

Я. В. Калинин, канд. техн. наук, доц., jkv83@mail.ru, Е. А. Марчук, аспирант, e.marchuk@innopolis.ru,
Университет Иннополис, г. Иннополис,
Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград

Особенности учета конструктивной нелинейности в модели динамики тросового робота*

Рассматривается задача моделирования динамики параллельного полноприводного тросового робота с включением конструктивной нелинейности тросов в математическую модель, реализуемую в компьютерной модели с возможностью использования символьных вычислений. Параллельные тросовые роботы как вид робототехники получили постепенное распространение и признание в последние три десятилетия. Вместе с расширением практического использования тросовых роботов осуществлялись исследования в теоретической области, и происходило уточнение математической модели тросовой системы. Составление динамической модели тросового робота является нетривиальной задачей. Тросовые роботы являются сильно нелинейными системами, основной причиной нелинейности становятся свойства тросовой системы. Как элемент механической системы трос является односторонней связью, поскольку трос работает только на растяжение, но не на сжатие. Таким образом, тросы являются конструктивно нелинейными элементами системы. Вместе с тем, тросы обладают свойством провисания под собственным весом. Таким образом, тросы являются геометрически нелинейными элементами системы. При условии высокой нагруженности тросовой системы, т. е. при массе полезной нагрузки, многократно превышающей массу каждого отдельно взятого троса, можно считать тросы натянутыми без провисания и пренебречь геометрической нелинейностью. Поскольку в компьютерной модели, реализующей математическую модель динамики тросового робота, могут использоваться символьные вычисления, становится необходимым включение условия конструктивной нелинейности таким способом, чтобы обеспечить возможность символьных вычислений.

Целью настоящего исследования является разработка метода, обеспечивающего включение конструктивной нелинейности тросовой системы в математическую модель с учетом возможной реализации компьютерной модели на символьных вычислениях. Рассматривается проблема включения математической модели тросов как односторонних связей в модели высоконагруженных тросовых роботов. Приводятся обоснования для включения функций активации в систему уравнений динамики тросового робота. С использованием предложенного метода и с учетом сопротивления тросов только растяжению, но не сжатию, получено численное решение прямой задачи динамики высоконагруженного параллельного тросового робота с включением функций активации в систему дифференциальных уравнений модели динамики.

Ключевые слова: тросовый робот, функция активации, дифференциальные уравнения

Введение

При решении задач динамики параллельных тросовых роботов возможно использование различных моделей тросов. В первом приближении может использоваться модель троса как невесомого и нерастяжимого стержня. Более распространенной является модель троса как невесомого упругого стержня. Модели стержней не учитывают провисания тросов в пролетах между точками закрепления, однако просты в расчетах. Более адекватными являются модели тросов как тяжелых гибких нитей, растяжимых, либо нерастяжимых, они сложнее в расчетах [1–3]. Принимая такую модель, следует учитывать возможные затруднения при осуществлении расчетов в реальном времени. Существуют точные модели канатов и тросов, учитывающие провисание, растяже-

ние, продольные, поперечные и крутильные колебания и иные явления [4, 5]. Такие модели наиболее адекватны реальным процессам, однако требуют значительных вычислительных затрат, их невозможно рассчитывать в реальном времени. Точные модели канатов и тросов, как правило, используются при описании крупногабаритных систем и объектов: шахтных подъемников, кабельных кранов, канатных дорог и т. д. [5–9]. В расчетах тросовых роботов тросы могут считаться тяжелыми гибкими нитями, растяжимыми, либо нерастяжимыми [10–13]. В расчетах высоконагруженных тросовых роботов, учитывая сильное натяжение тросов, считается, что тросы не провисают, и их можно считать стержнями [14, 15]. Поскольку масса каждого троса высоконагруженного тросового робота мала в сравнении с массой полезной нагрузки, закрепленной на тросах, тросы можно считать невесомыми. В настоящей работе рассматривается модель троса как невесомого упругого стержня.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 19-08-01234).

Тросы как односторонние связи

С точки зрения механики тросы являются односторонними связями. Модель невесомого упругого стержня, соответствующая непровисающему тросу, должна работать только на растяжение. Отличительной особенностью односторонних связей является то, что они задаются неравенствами, в отличие от двусторонних связей, которые определяются уравнениями [16]. Механические системы, включающие односторонние связи, являются конструктивно нелинейными. Геометрическая нелинейность, проявляющаяся в моделях гибких нитей, в моделях стержней отсутствует. В литературе приводятся различные методы расчетов для систем с односторонними связями [17]. Также приводятся различные методы расчета тросовых конструкций в висячих системах [18, 19]. Однако перечисленные методы в большей степени соответствуют статическим задачам расчетов зданий и архитектурных сооружений и не удовлетворяют в полной мере задачам динамики тросового робота. Заменяем односторонние связи усилиями, соответствующими силам натяжения тросов, и перейдем к следующему этапу.

Динамика параллельного тросового робота

В компактной матричной форме уравнение динамики параллельного тросового робота имеет вид

$$MT\ddot{q} - DT\dot{q} + g_c = w_p + A^T f, \quad (1)$$

где M — матрица масс; D — матрица затухания; T — матрица однородных преобразований; q — вектор обобщенных координат; g_c — фактор воздействия центробежной и кориолисовой сил; w_p — динамический винт внешних сил; A^T — транспонированная матрица Якоби; f — вектор сил натяжений в тросах.

Принимая во внимание неспособность троса к сопротивлению сжатию, уравнение для силы натяжения i -го вытравленного троса обычно записывают в виде кусочной функции:

$$f = \begin{cases} c_i(l_i(\theta_i))\Delta l_i(x, \theta_i) + d_i(l_i(\theta_i))\dot{\Delta l}_i(x, \theta_i), \\ \text{если } \Delta l_i > 0; \\ 0, \text{ если } \Delta l_i \leq 0, \end{cases} \quad (2)$$

где f_i — сила натяжения i -го троса; E — модуль Юнга материала троса; c_i — жесткость i -го вытравленного троса; d_i — коэффициент внутреннего сопротивления i -го вытравленного троса; θ_i — угол поворота i -й лебедки; l_i — длина i -го вытравленного троса; Δl_i — изменение длины i -го вытравленного троса.

В этом случае трос определяется как вязкоупругое тело согласно модели Фойгта [20]:

$$\sigma = E\varepsilon + \eta\dot{\varepsilon}, \quad (3)$$

где σ — механическое напряжение; E — модуль Юнга материала троса; η — динамическая вязкость материала троса; ε — относительное удлинение троса.

Модель Фойгта выводится из соотношений

$$\frac{F}{A} = E \frac{\Delta l}{l_0} + \eta \frac{\dot{\Delta l}}{l_0}; \quad (4)$$

$$F = \frac{EA}{l_0} \Delta l + \frac{\eta A}{l_0} \dot{\Delta l} \quad (5)$$

и далее приводится к виду (2).

Система дифференциальных уравнений, описывающих движение мобильной платформы параллельного тросового робота, не может быть решена аналитически, но может быть проинтегрирована численным методом. Заметим, что представленная выше кусочная функция (2) может осложнить процесс интегрирования встроенными инструментами пространственных вычислительных пакетов. Постараемся избавиться от кусочной функции, при этом сохранив условие неспособности троса к сопротивлению сжатию.

Включение функций активации в модель троса

Как отмечалось выше, реальные тросы имеют сложную структуру и при этом достаточно точно описываются сложными математическими моделями. Следует учитывать, что канаты не имеют предела текучести, и характер их реакции на нагрузку не в точности соответствует закону Гука. Упругое удлинение каната существенно больше, чем у стержня с таким же диаметром из того же материала той же исходной длины. Модуль упругости каната является переменной величиной, в теоретических работах описываются методы его оценки [8]. Однако считается, что наиболее точное значение для конкретного образца определяется экспериментальным путем.

Экспериментальное определение вязкоупругих характеристик канатов и тросов описывается в работах [21, 22]. Геликоидная структура свитых прядей троса в начале работы троса на растяжение может обеспечивать участок "холостого хода". Точные модели учитывают эти факторы, принимая в расчет углы закручивания прядей и прочие параметры. В упрощенную модель троса как нелинейно упругого невесомого стержня для обеспечения свойства "холостого хода" в работе односторонней связи предлагается включать функцию активации. Следует принимать во внимание, что реальные тросы в процессе эксплуатации вытягиваются и обжимаются, и эффект "холостого хода" на эксплуатируемых в течение продолжительного времени тросах практически полностью исчезает.

Как правило, функции активации используются в задачах теории автоматического управления [23]. В настоящее время наиболее широкое распространение функции активации находят в различных моделях искусственных нейронных сетей [24, 25]. Принцип действия функции активации заключается в изменении значения функции в момент достижения некоторого порогового значения аргумента. Для дальнейшего численного решения дифференциальных уравнений встроенными инструментами наиболее популярных вычислительных пакетов требуется соблюдение условия гладкости и непрерывности интегрируемой функции. Соответственно, выбирать следует гладкую и непрерывную функцию активации. В дальнейших расчетах будет использоваться сигмоидальная функция вида

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{a+bx}}. \quad (6)$$

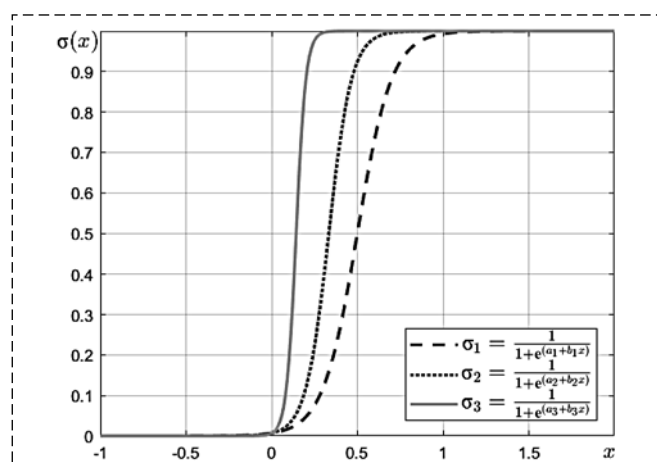


Рис. 1. Сигмоидальные функции активации
Fig. 1. Sigmoidal activation functions

Изменение параметров функции a и b позволяет регулировать скорость интенсивного возрастания сигмоида, и, следовательно, задавать значение интервала "холостого хода" троса (рис. 1).

Включение функций активации в систему дифференциальных уравнений динамики параллельного тросового робота

Как замечено выше, тросы могут работать только на растяжение, но не на сжатие. В большинстве изданий и статей авторы ограничиваются условием (2), не вдаваясь в подробности вычислительной реализации [14, 26]. Однако включение условия работы троса только на растяжение с условием интервала "холостого хода" в систему дифференциальных уравнений может оказаться нелегкой задачей. Вместе с тем, включение сигмоидальных функций активации в систему дифференциальных уравнений обеспечивает условие работы тросов только на растяжение (опционально — с подключением условия "холостого хода" через изменение параметров сигмоида):

$$MT\ddot{q} - DT\dot{q} + g_c = w_p + A^T f \left[\frac{1}{1 + e^{a+b\Delta l}} \right]. \quad (7)$$

Параметры сигмоидальной функции активации подбираются таким образом, чтобы функция имела участок, соответствующий "холостому ходу" (при условии его существования) и была смещена вправо по оси абсцисс так, чтобы обеспечивать соответствие начала участка резкого возрастания функции минимальному положительному значению аргумента (рис. 1). Значение смещения определяется требованиями точности.

Параметры сигмоидальной функции активации выбираются таким образом, чтобы обеспечить почти ступенчатую форму сигмоида и задать условие работы троса только на растяжение без участка "холостого хода". При условии $\Delta l_i \leq 0$ функция активации почти равна нулю и, соответственно, можно считать $f(\Delta l_i) \frac{1}{1 + e^{a+b\Delta l_i}} \approx f(\Delta l_i) \cdot 0$. Участок резкого возрастания сигмоида обеспечивает быстрый переход от нуля к единице, обеспечивая ступенчатый переход при соблюдении условия гладкости и непрерывности функции активации. При условии $\Delta l_i > 0$ функция активации почти равна единице и, соответственно, мож-

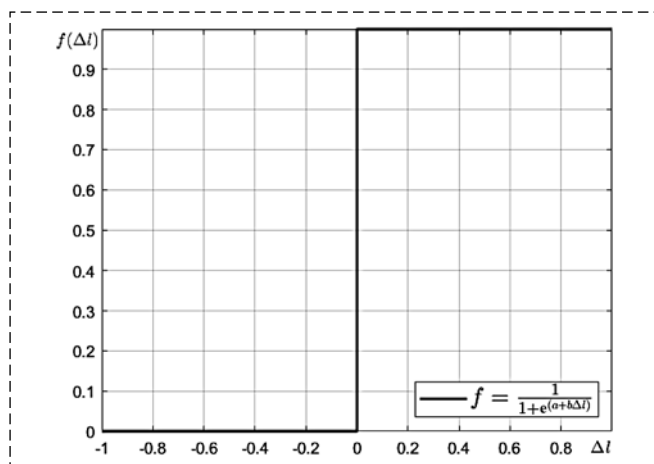


Рис. 2. Функция активации, обеспечивающая условие работы троса только на растяжение

Fig. 2. Activation function which provides only stretching, not compression

но считать $f(\Delta l_i) \frac{1}{1 + e^{a+b\Delta l_i}} \approx f(\Delta l_i) \cdot 1$. Таким образом, функция приобретает вид аналитической непрерывной формы функции Хевисайда. Неравенства аргумента функции относительно нуля и значения самой функции на указанных интервалах можно считать верными, если считать сигмоид единичной ступенчатой функцией в пределах заданной точности (рис. 2).

Численное моделирование

Численный эксперимент проведен для модели высоконагруженного параллельного тросового роботизированного комплекса в программной среде MATLAB с использованием встроенного инструмента численного решения дифференциальных уравнений *ode23t*. За основу взята модель роботизированного строительного комплекса Университета Иннополис, который представляет собой восьмитросовый параллельный робот (рис. 3, см. третью сторону обложки). Несущие тросы робота обозначены цифрами 1, 2, 3, 4. Регулировочные тросы робота обозначены цифрами 5, 6, 7, 8. Основная нагрузка на растяжение под действием силы тяжести в основном приходится на

несущие тросы. Нагрузка на растяжение и на сжатие приходится на регулировочные тросы. В компьютерной модели в начальный момент времени твердое тело, присоединенное к тросам, покоится на опоре, затем начинает движение в заданном направлении с заданной скоростью. Вязкоупругие свойства модели тросов определяют колебательный характер движения системы. Характеристики роботизированного комплекса приведены в таблице.

На рис. 4 (см. третью сторону обложки) приведены результаты численного моделирования сил натяжения и функций активации для тросов 1, 4, 7, 8 в начале движения мобильной платформы.

На рис. 5 (см. третью сторону обложки) приведены результаты численного моделирования распределения нагрузок для восьми тросов в процессе движения платформы.

Выводы

В ходе проведенного исследования разработан метод, обеспечивающий включение конструктивной нелинейности тросовой системы в математическую модель с учетом возможности использования символьных вычислений в реализации компьютерной модели. Предложен способ решения проблемы включения математической модели тросов как односторонних связей в модели высоконагруженных тросовых роботов. Приведены обоснования для включения функций активации в систему уравнений динамики тросового робота.

С использованием разработанного метода и с учетом сопротивления реальных тросов только усилию на растяжение получено численное решение прямой задачи динамики высоконагруженного параллельного тросового робота с включением функций активации в систему дифференциальных уравнений модели динамики робота. Полученные результаты иллюстрируют целесообразность включения сигмоидальной функции активации

Характеристики высоконагруженного параллельного тросового роботизированного комплекса

Properties of high-loaded parallel cable-driven robotic complex

Число тросов	Диаметр стального троса	Масса рабочего инструмента	Масса полезной нагрузки	Скорость перемещения инструмента	Площадь рабочего пространства	Ограничение рабочего пространства по высоте
8	12 мм	500 кг	до 1500 кг	до 0,15 м/с	20 × 20 м	12 м

"трос—стержень—односторонняя связь" в состав дифференциальных уравнений модели, тросы в компьютерной модели работают на сопротивление растяжению и не работают на сопротивление сжатию.

Практическое применение разработанного метода используется в расчетах при проектировании роботизированного строительного комплекса Университета Иннополис, основой которого является высоконагруженный полноприводный параллельный тросовый робот.

Список литературы

1. Irvine H. M. Cable structures. The MIT Press, 1981. 259 p.
2. Меркин Д. Р. Введение в механику гибкой нити. М.: Наука, 1980. 240 с.
3. Светлицкий В. А. Механика гибких стержней и нитей. М.: Машиностроение, 1978. 222 с.
4. Feyrer K. Wire ropes. Tension, Endurance, Reliability. Springer-Verlag, 2007. 322 p.
5. Малиновский В. А. Стальные канаты. Одесса: Астропринт, 2001. 188 с.
6. Kaczmarczyk S., Ostachowicz W. Transient vibration phenomena in deep mine hoisting cables. Part 1: Mathematical model // Journal of Sound and Vibration. 2003. Iss. 262 (2). P. 219—244.
7. Kaczmarczyk S., Ostachowicz W. Transient vibration phenomena in deep mine hoisting cables. Part 2: Numerical simulation of the dynamic response // Journal of Sound and Vibration. 2003. Iss. 262 (2). P. 245—289.
8. Дукельский А. И. Подвесные канатные дороги и кабельные краны. М.: Машиностроение, 1966. 485 с.
9. Куйбида Г. Г. Кабельные краны. М.: Машиностроение, 1989. 288 с.
10. Kozak K., Zhou Q., Wang J. Static Analysis of Cable-Driven Manipulators with Non-Negligible Cable Mass. IEEE Transactions on Robotics. June 2006. Vol. 22, N. 3.
11. Merlet J. P. The kinematics of cable-driven parallel robots with sagging cables: preliminary results // 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2015. P. 1593—1598.
12. Merlet J. P. A generic numerical continuation scheme for solving the direct kinematics of cable-driven parallel robot with deformable cables // 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2016. P. 4337—4343.
13. Merlet J. P. Some properties of the Irvine cable model and their use for the kinematic analysis of cable-driven parallel robots. // Mechanism and Machine Theory. 2019. Vol. 135. P. 271—280.
14. Pott A. Cable-Driven Parallel Robots: Theory and Application. Springer, 2018.
15. Akhmetzyanov A., Rassbin M., Maloletov A., Fadeev M., Klimchik A. Deep Learning with Transfer Learning Method for Error Compensation of Cable-driven Robot // Proceedings of the 17th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics. Vol. 1. ICINCO, 2020. P. 553—559.
16. Рабинович И. М. Вопросы теории статического расчета сооружений с односторонними связями. М.: Стройиздат, 1975. 144 с.
17. Перельмутер А. В., Сливкер В. И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. Киев: Сталь, 2002. 600 с.
18. Качурин В. К. Теория висячих систем. Л.: Госстройиздат, 1962. 224 с.
19. Seidel M. Tensile Surface Structures. Ernst and Sohn, 2009. 229 p.
20. Meyers M. A., Chawla K. K. Mechanical Behavior of Materials. Cambridge University Press, 2009. 856 p.
21. Vanderveldt H. H., Chung B. S., Reader W. T. Some dynamic properties of axially loaded wire ropes // Experimental Mechanics. 1973. Vol. 13. P. 24—30.
22. Hamilton J. M. Vibration-Based Techniques for Measuring the Elastic Properties of Ropes and the Added Mass of Submerged Objects // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2000. Vol. 17. Iss. 5. P. 688—697.
23. Пупков К., Егупов Н. Д. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 1: "Математические модели, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления". М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 656 с.
24. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / Пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. 798 с.
25. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Пер. с польск. И. Д. Рудинского. М.: Горячая линия — Телеком, 2013. 384 с.
26. Zi B., Qian S. Design, Analysis and Control of Cable-Suspended Parallel Robots and Its Applications. Springer, 2017. 299 p.

Specificity of Including of Structural Nonlinearity in Model of Dynamics of Cable-Driven Robot

Ya. V. Kalinin, jkv83@mail.ru, E. A. Marchuk, e.marchuk@innopolis.ru,

Innopolis University, Innopolis, 420500, Russian Federation,

Volgograd State Technical University, Volgograd, 400005, Russian Federation

Corresponding author: Marchuk Eugene A., M. Sc., Department of Theoretical Mechanics, Volgograd State Technical University, 400005, Volgograd, Russian Federation, e-mail: flameduck88@gmail.com

Accepted on July 12, 2021

Abstract

The paper deals with a problem of modeling of the dynamics of a parallel cable-driven robot with the inclusion of structural nonlinearity of cables in a mathematical model. Mathematical model is implemented in a computer model with the possibility of using of symbolic calculations. Parallel cable robots as a type of robotics have been developing in the last two or three decades. The research in the theoretical field was being carried out and the mathematical model of the cable system was being refined with the spread of the practical use of cable robots. This is a non-trivial task to draw up a dynamic model of a cable-driven robot. Cable-driven robots are highly nonlinear systems, because of the main reason for

the nonlinearity is the properties of the cable system. As an element of a mechanical system, the cable or the wire rope is a unilateral constraint, since the cable works only for stretching, but not for compression. Thus, the cables are structurally nonlinear elements of the system. On the other hand, cables have the property of sagging under their own weight. Thus, the cables are geometrically nonlinear elements of the system. Under the condition of a payload mass that is utterly greater than the mass of each cable, the cables can be considered strained without sagging and geometric nonlinearity can be neglected. Since symbolic computations can be used in a computer model which implements a mathematical model of the dynamics of a robot, in such a way it must provide the possibility of symbolic computations with the condition of structural nonlinearity. The main aim of this work is to develop a method that ensures the inclusion of the structural nonlinearity of the cable system in the mathematical model. It is supposed to consider the possibility of implementation of the computer model with symbolic computations. The problem of including a mathematical model of cables as unilateral constraints in the model of highly loaded cable robots is considered. The justification for including the activation functions in a system of differential equations of dynamics of cable-driven robot is formulated. A model of wire ropes as unilateral constraints is represented via including the activation functions in a system of differential equations. With using of the proposed method, numerical solution of a problem of forward dynamics has been obtained for high-loaded parallel cable-driven robot.

Keywords: cable-driven robot, activation function, differential equations

For citation:

Kalinin Ya. V., Marchuk E. A. Specificity of Including of Structural Nonlinearity in Model of Dynamics of Cable-Driven Robot, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 10, pp. 547–552.

DOI: 10.17587/mau.22.547-552

References

1. **Irvine H. M.** Cable structures, The MIT Press, 1981, 259 p.
2. **Merkin D. R.** Introduction to the mechanics of a flexible thread, Moscow, Nauka, 1980, 240 p. (in Russian).
3. **Svetlitskij V. A.** Mechanics of flexible pins and threads, Moscow, Mashinostroenie, 1978, 222 p. (in Russian).
4. **Feyrer K.** Wire ropes. Tension, Endurance, Reliability, Springer-Verlag, 2007, 322 p.
5. **Malinovskij V. A.** Steel wire ropes, Odessa, Astroprint, 2001, 188 p. (in Russian).
6. **Kaczmarczyk S., Ostachowicz W.** Transient vibration phenomena in deep mine hoisting cables. Part 1: Mathematical model, *Journal of Sound and Vibration*, 2003, iss. 262 (2), pp. 219–244.
7. **Kaczmarczyk S., Ostachowicz W.** Transient vibration phenomena in deep mine hoisting cables. Part 2: Numerical simulation of the dynamic response, *Journal of Sound and Vibration*, 2003, iss. 262 (2), pp. 245–289.
8. **Dukelskij A. I.** Cable transport and cable cranes, Moscow, Mashinostroenie, 1966, 485 p. (in Russian).
9. **Kujbida G. G.** Cable Cranes, Moscow, Mashinostroenie, 1989, 288 p. (in Russian).
10. **Kozak K., Zhou Q., Wang J.** Static Analysis of Cable-Driven Manipulators with Non-Negligible Cable Mass, *IEEE Transactions on Robotics*, June 2006, vol. 22, no. 3.
11. **Merlet J. P.** The kinematics of cable-driven parallel robots with sagging cables: preliminary results, *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2015, pp. 1593–1598.
12. **Merlet J. P.** A generic numerical continuation scheme for solving the direct kinematics of cable-driven parallel robot with deformable cables, *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2016, pp. 4337–4343.
13. **Merlet J. P.** Some properties of the Irvine cable model and their use for the kinematic analysis of cable-driven parallel robots, *Mechanism and Machine Theory*, 2019, vol. 135, pp. 271–280.
14. **Pott A.** Cable-Driven Parallel Robots: Theory and Application, Springer, 2018.
15. **Akhmetzyanov A., Rassbin M., Maloletov A., Fadeev M., Klimchik A.** Deep Learning with Transfer Learning Method for Error Compensation of Cable-driven Robot, *Proceedings of the 17th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, vol. 1, ICINCO, 2020, pp. 553–559.
16. **Rabinovich I. M.** On the issues of static analysis of constructions with unilateral constraints, Moscow, Stroyizdat, 1975, 144 p. (in Russian).
17. **Perelmuter A. V., Slivker V. I.** Computation models of constructions and possibility of their analysis, Kiev, Stal, 2002, 600 p. (in Russian).
18. **Kachurin V. K.** Theory of Tensile Structures, Leningrad, Gosstroyizdat, 1962, 224 p. (in Russian).
19. **Seidel M.** Tensile Surface Structures. Ernst and Sohn, 2009, 229 p.
20. **Meyers M. A., Chawla K. K.** Mechanical Behavior of Materials, Cambridge University Press, 2009, 856 p.
21. **Vanderveldt H. H., Chung B. S., Reader W. T.** Some dynamic properties of axially loaded wire ropes, *Experimental Mechanics*, 1973, vol. 13, pp. 24–30.
22. **Hamilton J. M.** Vibration-Based Techniques for Measuring the Elastic Properties of Ropes and the Added Mass of Submerged Objects, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2000, vol. 17, iss. 5, pp. 688–697.
23. **Pupkov K. A., Egupov N. D.** Methods of classic and modern control theory. Vol. 1. Mathematical models, dynamic properties, and analysis of control systems, Moscow, Publishing house of MGTU im. N. E. Bauman, 2004, 656 p. (in Russian).
24. **Piegat A.** Fuzzy modeling and control, Physica-Verlag Heidelberg, 2001, 728 c.
25. **Rutkovskaya D., Pilinsky M., Rutkovsky L.** Neural networks, genetic algorithms, and fuzzy systems, Moscow, Goryachaya liniya—Telekom, 2013, 384 p. (in Russian).
26. **Zi B., Qian S.** Design, Analysis and Control of Cable-Suspended Parallel Robots and Its Applications, Springer, 2017, 299 p.