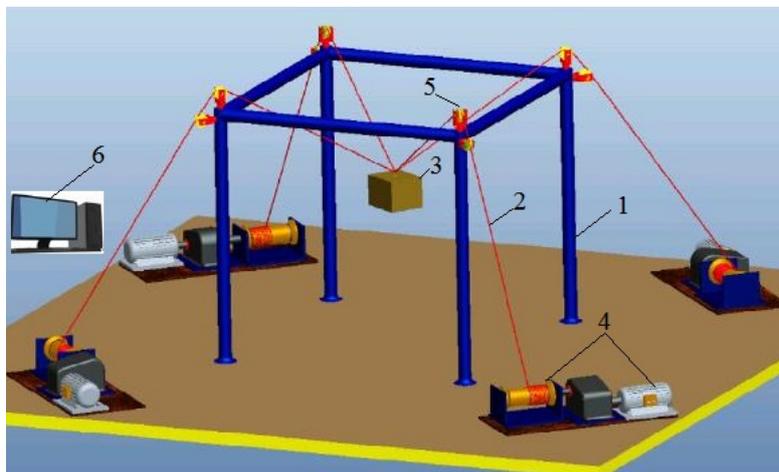


Рисунок 2. Подвесной точечный ТПР

Все приводные тросы подвешенного ТПР находятся над ЕЕ (рисунок 2). Как видно из рисунка 2, подвесной точечный ТПР состоит из металлической рамы в форме прямоугольного параллелепипеда 1, возле основания каждой вертикальной стойки размещены лебедки с серводвигателями 4, предназначенные для намотки (или смотки) тросов 2. Другие концы тросов 2, проходящие через шкивы 5, соединяются с РО 3. Направление вращения, а также скорость вращения лебедок с серводвигателями 4 задается блоком управления 6. Таким образом, меняя длины тросов 2 путем их намотки (смотки) на барабаны 4 изменяется положение РО 3 в пространстве рабочей зоны ТПР, которая ограничена рамой 1. В конструкции подвешенного точечного ТПР, показанной на рисунке 4, РО обладает тремя поступательными степенями свободы.

Примерами подвешенных точечных ТПР являются известные роботы ТПР ТПР ROBOCRANE [2], CableV [10], ТПР CoGiRo [11], ТПР FAST, [12]. Расположение тросов подвешенного ТПР исключает взаимодействия тросов друг с другом и окружающими предметами. В связи с тем, что тросы находятся над РО, нагрузка распределяется между тросами [13,14]. Это повышает грузоподъемность подвешенного точечного ТПР и увеличивает рабочую зону. Подвесной точечный ТПР достаточно просто собрать и разобрать, он имеет высокую мобильность, модульность и реконфигурируемость. Недостатком подвешенного точечного ТПР является низкая жесткость в вертикальном направлении, что может привести к колебания РО вследствие воздействия внешних сил. В этой статье проводятся экспериментальные исследования подвешенного точечного ТПР.

Методология

Для сборки прототипа подвешенного точечного ТПР была разработана конфигурация его системы, которая показана на рисунке 3. Приводятся следующие исходные данные: размеры рамы $a = 1485$ мм, $b = 1230$ мм и $h = 1565$ мм. Масса РО $m = 1,0$ кг. Тросы марки Dунеема, LIROS D-Pro 01505-0200, диаметр 2 мм, площадь поперечного сечения $A = 3,14$ мм², масса на единицу длины $\rho = 0,18 \cdot 10^{-2}$ кг/м, радиус шкива лебедочных барабанов $R = 40$ мм.

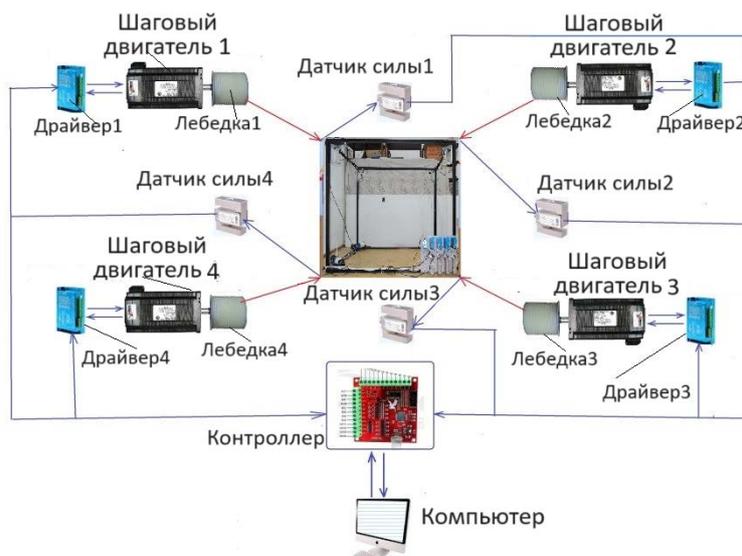


Рисунок 3. Конфигурация системы прототипа подвешенного точечного ТПР

Тросовый привод точечного ТПР (рисунок 3) состоит из четырех лебедок с барабанами, установленных на валу с двумя подшипниками на обоих концах. Лебедки соединены с четырьмя гибридными шаговыми двигателями Nema34 - 86HB250-156 с драйверами HBS86H. Драйверы HBS86H подключены к контроллеру гибридного шагового двигателя Mach 3. Контроллер поддерживает 4-осевое управление, алгоритм интерполяции с минимальной погрешностью, высокую точность обработки. Используя контроллер Mach 3, CDPР управляется компьютером через USB-порт. Натяжения в тросах точечного ТПР определяются с помощью четырех датчиков сил. По разработанной конфигурации системы прототипа подвешенного точечного ТПР (рисунок 3) был изготовлен ее прототип (рисунок 4).



Рисунок 4 – Прототип подвешенного точечного ТПР

На рисунке 5 показан интерфейс программы для управления подвешенным точечным ТПР.

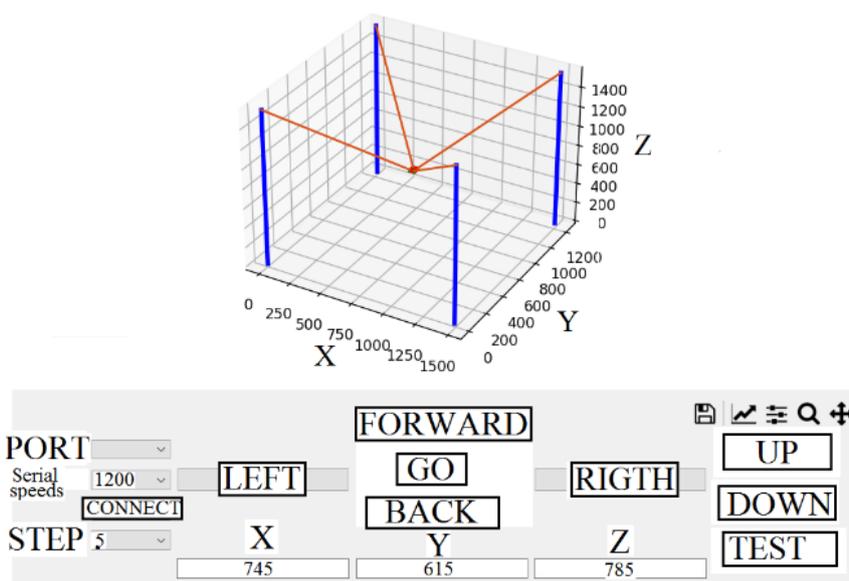


Рисунок 5. Интерфейс программы для управления подвешенным точечным ТПР

В соответствии с интерфейсом управления подвешенного точечного ТПР можно вручную управлять движением РО ТПР. Здесь можно выполнять движения РО ТПР: вперед-назад,

влево-вправо, вверх-вниз. Кроме того, можно воспроизвести траектории движений РО ТПР, заданные уравнениями кривой, например, окружность, эллипс и т.д.

Для определения натяжений в тросах подвешенного точечного ТПР, четыре датчика сил подключены к тензометрической измерительной системе ZET 058 [15], показанной на рисунке 6, которая вместе с программным обеспечением ZETLAB TENZO позволяет собирать информацию с датчиков сил в режиме реального времени по четырем каналам одновременно.

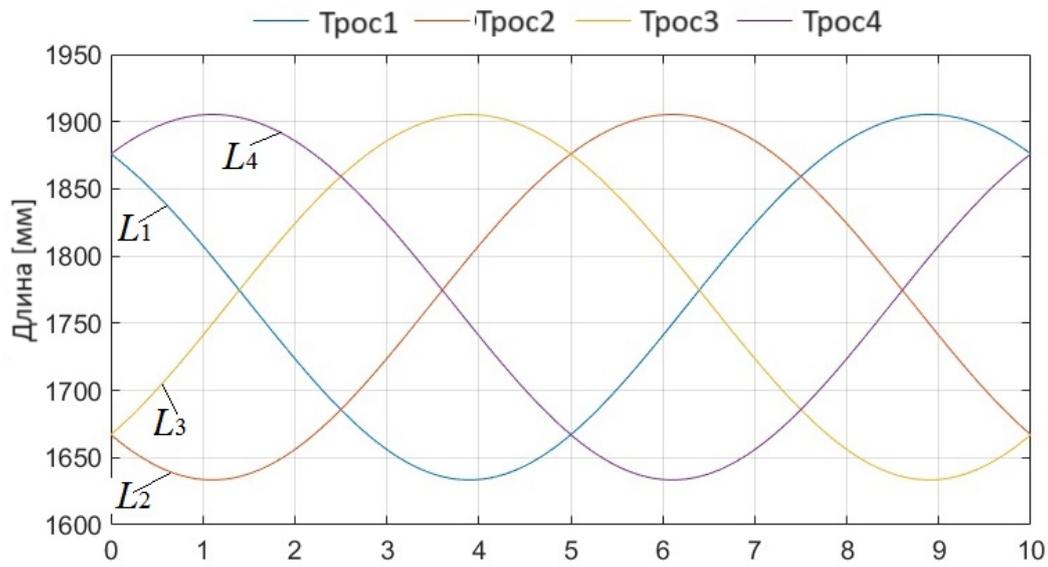


Рисунок 6. Тензометрическая измерительная система ZET 058

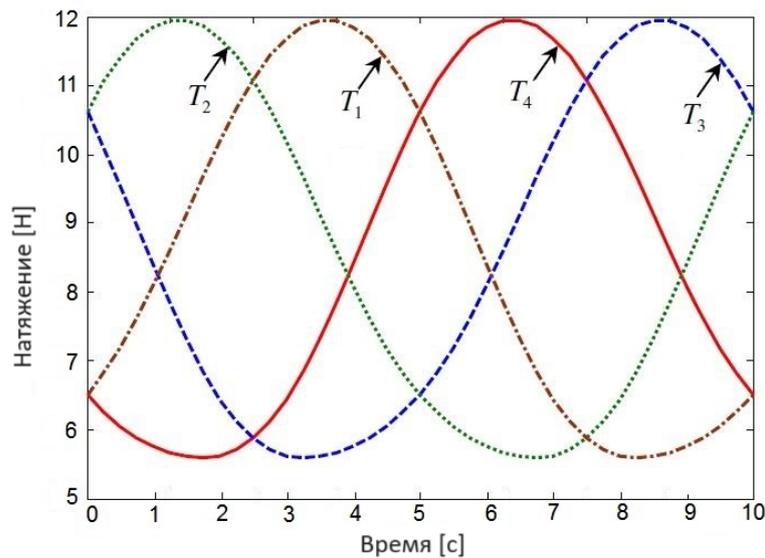
Проведены испытания прототипа подвешенного точечного ТПР, при движении РО по окружности с радиусом $r = 250$ мм, уравнение которой имеет вид'

$$\begin{cases} x = 250 \cos 0.2\pi t, \\ y = 250 \sin 0.2\pi t, \\ z = 90 \\ 0 \leq t \leq 10. \end{cases} \quad (1)$$

На рисунке 7 а,б показаны теоретические графики изменения длин тросов и их натяжений, при движении РО массой 1 кг по траектории, описанной уравнением (1).



а)



б)

Рисунок 7. Графики: а) изменения длины тросов, б) натяжения в тросах

Для проверки воспроизведения траектории круга к РО был прикреплены различные цветные маркеры. Всего было проведено три испытания. На рисунке 8 три цвета (красная, зеленая и черная пунктирные линии) показывают траектории круга, нарисованного РО, а идеальный круг показан синим.



Рисунок 8. Траектории РО – красная, зеленая и черная; идеальная траектория показана синим цветом

Определим максимальные отклонения радиусов окружностей от радиуса идеальной окружности по формуле:

$$\Delta r_i^{max} = |r - r_i^{max}|$$

Из рисунка 8 было определено, что

$$\Delta r_1^{max} = 27 \text{ mm}, \Delta r_2^{max} = 21 \text{ mm}, \Delta r_3^{max} = 17 \text{ mm},$$

Для оценки работы РО прототипа подвесного точечного ТПР определяем степень повторяемости траекторий. Определяем среднее значение максимальных отклонений радиусов окружностей от радиуса идеальной окружности по формуле:

$$\Delta r_{av}^{max} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \Delta r_i^{max} = 21,67 \text{ mm},$$

Среднее значение максимальных отклонений радиусов окружностей от радиуса идеальной окружности составляет 8,7% от длины радиуса идеальной окружности, что указывает на недостаточную точность воспроизведения круговой траектории РО.

Были проведены экспериментальные исследования по определению натяжений в тросах с помощью датчиков сил, подключенных к измерительной тензометрической системе ZET 058. Экспериментальные графики натяжений тросов прототипа подвесного точечного ТПР показаны на рисунке 9.

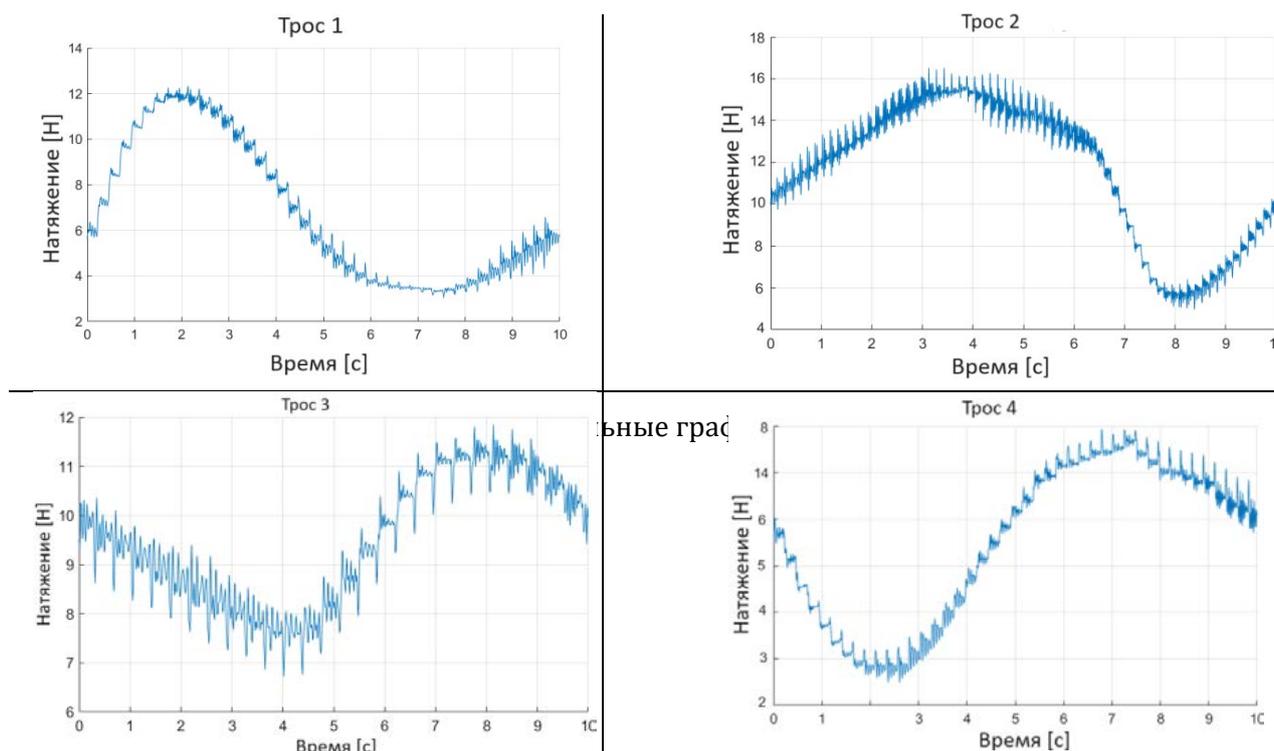


Рисунок 10. Графики натяжения тросов, полученные из четырех каналов

Экспериментальные графики натяжения тросов выводятся на экран компьютера по четырем каналам тензометрической измерительной системы ZET 058 (рисунок 10) в режиме реального времени. Эта информация очень полезна при проведении эксперимента для оценки натяжений тросов в режиме реального времени.

Результаты и Обсуждение

В результате экспериментального исследования прототипа подвешенного точечного ТПР получена оценка работы РО как степень повторяемости траекторий. Определено среднее значение максимальных отклонений радиусов окружностей от радиуса идеальной окружности. Среднее значение максимальных отклонений радиусов окружностей от радиуса идеальной окружности составляет 8,7% от длины радиуса идеальной окружности, что указывает на недостаточную точность воспроизведения круговой траектории РО. Определены натяжения тросов прототипа подвешенного точечного ТПР. Из анализа графиков натяжения тросов прототипа подвешенного точечного ТПР при круговой траектории движения его РО установлены колебания натяжений тросов (рисунок 9) от теоретических натяжений (рисунок 7), что влияет на точность работы ТПР. Для устранения колебаний натяжений тросов необходимо внести изменения в систему управления прототипа подвешенного точечного ТПР с целью постоянного контроля натяжений тросов.

Заключение

В данной статье были проведены экспериментальные исследования подвешенного точечного ТПР. Спроектирован и изготовлен прототип подвешенного точечного ТПР с интерфейсом управления. Для определения натяжений в тросах подвешенного точечного ТПР применялись четыре датчика сил, подключенных к тензометрической измерительной системе ZET 058. Тензометрическая измерительная система ZET 058 на основе программного обеспечения ZETLAB TENZO позволяет собирать информацию с датчиков сил в режиме реального времени по четырем каналам одновременно. Проведены экспериментальные исследования прототипа подвешенного точечного ТПР. Проверка работы прототипа подвешенного точечного ТПР проводилась путем вычерчивания траектории окружности рабочим органом при фиксированной высоте в плоскости x-y. При этом было установлено, что отклонение траектории от идеальной окружности происходит в результате колебаний натяжения в тросах. Получены экспериментальные графики натяжений в тросах. Анализ графиков натяжения тросов прототипа подвешенного точечного ТПР показал наличие колебаний натяжений тросов, которое влияет на точность работы ТПР. Для устранения колебаний натяжений тросов необходимо проводить контроль натяжений тросов за счет системы управления прототипа подвешенного точечного ТПР.

Благодарность

Работа выполнена в рамках гранта на проведение фундаментальных исследований ИММаш им. У.А.Джолдасбекова BR20280990.

Список литературы

1. Pott A. Cable-Driven Parallel Robots. Theory and Application. - Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 2018. - 465 p.
2. James A., Roger B., Nicholas D. The NIST robocrane // Journal of Robotic Systems. -1993. - № 10. - P. 1709-724.
3. Tanaka M., Seguchi Y., Shimada S. Kineto-statics of skycam-type wire transport system // Proceedings of USA-Japan Symposium on Flexible Automation, Crossing Bridges: Advances in Flexible Automation and Robotics. – 1988. - P. 689–694.
4. Kirchgessner N. et al. The ETH field phenotyping platform FIP: a cable-suspended multisensory system // Funct. Plant Biol. - 2017. - № 1(44). - P. 154–168, DOI: <https://doi.org/10.1071/FP16165>
5. Radojicic J., Surdilovic D., Krüger J. Application challenges of large-scale wire robots in agricultural plants // IFAC Proceedings Volumes. - 2013. - № 4(46). - P. 77-82.
6. Pinto A.M., Moreira E., Lima J., et al. A cable-driven robot for architectural constructions: a visual-guided approach for motion control and path planning. Autonomous Robots. – 2017. №41(7). P. 1487-1499, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10514-016-9609-6>
7. Oh S.R., Agrawal S.K. Cable suspended planar robots with redundant cables: controllers with positive tensions // IEEE Transactions on Robotics. – 2005. - № 3. - P. 457-465, DOI: <https://doi.org/10.1109/TRO.2004.838029>

8. Zi B., Qian S. Design, analysis and control of cable-suspended parallel robots and its applications. - Singapore: Springer Singapore, 2017.
9. Boschetti G., Minto R., Trevisani A. Improving a Cable Robot Recovery Strategy by Actuator Dynamics // Appl. Sci. – 2020. - №10(20). – P. 7362, DOI: <https://doi.org/10.3390/app10207362>
10. Heyden T., Woernle C. A Dynamics and flatness-based control of a kinematically undetermined cable suspension manipulator // Multibody System Dynamics. – 2006. №16(2). - P. 155-177, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11044-006-9023-5>
11. Lamaury J., Gouttefarde M. A Control of a large redundantly actuated cable-suspended parallel robot. // Robotics and Automation (ICRA), IEEE International Conference. – 2013. P. 4659-4664.
12. Rendong Nan. A Five hundred meter aperture spherical radio telescope (FAST) // Science in China: Series G Physics, Mechanics & Astronomy. – 2006. - № 2 (49). 129—148, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11433-006-0129-9>
13. Zhang N., Shang W., Cong S. Geometry-based trajectory planning of a 3-3 cable-suspended parallel robot // IEEE Trans. Robot. – 2016. -№ 33. – P. 484–491, DOI: <https://doi.org/10.1109/TRO.2016.2631591>
14. Zhang, N.; Shang,W.; Cong, S. Dynamic trajectory planning for a spatial 3-DoF cable-suspended parallel robot // Mech. Mach. Theory. – 2018. -№122. - P. 177–196, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2017.12.023>
15. ZETLAB Company. Available online: www.zetlab.com (Accessed on 2 May, 2024).

А.А. Джомартов*

Ө.А.Жолдасбеков атындағы Механика және машинатану институты, Алматы, Қазақстан

*E-mail: *legsart@mail.ru*

Асылған нүктегі сымарканды параллельді роботты эксперименттік зерттеу

Аңдатпа. Басқару интерфейсі және үш трансляциялық еркіндік дәрежесі бар аспалы нүктелік сымарканды параллельді роботтың прототипі әзірленді және жасалды. Нүктелік сымарканды параллельді роботтың прототипі тікбұрышты параллелепипед пішініндегі металл жақтаудан тұрады, сервоқозғалтқыштары бар лебедкалар сымарканды орау (немесе орау) үшін арналған әрбір тік посттың негізіне жақын орналасқан; Шкивтер арқылы өтетін сымарканды басқа ұштары жұмыс органына қосылады. Айналу бағыты, сондай-ақ сервомоторлары бар лебедкалардың айналу жылдамдығы үш трансляциялық еркіндік дәрежесі бар басқару блогымен белгіленеді. Аспалы нүктелік сымарканды параллельді роботтың сымарканды кернеуді анықтау үшін төрт күш датчигі пайдаланылды. Күш датчиктері ZETLAB TENZO бағдарламалық құралымен бірге бір уақытта төрт арна арқылы нақты уақыт режимінде ақпаратты жинауға мүмкіндік беретін ZET 058 тензометрді өлшеу жүйесіне қосылған. Шеңберлік траекторияны ақырғы эффектормен сызу арқылы ілулі нүктелі сымарканды параллель роботтың прототипінің эксперименталды зерттеулері жүргізілді. Траекторияның идеалды шеңберден ауытқуы сымарканды кернеудің ауытқуы нәтижесінде болатыны анықталды. ZET 058 тензомерді өлшеу жүйесіне қосылған күш датчиктерінің көмегімен сымарканды кернеудің тәжірибелік графиктері алынды, ілулі нүктелік

сымарканды параллельді роботының жұмысының дәлдігін арттыру үшін кернеудің тұрақты бақылауы анықталды. оның сымарканды қажет.

Түйін сөздер: сымарканды параллельді робот, жұмыс элементі, прототип, күш датчигі, кернеу, тензометрді өлшеу жүйесі.

A.A. Jomartov*

Joldasbekov, Institute of Mechanics and Engineering, Almaty, Kazakhstan

E-mail: legsert@mail.ru

Experimental studies of a suspended point cable parallel robot

Abstract. A prototype of a suspended point cable parallel robot with a control interface and three translational degrees of freedom was designed and manufactured. The prototype of a point cable parallel robot consists of a metal frame in the shape of a rectangular parallelepiped; winches with servo motors are located near the base of each vertical post, designed for winding (or unwinding) cables. The other ends of the cables passing through the pulleys are connected to the working body. The direction of rotation, as well as the rotation speed of winches with servomotors, are set by a control unit that has three translational degrees of freedom. Four force sensors were used to determine the tension in the cables of the suspended point cable parallel robot. The force sensors are connected to the ZET 058 strain gauge measuring system, which, together with the ZETLAB TENZO software, allows you to collect information in real time through four channels simultaneously. Experimental studies of a prototype of a suspended point-cable parallel robot were carried out by drawing a circle trajectory with an end-effector. It has been established that the deviation of the trajectory from an ideal circle occurs as a result of tension fluctuations in the cables. Experimental graphs of the tension in the cables were obtained using force sensors connected to the ZET 058 strain gauge measuring system. It was established that in order to increase the accuracy of the operation of the suspended point cable parallel robot, constant monitoring of the tension of its cables is necessary.

Keywords: cable parallel robot, end-effector, prototype, force sensor, tension, strain gauge measuring system.

References

1. Pott A. Cable-Driven Parallel Robots. Theory and Application. - Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 2018. - 465 p.
2. James A., Roger B., Nicholas D. The NIST robocrane // Journal of Robotic Systems. -1993. - № 10. - P. 1709-724.
3. Tanaka M., Seguchi Y., Shimada S. Kineto-statics of skycam-type wire transport system // Proceedings of USA-Japan Symposium on Flexible Automation, Crossing Bridges: Advances in Flexible Automation and Robotics. - 1988. - P. 689-694.
4. Kirchgessner N. et al. The ETH field phenotyping platform FIP: a cable-suspended multisensory system // Funct. Plant Biol. - 2017. - № 1(44). - P. 154-168, DOI: <https://doi.org/10.1071/FP16165>

5. Radojicic J., Surdilovic D., Krüger J. Application challenges of large-scale wire robots in agricultural plants // IFAC Proceedings Volumes. - 2013. - № 4(46). - P. 77-82.
6. Pinto A.M., Moreira E., Lima J., et al. A cable-driven robot for architectural constructions: a visual-guided approach for motion control and path planning. Autonomous Robots. – 2017. №41(7). P. 1487-1499, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10514-016-9609-6>
7. Oh S.R., Agrawal S.K. Cable suspended planar robots with redundant cables: controllers with positive tensions // IEEE Transactions on Robotics. – 2005. - № 3. - P. 457-465, DOI: <https://doi.org/10.1109/TRO.2004.838029>
8. Zi B., Qian S. Design, analysis and control of cable-suspended parallel robots and its applications. - Singapore: Springer Singapore, 2017.
9. Boschetti G., Minto R., Trevisani A. Improving a Cable Robot Recovery Strategy by Actuator Dynamics // Appl. Sci. – 2020. - №10(20). – P. 7362, DOI: <https://doi.org/10.3390/app10207362>
10. Heyden T., Woernle C. A Dynamics and flatness-based control of a kinematically undetermined cable suspension manipulator // Multibody System Dynamics. – 2006. №16(2). - P. 155-177, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11044-006-9023-5>
11. Lamaury J., Gouttefarde M. A Control of a large redundantly actuated cable-suspended parallel robot. // Robotics and Automation (ICRA), IEEE International Conference. – 2013. P. 4659-4664.
12. Rendong Nan. A Five hundred meter aperture spherical radio telescope (FAST) // Science in China: Series G Physics, Mechanics & Astronomy. – 2006. - № 2 (49). 129—148, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11433-006-0129-9>
13. Zhang N., Shang W., Cong S. Geometry-based trajectory planning of a 3-3 cable-suspended parallel robot // IEEE Trans. Robot. – 2016. -№ 33. – P. 484–491, DOI: <https://doi.org/10.1109/TRO.2016.2631591>
14. Zhang, N.; Shang,W.; Cong, S. Dynamic trajectory planning for a spatial 3-DoF cable-suspended parallel robot // Mech. Mach. Theory. – 2018. -№122. - P. 177–196, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2017.12.023>
15. ZETLAB Company. Available online: www.zetlab.com (Accessed on 2 May, 2024).

Сведения об авторе:

Джомартов Асылбек Абдразакович – автор для корреспонденции, член-корр. НИА РК, доктор технических наук, руководитель отдела ОЭРК Института механики и машиноведения им. У.А. Джолдасбекова, ул. Курмангазы, 29, 050010, г. Алматы. Казахстан.



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).