

А.А. Джомартов*, А.Н. Камал, А. Абдураимов

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

*e-mail: legsert@mail.ru

ОБЗОР ПО ТРОСОВЫМ ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ РОБОТАМ

Аннотация. В отличие от параллельных роботов с жесткой связью, тросовые параллельные роботы (ТПР) приводятся в движение гибкими тросами, а не жесткими звеньями для контроля положения и ориентации рабочего органа. ТПР обладают преимуществами параллельных роботов по сравнению с обычными роботами, включая более высокое соотношение нагрузки и веса. ТПР имеют меньшие инерционные характеристики и более высокое отношение полезной нагрузки к весу, что обеспечивает высокую скорость и ускорение рабочего органа. Благодаря гибкости тросов, ТПР могут применяться для решения сложных задач с большой рабочей зоной обслуживания. В данной статье представлен обзор некоторых видов тросовых параллельных роботов разработанных в мире. Показан обзор работ по проектированию ТПР, структуры, кинематики и динамики, управления и планирования траектории. Проведенный обзор тросовых параллельных роботов будет полезен для студентов и докторантов, работающих в области исследований принципиально новых роботов.

Ключевые слова: тросовые параллельные роботы, проектирование, управление, планирование, кинематика, динамика.

Введение. За последние несколько лет в мире наметилась тенденция использования оборудования с механизмами параллельной структуры с повышенными технико-эксплуатационными показателями. Механизмы параллельной структуры имеют рабочее звено, которое имеет связь с основанием посредством нескольких кинематических цепей, которые имеют несколько приводов или просто налагает связи на его движение. Механизмы параллельной структуры в отличие от обычных механизмов, содержат замкнутые кинематические цепи и работают как пространственные фермы, и соответственно это повышает точность, быстрдействие и грузоподъемность.

Типичным представителем механизма параллельной структуры с жесткими звеньями является параллельный робот Стюарта (рис. 1а) с 6 степенями подвижности.

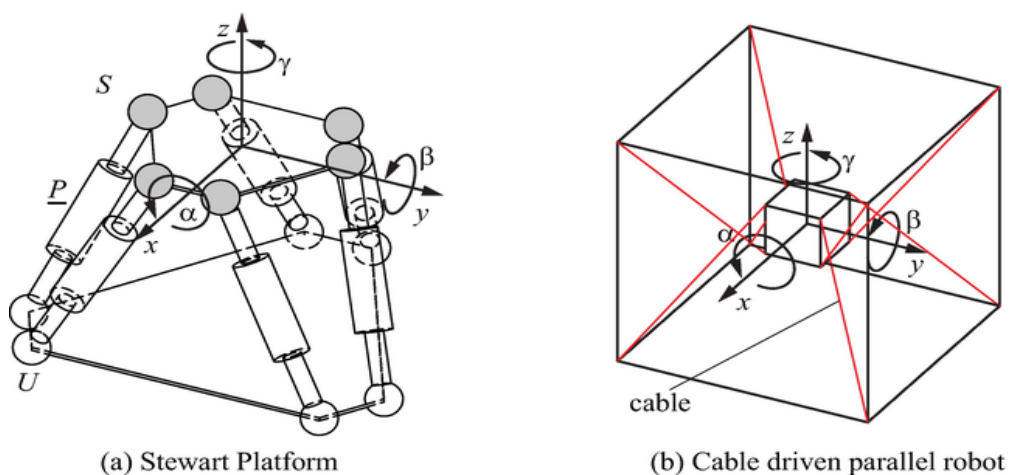


Рисунок 1. Механизмы параллельной структуры:
а) параллельный робот Стюарта; б) тросовый параллельный робот

В настоящее время, для расширения зоны обслуживания параллельных роботов их жесткие звенья заменяют гибкими (тросами) и в результате получают тросовые параллельные роботы (рис. 1б). Роботы параллельной структуры с гибкими звеньями принято называть

тросовыми параллельными роботами (ТПР). По сравнению с параллельными роботами с жесткой связью, ТПР имеют меньшие инерционные характеристики и более высокое отношение полезной нагрузки к весу, что обеспечивает высокую скорость и ускорение рабочего органа [1–4]. Благодаря гибкости тросов, ТПР могут применяться для решения сложных задач с большой рабочей зоной обслуживания. [5–8]. Однако применение тросовых параллельных роботов в действующих производственных цехах и закрытых складских помещениях ограничено, что вызвано резким ростом сил натяжения звеньев с увеличением высоты подъема груза. Особенностью тросовых параллельных роботов является то, что их 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 дальнейшего развития разработки новых структурных схем.

Виды тросовых параллельных роботов разработанных в мире.

В 1989 году в США Национальным институтом стандартов и технологий (NIST) был разработан RoboCrane, который отличается простотой и удобством обработки грузов в портах, строительстве мостов и других областях, (рис. 2) [9, 10].

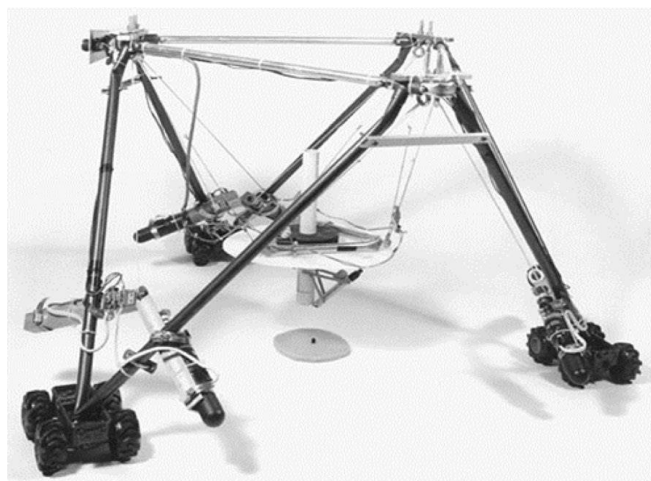


Рисунок 2. Тросовый параллельный манипулятор RoboCrane (NIST)

Компания August Design в 1980 году разработала тросовый параллельный робот SkyCam (рис. 3) [11], для проведения видеосъемок, с четырьмя тросами, с максимальной рабочей скоростью движения камеры 44,8 км/ч. ТПР SkyCam широко используется для прямого вещания со стадионов и других общественных мест.



Рисунок 3. Тросовый параллельный робот SkyCam

В работе [12] разработан ТПР под названием SPIDERobot с четырьмя степенями свободы для автоматизированного строительства, (рис. 4). Вращающийся захват может подбирать строительный материал согласно алгоритму сборки, который приводится в движение четырьмя тросами.



Рисунок 4. ТПР SPIDERobot для автоматизированного строительства

Для имитации сейсмических волн, в работе [13] был создан симулятор землетрясения на основе ТПР (рис. 5).

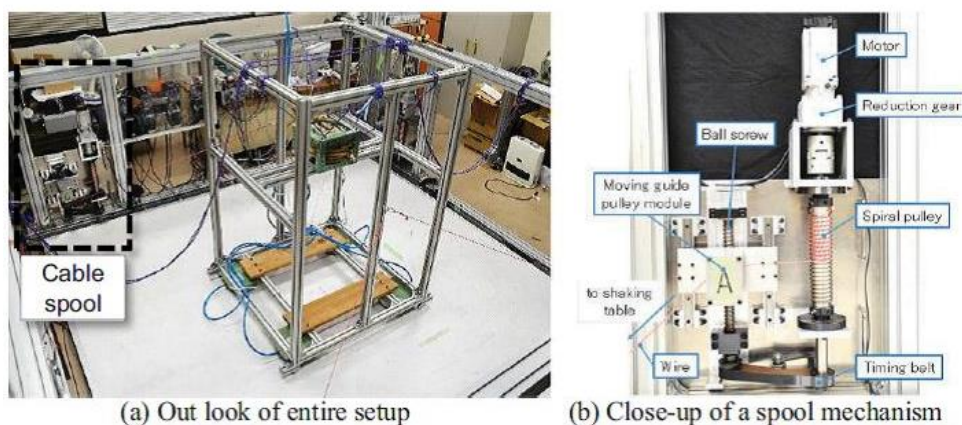


Рисунок 5. Симулятор землетрясения на основе ТПР

В работе [14] разработан ТПР для контроля внешнего состояния оболочек резервуаров (рис. 6).

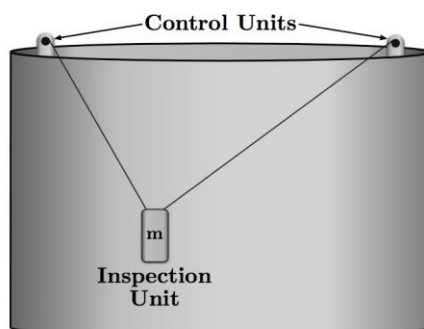


Рисунок 6. Схема ТПР для контроля внешнего состояния оболочек резервуаров

В работе [15] разработан ТПР IPAnema (рис. 7), который имеет хорошие динамические характеристики: высокую скорость и ускорение.

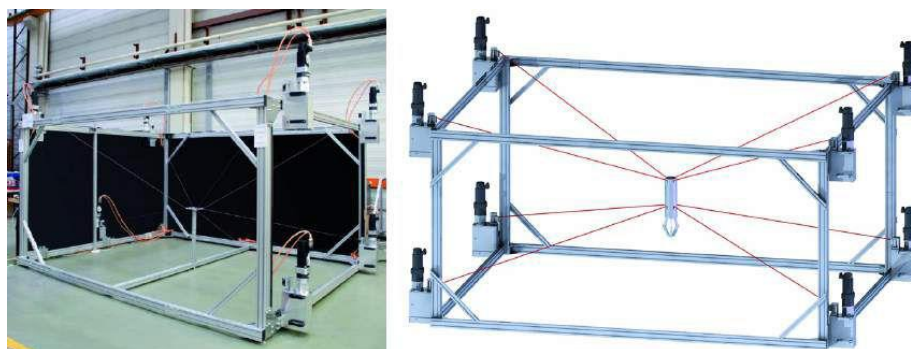


Рисунок 7. ТПР IPAnema

В работе [16] разработан ТПР FIR с восемью тросами для автоматизированного сканирования изображений для фенотипирования сельскохозяйственных культур, (рис. 8).

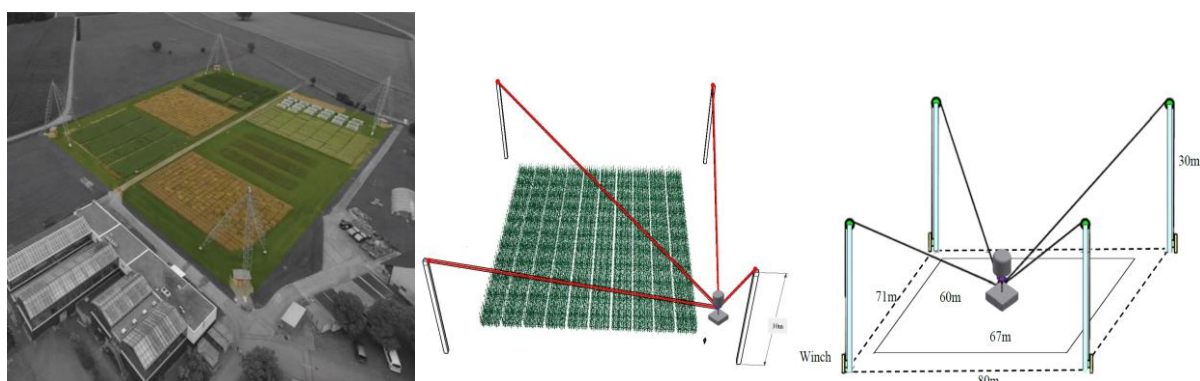


Рисунок 8. ТПР FIR для автоматизированного фенотипирования сельскохозяйственных культур

В работе [17] разработан реконфигурируемый ТПР с вышками на мобильной платформе с стабилизирующими лапами (рис. 9). Данный ТПР имеет большую зону обслуживания и легкую, мобильную конструкцию и хорошо подходит для выполнения различных задач в сельском хозяйстве.



Рисунок 9. Реконфигурируемый ТПР для сельскохозяйственных работ

Проектирование ТПР.

Структура ТПР. Типовая ТПР состоит из трех частей, включая фиксированную платформу, мобильную платформу и несколько тросов, которые используются для соединения фиксированной платформы с мобильной платформой. Длина троса может быть изменена с помощью лебедок, приводимых в действие двигателями, установленными на неподвижной платформе, как показано на рис. 10 [18, 19].

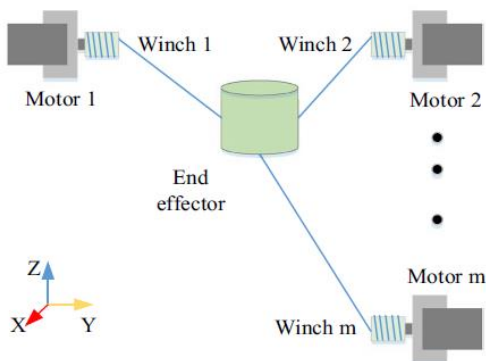


Рисунок 10. Схема ТПР с m тросами

ТПР имеет недостаточное количество связей, когда положение и ориентация рабочего органа (РО) в ТПР определяется только его силой тяжести. В случае, когда положение и ориентация РО полностью определяются длинами тросов, ТПР имеет полные или избыточные связи. ТПР с n степенями подвижности и управляемыми m тросами, могут быть классифицированы на три типа в соответствии с мобильностью и статикой [20]:

ТПР с недостаточным количеством связей $n + 1 > m$;

ТПР с полным количеством связей $n + 1 = m$;

ТПР с избыточным количеством связей $n + 1 < m$.

Для ТПР с полными и избыточными количествами связей, положение и ориентации РО зависит только от кинематики и статики, в работе [21] показаны две конструкции плоских ТПР с пружинной.

В работах [22, 23] проведен синтез плоского и пространственного ТПР с полным количеством связей, в пространстве допустимых максимальных сил и моментов. В работе [24] проведен синтез реконфигурируемого ТПР с подвижными точками тросового соединения для предотвращения столкновений тросов с препятствиями в рабочем пространстве. В работе [25] проведен синтез и анализ ТПР с гибридным приводом на основе плоского пятизвенного механизма. Синтез структуры является системным и эффективным способом проектирования ТПР. Через синтез структуры, можно получить различные типы ТПР в соответствии с желаемым количеством звеньев и степеней свободы [26-32].

Кинематика и динамика ТПР. По сравнению с решением обратной кинематической задачей типовых роботов, обратные кинематические задачи ТПР решаются значительно проще. И наоборот, решение прямой кинематической задачи ТПР является более сложной [33-37].

Для разработки динамических моделей ТПР применяются различные методы на основе: уравнения Лагранжа, уравнения Ньютона – Эйлера, уравнение Кейна, уравнение Удвации – Калабы, принципа виртуальной работы и т. д. [38–40]. Для учета влияния длины троса и изменения массы, в работе [42] рассмотрено динамическое моделирование ТПР на основе метода конечных элементов в вариабельной области. Для исследования динамики ТПР тросы обычно рассматриваются, как простые линейные элементы, что приводит к неточности моделирования. Для устранения данного недостатка, в работе [43] показана динамическая модель ТПР с учетом медленно меняющейся во времени длины тросов. В работе [44]

исследовали динамику ТПР с полными связями и с эластичными тросами с учетом продольных колебаний тросов.

Рабочее пространство ТПР значительно больше, чем у параллельных роботов с жесткими звеньями в виду большего диапазона удлинения тросов. Рабочее пространство с ограничением сил ТПР, определяется как набор положений РО, в которых натяжение троса может уравновесить произвольные внешние силы, действующие на РО. Поскольку тросы могут только тянуть, а не толкать РО, обычно трудно удовлетворить требуемые требования для выполнимого рабочего пространства ТПР. Рабочее пространство ТПР можно получить с помощью различных численных методов, представленных в работах [45–48].

Управление ТПР. Особенность ТПР с гибкими тросами вместо жестких звеньев создают неизбежные проблемы для управления ТПР по сравнению с параллельными роботами с жесткими звеньями. Трудно контролировать точное положение и ориентацию РО из-за его гибких тросов. Из-за упомянутого физического ограничения, которое выдерживает растяжение, но не сжатие, некоторые широко используемые

Традиционные методы управления параллельными роботами с жесткими звеньями не могут применяться непосредственно в ТПР, в следствии ограниченности работы тросов только на растяжение. Поэтому необходимо разработка новых методов по управлению ТПР. Работ по управлению ТПР в настоящее время немного, применяются следующие алгоритмы управления ТПР: управление скользящим режимом, гибридное управление положением / силой, адаптивное управление и т. д. [49– 52]. Большим недостатком ТПР является провисание троса во время перемещения РО. Это сложная проблема при решении планирования траектории ТПР [53–55]. Таким образом, по сравнению с обычными роботами, планирование траектории для ТПР существенно различается [56–61]. Для ТПР с полными связями тот факт, что все степени свободы РО могут контролироваться, облегчает задачу планирования траектории. Однако для ТПР с недостаточными связями контролируемое рабочее пространство не существует, что увеличивает сложность во время планирования траектории ТПР.

Выводы. Для расширения применения ТПР необходимы более глубокие исследования, такие как:

- интегрированная разработка ТПР различных конфигураций с лучшими характеристиками должна осуществляться с помощью новых методов анализа и синтеза;
- разработка и применение более совершенных контроллеров и исполнительных механизмов для более высокой производительности и точного отслеживания траектории;
- повышение жесткости и несущей способности ТПР при помощи структурного синтеза.
- применение методов создания реконфигурируемой и модульной конструкции, применяемых в параллельных роботах с жесткими звеньями, для разработки эффективных ТПР.

Благодаря преимуществам ТПР, включая таких, как малая инерционность и большая зона обслуживания, в последнее время в зарубежных институтах уделяется большое внимание разработкам и внедрениям в промышленность ТПР с новой структурой и новыми функциональными возможностями.

В то время как, в Республике Казахстан по тросовым параллельным манипуляторам не проводятся никаких исследований. Появление в стране тросовых параллельных роботов способно значительно расширить спектр научно-исследовательских услуг.

REFERENCES

- [1] A Berti, J P Merlet, M Carricato. Solving the direct geometrico-static problem of underconstrained cable-driven parallel robots by interval analysis. The International Journal of Robotics Research, 2016, 35(6): 723-739.
- [2] B Zi, B Y Duan, J L Du, et al. Dynamic modeling and active control of a cable-suspended parallel robot. Mechatronics, 2008, 18(1): 1-12.

- [3] Y Wischnitzer, N Shvalb, M Shoham. Wire-driven parallel robot: permitting collisions between wires. *The International Journal of Robotics Research*, 2008, 27(9): 1007-1026.
- [4] T Heyden, C Woernle. Dynamics and flatness-based control of a kinematically undetermined cable suspension manipulator. *Multibody System Dynamics*, 2006, 16(2): 155-177.
- [5] S R Oh, S K Agrawal. Cable suspended planar robots with redundant cables: controllers with positive tensions. *IEEE Transactions on Robotics*, 2005, 3: 457-465.
- [6] X Q Tang. An overview of the development for cable-driven parallel manipulator. *Advances in Mechanical Engineering*, 2014, 2014(1): 1-9.
- [7] B Zi, S Qian. Design, analysis and control of cable-suspended parallel robots and its applications. Singapore: Springer Singapore, 2017.
- [8] P Dion-Gauvin, C Gosselin. Trajectory planning for the static to dynamic transition of point-mass cable-suspended parallel mechanisms. *Mechanism and Machine Theory*, 2017, 113: 158-178.
- [9] R Bostelman, J Albus, N Dagalakis, et al. Applications of the NIST robocrane. *Proceedings of International Symposium on Robotics and Manufacturing Maui Hi*. 1994: 14-18.
- [10] A James, B Roger, D Nicholas. The NIST robocrane. *Journal of Robotic Systems*, 1993, 10: 709-724.
- [11] M Tanaka, Y Seguchi, S Shimada. 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: 689-694.
- [12] A M Pinto, E Moreira, J Lima, et al. A cable-driven robot for architectural constructions: a visual-guided approach for motion control and path planning. *Autonomous Robots*, 2017, 41(7): 1487-1499.
- [13] D. Matsuura, T. Ueki, Y. Sugahara, M. Yoshida and Y. Takeda. Reproduction of Long-Period Ground Motion by Cable Driven Earthquake Simulator Based on Computed Torque Method. *Mechanisms and Machine Science*, 2019, 74, 415-425.
- [14] Barry N., Fisher E., and Vaughan J. Modeling and control of a cable-suspended robot for inspection of vertical structures. *Journal of Physics: Conference Series* 744, 2016.
- [15] A. Pott et al. aIPAnema: a family of cable-driven parallel robots for industrial applications. In: *Cable-Driven Parallel Robots*. Springer, 2013, pp. 119-134.
- [16] N. Kirchgessner et al., "The ETH field phenotyping platform FIP: a cable-suspended multisensory system," *Funct. Plant Biol.*, vol. 44, no. 1, pp. 154-168, 25 2017.
- [17] J. Radojicic, D. Surdilovic, J. Krüger, Application challenges of large-scale wire robots in agricultural plants, *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 46, no. 4, pp. 77-82, 2013.
- [18] M J Varela, M Ceccarelli, P Flores. A kinematic characterization of human walking by using CaTraSys. *Mechanism and Machine Theory*, 2015, 86(86):125-139.
- [19] R Verhoeven. Analysis of the workspace of tendon-based Stewart platforms. Duisburg: Department of Mechanical Engineering, University of Duisburg-Essen, 2004.
- [20] D Zanotto, G Rosati, S Minto, et al. Sophia-3: a semiadaptive cable-driven rehabilitation device with a tilting working plane. *IEEE Transactions on Robotics*, 2014, 30(4): 974-979.
- [21] H W Liu, C Gosselin, T Laliberte. Conceptual design and static analysis of novel planar spring-loaded cable-loop-driven parallel mechanisms. *Journal of Mechanisms and Robotics-Transactions of the ASME*, 2012, 4(2): 11.
- [22] K Azizian, P Cardou. The dimensional synthesis of spatial cable-driven parallel mechanisms. *Journal of Mechanisms and Robotics-Transactions of the ASME*, 2013, 5(4): 8.
- [23] K Azizian, P Cardou. The dimensional synthesis of planar parallel cable-driven mechanisms through convex relaxations. *Journal of Mechanisms and Robotics-Transactions of the ASME*, 2012, 4(3): 13.
- [24] L Gagliardini, S Caro, M Gouttefarde, et al. Discrete reconfiguration planning for Cable-Driven Parallel Robots. *Mechanism and Machine Theory*, 2016, 100: 313-337.
- [25] B Zi, H H Sun, D Zhang. Design, analysis and control of a winding hybrid-driven CDPR. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2017, 48: 196-208.
- [26] J W Suh, K Y Kim, J W Jeong, et al. Design considerations for a hyperredundant pulleyless rolling joint with elastic fixtures. *IEEE-ASME Transactions on Mechatronics*, 2015, 20(6): 2841-2852.
- [27] X Dong, M Raffles, S C Guzman, et al. Design and analysis of a family of snake arm robots connected by compliant joints. *Mechanism and Machine Theory*, 2014, 77: 73-91.
- [28] Y Mao, S K Agrawal. Design of a Cable-driven arm exoskeleton (CAREX) for neural rehabilitation. *IEEE Transactions on Robotics*, 2012, 28(4): 922-931.

- [29] X Cui, W H Chen, X Jin, et al. Design of a 7-dof cable-driven arm exoskeleton (CAREX-7) and a controller for dexterous motion training or assistance. *IEEE-ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, 22(1): 161-172.
- [30] B T Gao, J Xu, J G Zhao, et al. A humanoid neck system featuring low motion-noise. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2012, 67(2): 101-116.
- [31] D Lau, D Oetomo, S K Halgamuge. Generalized modeling of multilink cable-driven manipulators with arbitrary routing using the cable-routing matrix. *IEEE Transactions on Robotics*, 2013, 29(5): 1102-1113.
- [32] X W Zhao, B Zi, L Qian. Design, analysis, and control of a cable-driven parallel platform with a pneumatic muscle active support. *Robotica*, 2017, 35(4): 744-765.
- [33] A Berti, J P Merlet, M Carricato. Solving the direct geometrico-static problem of underconstrained cable-driven parallel robots by interval analysis. *International Journal of Robotics Research*, 2016, 35(6): 723-739.
- [34] B T Gao, Z Y Zhu, J G Zhao, et al. Inverse kinematics and workspace analysis of a 3 dof flexible parallel humanoid neck robot. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2017, 87(2): 211-229.
- [35] M Carricato. Direct geometrico-static problem of underconstrained cable-driven parallel robots with three cables. *Journal of Mechanisms and Robotics-Transactions of the ASME*, 2013, 5(3): 10.
- [36] Q M Jiang, V Kumar. The inverse kinematics of cooperative transport with multiple aerial robots. *IEEE Transactions on Robotics*, 2013, 29(1): 136-145.
- [37] M Carricato, J P Merlet. Stability analysis of underconstrained cable-driven parallel robots. *IEEE Transactions on Robotics*, 2013, 29(1): 288-296.
- [38] B Zi, B Zhou. A modified hybrid uncertain analysis method for dynamic response field of the LSOAAC with random and interval parameters. *Journal of Sound and Vibration*, 2016, 374: 111-137.
- [39] E Kljuno, L W Li R. Vehicle simulation system: controls and virtual-realitybased dynamics simulation. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2008, 52(1): 79-99.
- [40] S R Oh, J C Ryu, P D Students, et al. Dynamics and control of a helicopter carrying a payload using a cable-suspended robot. *Journal of Mechanical Design*, 2015, 128(5): 1113-1121.
- [41] B Zi, Z C Zhu, J L Du. Analysis and control of the cable-supporting system including actuator dynamics. *Control Engineering Practice*, 2011, 19(5): 491-501.
- [42] J L Du, H Bao, C Z Cui, et al. Dynamic analysis of CDPRs with timevarying cable lengths. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2012, 48(1): 1392-1399.
- [43] J L Du, C Z Cui, H Bao, et al. Dynamic analysis of CDPRs using a variable length finite element. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 2015, 10(1): 011013.
- [44] M A Khosravi, H D Taghirad. Dynamic modeling and control of parallel robots with elastic cables: singular perturbation approach. *IEEE Transactions on Robotics*, 2014, 30(3): 694-704.
- [45] B P Cong, H Y Song, G Yang, et al. Force-closure workspace analysis of cable-driven parallel mechanisms. *Mechanism and Machine Theory*, 2006, 41(1): 53-69.
- [46] B L Wen, G Yang, H Y Song, et al. A generic force-closure analysis algorithm for CDPRs. *Mechanism and Machine Theory*, 2011, 46(9): 1265-1275.
- [47] D Lau, D Oetomo, S K Halgamuge. Wrench-closure workspace generation for CDPRs using a hybrid analytical-numerical approach. *Journal of Mechanical Design*, 2011, 133(7): 71004.
- [48] M Gouttefarde, D Daney, J P Merlet. Interval-analysis-based determination of the wrench-feasible workspace of parallel cable-driven robots. *IEEE Transactions on Robotics*, 2011, 27(1): 1-13.
- [49] G Meunier, B Boulet, M Nahon. Control of an overactuated cable-driven parallel mechanism for a radio telescope application. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2009, 17(5): 1043-1054
- [50] H Kino, T Yahiro, F Takemura, et al. Robust PD control using adaptive compensation for completely restrained parallel-wire driven robots: translational systems using the minimum number of wires under zerogravity condition. *IEEE Transactions on Robotics*, 2007, 23(4): 803-812.
- [51] M Gouttefarde, L Johann, R Christopher, et al. A Versatile Tension Distribution Algorithm for n - DOF Parallel Robots Driven by n+2 Cables. *IEEE Transactions on Robotics*, 2015, 31(6):1444-1457.
- [52] M Yamamoto, N Yanai, A Mohri. Trajectory control of incompletely restrained parallel-wire-suspended mechanism based on inverse dynamics. *IEEE Transactions on Robotics*, 2004, 20(5): 840-850.
- [53] L Barbazza, F Oscari, S Minto, et al. Trajectory planning of a suspended cable driven parallel robot with reconfigurable end effector. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2017, 48: 1-11.
- [54] E Barnett, C Gosselin. Time-optimal trajectory planning of cable-driven parallel mechanisms for fully specified paths with G(1)-discontinuities. *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-Transactions of the ASME*, 2015, 137(7): 12.

[55] J Fink, N Michael, S Kim, et al. Planning and control for cooperative manipulation and transportation with aerial robots. *The International Journal of Robotics Research*, 2011, 30(3): 324-334.

[56] X L Jiang, C Gosselin. Dynamic point-to-point trajectory planning of a three-DOF cable-suspended parallel robot. *IEEE Transactions on Robotics*, 2016, 32(6): 1550-1557.

[57] C Gosselin, S Foucault. Dynamic point-to-point trajectory planning of a two-DOF cable-suspended parallel robot. *IEEE Transactions on Robotics*, 2014, 30(3): 728-736.

[58] N Zhang, W W Shang. Dynamic trajectory planning of a 3-DOF underconstrained cable-driven parallel robot. *Mechanism and Machine Theory*, 2016, 98: 21-35.

[59] N Zhang, W W Shang, S Cong. Geometry-based trajectory planning of a 3-3 cable-suspended parallel robot. *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, 33(2): 484-491.

[60] M H Korayem, H Tourajizadeh, A Zehfroosh, et al. Optimal path planning of a cable-suspended robot with moving boundary using optimal feedback linearization approach. *Nonlinear Dynamics*, 2014, 78(2): 1515-1543.

[61] L W Tang, X Q Tang, X L Jiang, et al. Dynamic trajectory planning study of planar two-DOF redundantly actuated cable-suspended parallel robots. *Mechatronics*, 2015, 30: 187-197.

А.А. Джомартов*, А.Н. Камал, А. Абдураимов

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

*e-mail: legsert@mail.ru

СЫМДЫ ПАРАЛЛЕЛЬДІ РОБОТТАРҒА ШОЛУ

Андатпа. Қатты байланыстырылған параллель роботтардан айырмашылығы, параллель кабельді роботтар (ПКР) жұмыс органының орналасуы мен бағытын бақылау үшін қатаң сілтем елер емес, икемді кабельдер арқылы қозғалады. ПКР -дің параллель роботтардың әдеттегі роботтарға қарағанда артықшылығы бар, олардың салмақ пен салмақтың арақатынасы жоғарырақ. ПКР инерциялық сипаттамалары төмен және жұмыс денесінің жоғары жылдамдығы мен үдеуін қамтамасыз ететін салмақ пен салмақтың жоғары қатынасы бар. Арқандардың икемділігі арқасында ПКР үлкен жұмыс аймағы бар күрделі міндеттерді шешуге қолданыла алады. Бұл мақалада әлемде жасалған параллель арқан роботтарының кейбір түрлеріне шолу жасалады. ПКР жобалау, құрылымы, кинематикасы мен динамикасы, басқару және траекториясын жоспарлау бойынша жұмыстарға шолу көрсетілген. Кабельдік параллель роботтарға жүргізілген шолу принципалды жаңа роботтарды зерттеу саласында жұмыс істейтін студенттер мен докторанттар үшін пайдалы болады.

Негізгі сөздер: кабельдік параллель роботтар, жобалау, басқару, жоспарлау, кинематика, динамика.

А.А. Jomartov*, A.N. Kamal, A. Abduraimov

Institute of Mechanics and Mechanical Engineering named after U. A. Dzholdasbekov, Kazakhstan

*e-mail: legsert@mail.ru

OVERVIEW OF CABLE PARALLEL ROBOTS

Abstract. Unlike rigidly coupled parallel robots, parallel cable robots (PCR) are driven by flexible cables rather than rigid links to control the position and orientation of the working body. PCRs have the advantages of parallel robots over conventional robots, including a higher load-to-weight ratio. PCR have lower inertial characteristics and a higher payload-to-weight ratio, which provides high speed and acceleration of the working body. Due to the flexibility of the ropes, PCRs can be used to solve complex tasks with a large working area of service. This article provides an overview of some types of parallel cable robots developed in the world. An overview of works on the design of the PCR, structure, kinematics and dynamics, control and trajectory planning is shown. The conducted review of cable parallel robots will be useful for students and doctoral students working in the field of research of fundamentally new robots.

Keywords: cable parallel robots, design, control, planning, kinematics, dynamics.