

DOI: 10.34031/article_5da4652c1400a3.95219452

^{1,*}Гапоненко Е.В., ¹Рыбак Л.А., ¹Холошевская Л.Р.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46

*E-mail: gaponenkobel@gmail.com

СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ И КЛАССИФИКАЦИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ С ПРИВОДНЫМИ МЕХАНИЗМАМИ НА ОСНОВЕ КАБЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Аннотация. Существует большое разнообразие механизмов параллельной структуры. Особый интерес представляют кабельные роботы, которые используют кабели вместо выдвигаемых штанг для управления положением выходного звена. Они имеют ряд преимуществ, таких как большая рабочая область, простота сборки и разборки, высокая мобильность, но также имеются недостатки, связанные с управлением движением кабелей робота. В работе приведены примеры одних из первых кабельных роботов, рассмотрены их назначение и применение. Также в статье рассмотрены российские и зарубежные ученые, которые занимаются этими вопросами и проанализированы их работы. В результате структурного анализа составлена и подробно рассмотрена классификация кабельных роботов: по способу размещения барабанов, по количеству степеней свободы рабочего органа и числу гибких звеньев, по способу применения, по типу основания, по способу крепления кабелей. Приведена структура кабельного робота для перемещения грузов. Однако остается много областей, открытых для теоретических исследований. В заключение рассмотрены темы, которые нуждаются в большем изучении. Самая очевидная область исследований – управление, также оптимизация рабочей области для различных применений этих устройств, поиск и использование всех преимуществ, предлагаемых кабельными устройствами.

Ключевые слова: кабельные роботы, кабели, выходное звено, структурный анализ.

Введение. Манипуляторы параллельной структуры все большее применяются во многих отраслях промышленности таких как медицина, энергетика, строительство, машиностроение, космическая отрасль [1–4].

В настоящее время существует большое разнообразие механизмов параллельной структуры. Особый интерес представляют кабельные роботы, которые представляют собой особый тип кинематической структуры, состоящей в основном из рабочего органа, соединенного с неподвижной базовой платформой с помощью кабелей. Кабельные роботы используют кабели вместо выдвигаемых штанг для управления положением выходного звена. В этих манипуляторах управление положением выходного звена осуществляется посредством изменения длины кабелей. Кабели обычно наматываются на катушки, прикрепленные к основанию, и приводятся в действие вращающимся двигателем. Кабельные роботы имеют особые преимущества, такие как большая рабочая область, простота сборки и разборки, высокая мобильность, большая грузоподъемность и простота перенастройки. Контролируя длины кабелей в широких пределах, можно получить доступ к очень большому рабочему пространству от нескольких десятков сантиметров до нескольких десятков метров и более. Использование кабелей вместо жестких звеньев дополнительно уменьшает массу, так как приводы не меняют положение и

крепятся к неподвижному основанию так, что единственными движущимися частями являются кабели и выходное звено. Как следствие, получается робот с более высокой скоростью и маневренностью, и увеличенной грузоподъемностью. Затраты на производство кабельных роботов значительно ниже, чем у обычных манипуляторов. Кабельные роботы просты в установке. Такой манипулятор может быть собран с использованием ряда недорогих лебедок и кабелей.

Несмотря на их многочисленные преимущества, существует несколько проблем, связанных с управлением движением кабелей робота. Одним из недостатков является то, что кабели могут тянуть, но не толкать, это приводит к одностороннему ограничению, при котором кабели всегда должны поддерживаться в натянутом состоянии. Так же необходимо использовать больше кабелей, чем степеней свободы, чтобы полностью удерживать платформу и управлять ею.

Одним из первых кабельных роботов является NIST Robocrane (рис. 1), разработанный Джеймсом С. Альбусом и его командой из Национального института стандартов и технологий (Гейтерсберг, США). Манипулятор содержит перевернутую платформу Стюарта с шестью гидравлическими опорами, где каждая из шести опор была заменена на кабель. Как и платформа Стюарта, Robocrane обладает шестью степенями

свободы и может поднимать, и точно манипулировать тяжелыми грузами на большие расстояния.

В 1995 году П. Д. Кэмпбелл, П. Л. Сваим, К. Дж. Томпсон представили робота «Шарлотта» (рис. 2), разработанного Макдоннелл-Дугласом

(в настоящее время - «Боинг») для использования на Международной космической станции. Это мобильный ящик размером с микроволновую печь, подвешенный на восьми кабелях и приводимый в движение восемью моторами, установленными на корпусе.

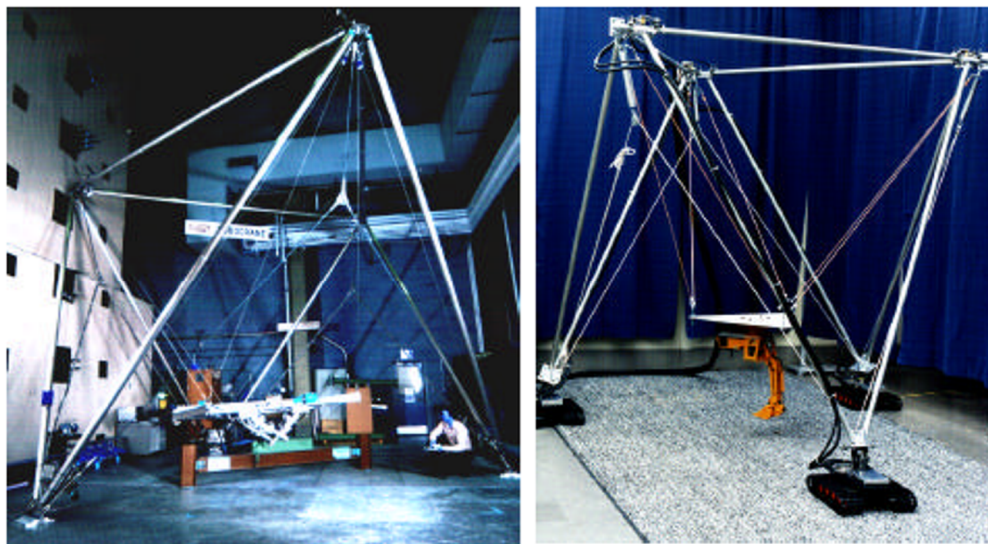


Рис. 1. NIST Robocrane

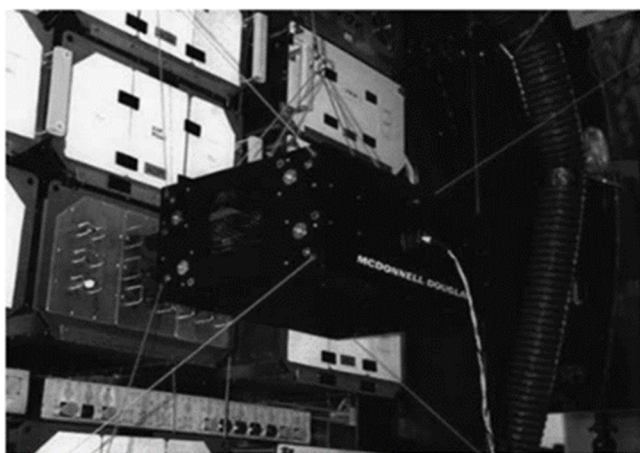


Рис. 2. Робот Charlotte

Особое внимание уделяют теме кабельных роботов: Ж. Б. Изард, М. Мишлен, Ж. П. Мерле, К. Госселин, С. Барадат, и др. Бучард и Госсла занимались оптимизацией рабочего пространства кабельного робота для радиовещания. Так, в работе [5] рассматриваются некоторые вопросы, касающиеся обратной кинематики и статики кабельных роботов, а также некоторые ограничения, присущие рабочему пространству. Аббаснеяд и др разработали плоский кабельный робот для реабилитационных целей и балансировки внешних сил. Ж.П. Мерле и Д. Дени разработали легкий и мобильный кабельный параллельный робот Marionet [6], который предназначен для спасательных работ в труднодоступных местах.

В работе [7] рассматривается динамическое планирование траектории 3-DOF пространственных подвесных параллельных манипуляторов. На основе динамической модели подвешенного робота получен набор алгебраических неравенств, представляющих ограничения на натяжение кабеля. При использовании периодических функций при проектировании траекторий показано, что возникают специальные частоты, аналогичны собственным частотам систем маятникового типа. Эти специальные частоты можно использовать на практике, чтобы значительно упростить планирование траектории. Разработан прототип 3-DOF кабельного робота. Предлагаемый подход к планированию траекторий может быть использован для планирования динамических траекторий, выходящих за пределы статического рабочего пространства механизма, открывая новые приложения и возможности для кабельных роботов. В работе [8] рассмотрен динамический анализ и классификация рабочей области на основе общего уравнения движения кабельного робота и одностороннего свойства кабелей. Проведено качественное сравнение различных типов рабочих пространств.

Исследования систем, подобных кабельным роботам, проводятся и в России, однако публикации по данному направлению немногочисленны. В работе [9] сформулирована в общем виде задача планирования траектории перемещения

схвата манипулятора. Приведено решение кинематической задачи по положению для зоны обслуживания в форме трехмерного четырехгранника и параллелепипеда, для скорости – в форме параллелепипеда. В работе [10] предложен способ изменения распределения сил между звеньями за счет использования всех гибких связей. Приведена оценка энергоэффективности использования манипуляторов данного типа и определена предпочтительная область использования. В работе [11] рассматриваются динамические ограничения структуры манипулятора с подвесом схвата на гибких звеньях. Представлена зависимость рекомендуемой максимальной скорости от

положения точки крепления груза по вертикали. Разработано устройство [12], которое может быть использовано в качестве устройства для перемещения грузов различного назначения в любую точку пространства в пределах обслуживаемой им территории, а также устройство для измерения натяжения троса.

Кабельные роботы можно классифицировать по способу размещения барабанов, по количеству степеней свободы рабочего органа и числу гибких звеньев, по способу применения, по виду основания, по способу крепления кабелей (рис. 3).



Рис. 3. Классификация кабельных роботов.

По способу размещения барабанов, предназначенных для намотки и смотки одних концов гибких звеньев, можно выделить: манипуляторы, где барабаны размещены возле основания каждой из четырех вертикальных колон, и манипуляторы, где барабаны размещены возле основания одной из вертикальных колон.

Манипулятор (рис. 4) состоит из четырех вертикальных колонн, возле основания каждой из которых размещены барабаны Б1, Б2, Б3, Б4, предназначенные для намотки (или смотки) одних концов гибких звеньев [13]. Другие концы гибких звеньев, проходящие через шкивы Ш1, Ш2, Ш3, Ш4, соединяются в точке крепления груза С. Под действием веса груза, закрепленного в точке С, в тросах возникают силы натяжения Т1, Т2, Т3, Т4. Изменение положения точки крепления груза происходит за счет изменения длин кабелей при вращении барабанов мотор – редукторами М1, М2, М3, М4.

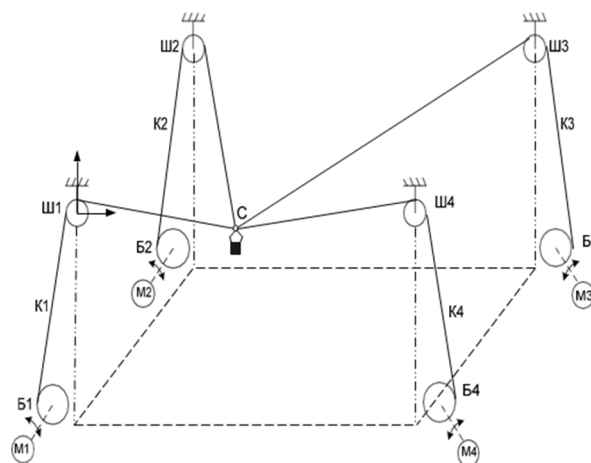


Рис. 4. Кинематическая схема кабельного робота

Робот NIMS3D [14, 15], где барабаны размещены возле основания одной из вертикальных колон, представленный на рис. 5. Как видно из рисунка, кинематика NIMS3D схожа с вышерассмотренной кинематикой параллельного манипу-

лятора. Отличие её в том, что параллельный робот NIMS3D состоит из трех вертикальных колонн 1, возле основания одной из которых размещены барабаны 3. Другие концы гибких звеньев также соединяются со схватом 2. Изменение положения схвата происходит аналогичным способом, как и в первом случае.

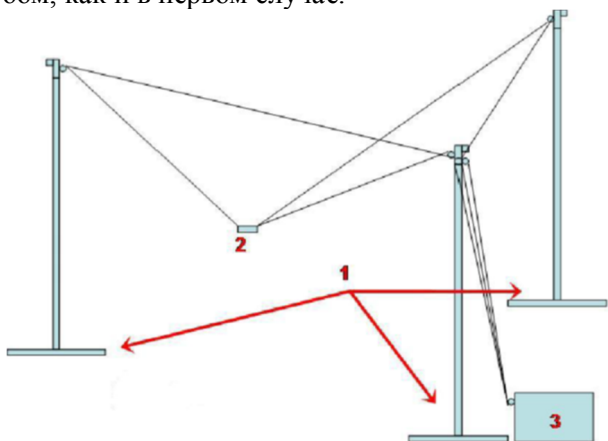


Рис. 5. Робот NIMS3D.

Параллельный манипулятор NIMS3D обладает следующими ключевыми преимуществами,

по сравнению с манипулятором, приведенным на рис. 4: удаленным расположением приводов от системы управления; быстрой разворачиваемостью; сравнительно большим объемом рабочей зоны; сравнительно высокой грузоподъемностью. NIMS3D может быть использован при решении задач обработки опасных материалов, проведении спасательных работ, организации видеосъемки спортивных мероприятий, имитации полета воздушного транспорта.

По количеству степеней свободы рабочего органа n и числа гибких звеньев m кабельные роботы классифицируют [16]:

1. Если $m < n+1$ – ограниченный манипулятор, движение рабочего органа не может полностью контролироваться (рис. 6. а).
2. Если $m = n+1$ – вполне ограниченный манипулятор – движение рабочего органа может контролироваться, но с этим минимальным количеством звеньев (рис. 6. б, в, г).
3. Если $m > n+1$ – манипулятор с избыточными ограничениями – число кабелей превышает число степеней свободы (рис. 6. д, е).

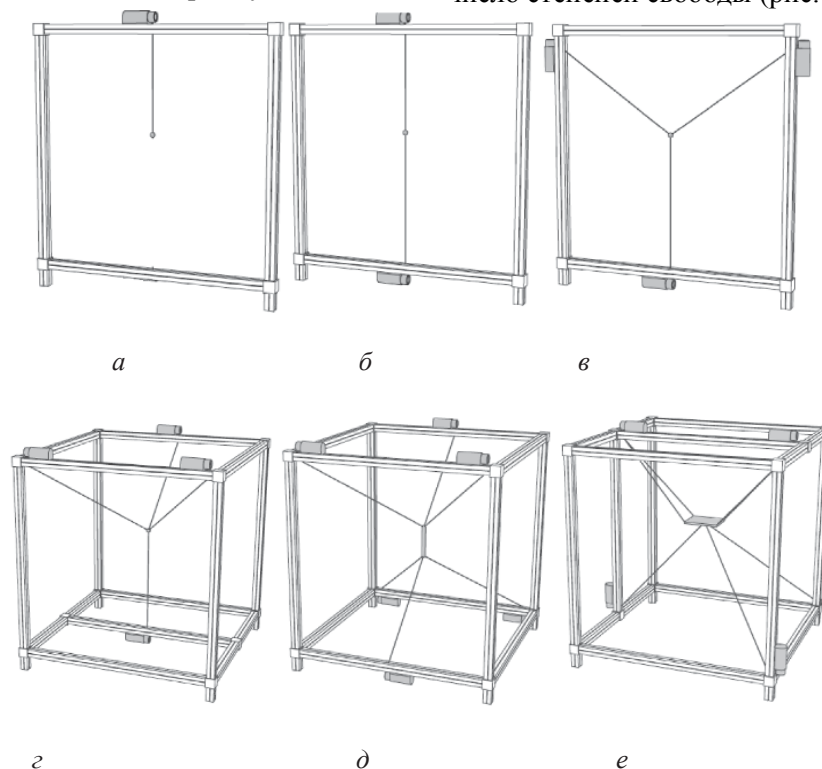


Рис. 6. Классификация кабельных роботов:

а – ограниченный манипулятор; б, в, г – вполне ограниченный; д, е – манипулятор с избыточными ограничениями

У механизмов с избыточными ограничениями движение рабочего органа может полностью контролироваться, также избыточность можно использовать для создания отказоустойчивых систем.

По виду основания кабельные роботы делятся на 2 класса: первый класс - манипуляторы

с подвижным основанием (рис. 7 а, б), которые используют для манипулирования объектами и транспортировки по суше, морю и в воздухе, спасательные работы [17-19]; второй класс – манипуляторы с фиксированным положением основания (рис. 7 в, г) (обычные кабельные роботы).

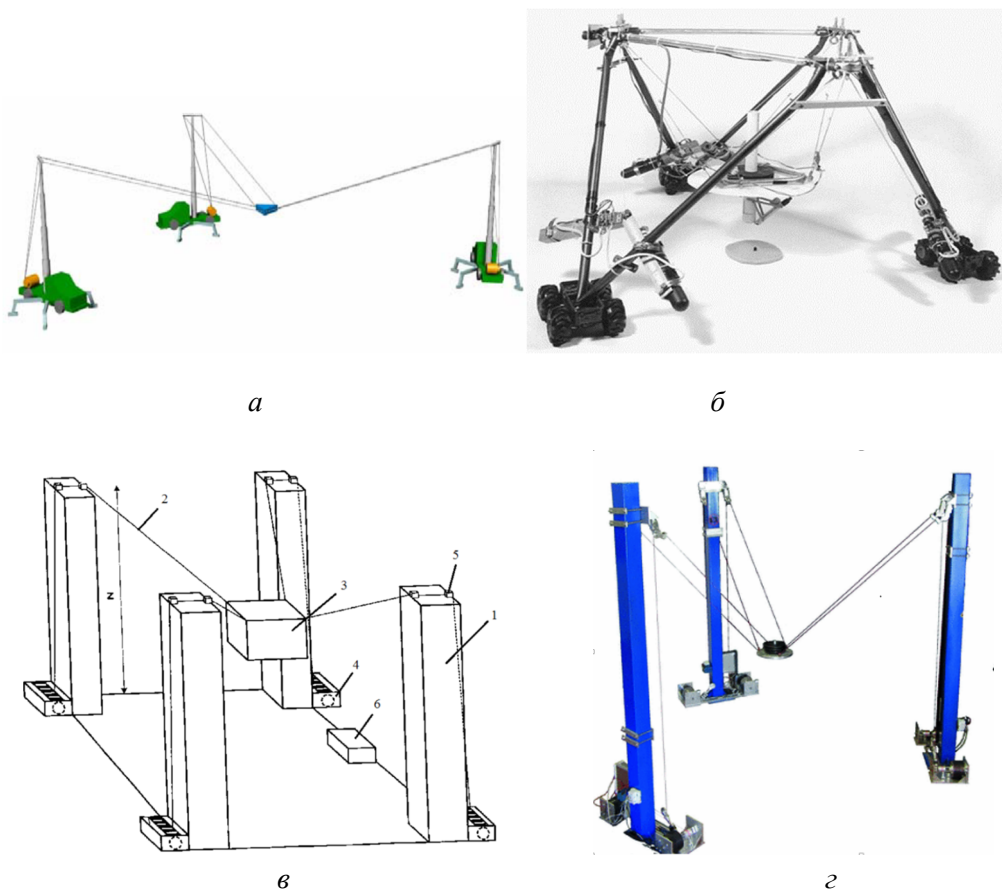


Рис. 7. Классификация кабельных роботов по виду основания:
 а, б – подвижное основание; в, г – фиксированное основание

Обычный кабельный робот имеет фиксированную разводку кабелей, то есть фиксированные точки выхода и конфигурацию кабелей. Эта структура может ограничивать размер рабочего пространства манипулятора из-за столкновений кабелей. Манипуляторы с подвижными выходными и опорными точками известны как реконфигурируемые кабельные роботы. Таким образом, изменяя расположение кабелей, следует избегать столкновений между кабелями и окружающей средой. В то же время, некоторые характеристики робота могут быть улучшены: увеличение жесткости, увеличение полезной нагрузки или уменьшение натяжения кабеля. Также модификация точек крепления кабеля приводит к увеличению размеров рабочего пространства. Однако для большинства существующих реконфигурируемых кабельных роботов реконфигурируемость выполняется либо дискретно, либо вручную, либо непрерывно, но с громоздкими реконфигурируемыми системами [20].

Кабельные роботы применяются в следующих областях:

1. Сборка крупногабаритных изделий. При подгоне и соединении двух массивных деталей используется мостовой кран или мобильный кран. Так как эта операция ответственная, то она должна выполняться с максимальной точностью.

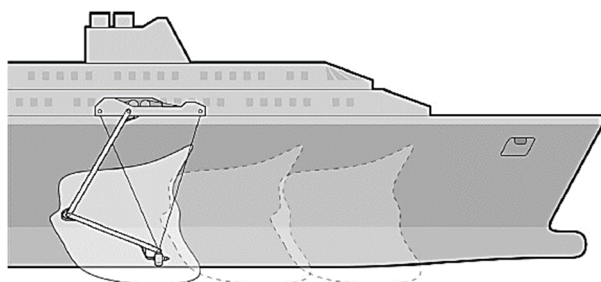
Сложность позиционирования приводит к необходимости многократных подъемов, опусканий, подстукиваний и т.д. как при сборке деталей, так и в случае их разборки. В качестве решения данной задачи можно привести кабельную платформу (рис. 8) Aerial Multi-access Platform (AMP) компании Materials Handling Solutions (США).



Рис. 8. Кабельный робот AMP для сборки крупногабаритных изделий позиционирует крыло самолета при сочленении с фюзеляжем

2. Окраска крупногабаритных изделий. Роботизированные манипуляторы давно успешно

применяются при окраске различных изделий. Однако, габариты окрашиваемой детали ограничены сравнительно небольшой рабочей областью манипулятора. Использование же кабельных роботов с их большим рабочим пространством позволяет окрашивать крупногабаритные объекты,



такие как: корпуса судов, фюзеляжи самолетов, фасады зданий и т.д. Шасси робота может перемещаться по всей длине судна по мере того, как манипулятор окрасит поверхность (рис. 9), содержащуюся в его локальном рабочем пространстве.

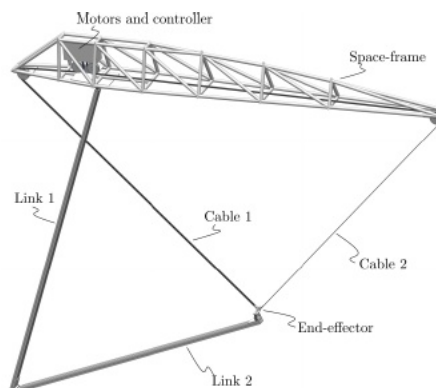


Рис. 9. Окрасочный процесс борта судна подвесным манипулятором с кабельными элементами

3. 3D-печать больших предметов. Производство крупномасштабных 3D-принтеров все еще является относительно новой областью исследований. Основным применением крупномасштабных 3D-принтеров является автоматизация строительства: способность быстро создавать объекты размером со здание при малом или вообще без ручного вмешательства. Рассмотрим крупномасштабный 3D-принтер, в котором для позиционирования используется кабельный робот с шестью степенями свободы. Шесть лебедок намотки кабелей закреплены в углах шестигранника в верхней плоскости, и шестигранная призма рабочего пространства (рис. 10). Кабельная система позиционирования обеспечивает большие диапазоны движения, а также менее дорогостоящая, более легкая, по сравнению с порталной системой, традиционно используемой в 3D-печати.

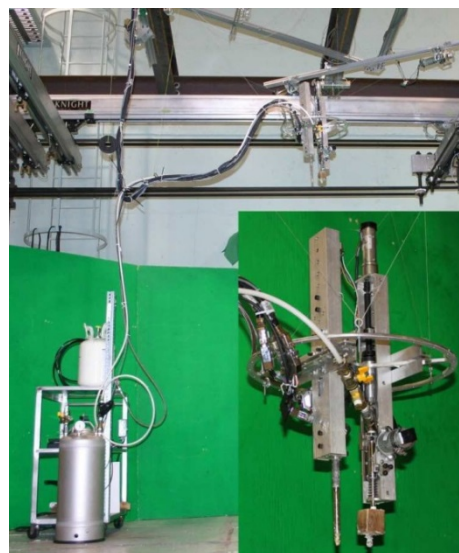


Рис. 10. Схема кабельного робота для 3D печати

4. Симуляторы движения. Симуляторы движения на основе виртуальной реальности доказали свою эффективность при обучении различным профессиям. Симулятор CableRobot (рис. 11), представляет собой кабели и лебедки для приведения в действие вместо жестких связей, традиционно используемых в конфигурации гексапода. Этот подход позволяет уменьшить перемещаемую массу, значительно увеличить рабочее пространство и обеспечивает большую гибкость для переключения между конфигурациями системы, в которых робот может работать. Особенностью проектирования кабельных роботов для симуляции движения является фокусировка на ускорении, а не на точности позиционирования.

5. Экзоскелеты для реабилитации. Реабилитационные робототехнические устройства активно изучаются для оказания помощи больным с ослабленными вследствие старения, заболеваний или травм конечностями. Современные роботизированные реабилитационные устройства для верхней конечности часто можно классифицировать на две категории: устройства с конечным эффектором, с которыми субъекты взаимодействуют, используя ручку на конце; и экзоскелетные устройства с жесткими звеньями, присоединенными к верхней конечности, и имеющие подвижность в суставах.

В последние годы были предложены легкие конструкции экзоскелетов для плеча на основе кабельных роботов, в которых жесткие звенья заменены легкими манжетами, прикрепленными к

подвижным сегментам человеческой руки. Кабели, приводимые в действие двигателями, проходят через эти манжеты для перемещения сегментов конечности. Учеными Колумбийского

университета (США) разработана конструкция кабельного экзоскелета CAREX (рис. 12) (Cable-driven ARm EXoskeleton).

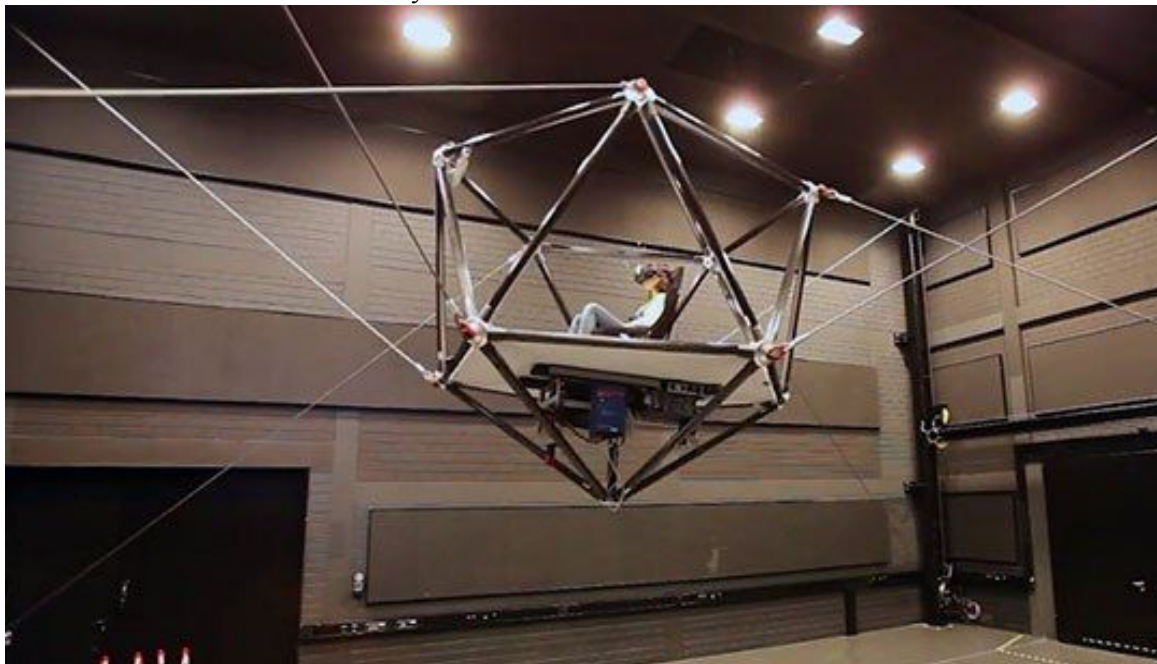


Рис. 11. Кабина кабельного симулятора

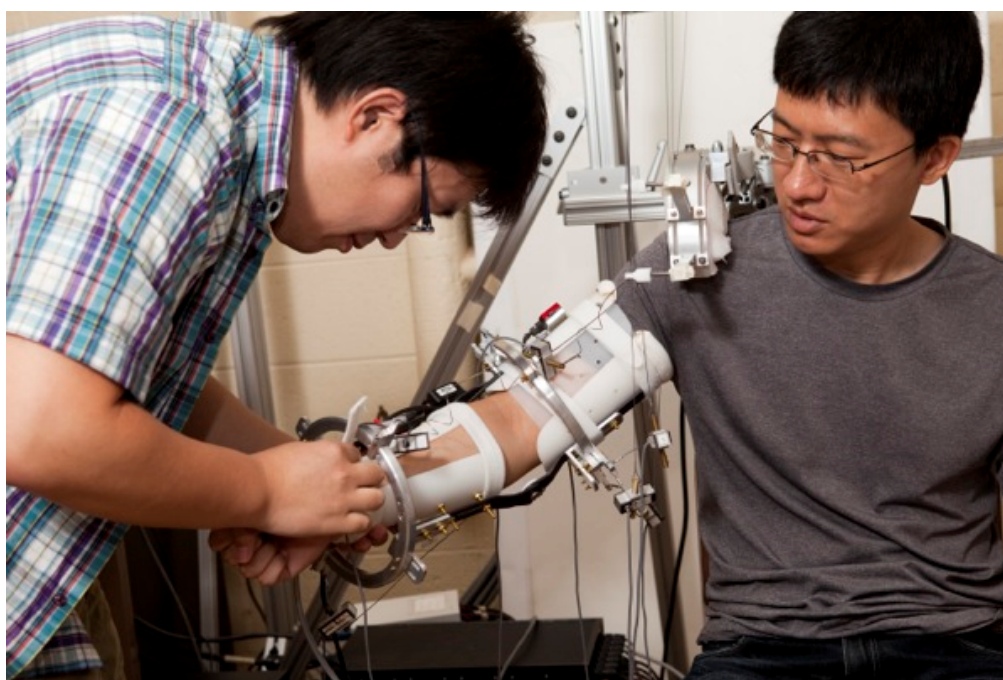


Рис. 12. Модель экзоскелета руки CAREX

6. Для операций складирования наиболее оптимальной структурой кабельного робота является манипулятор, представленный на рис. 13. Устройство перемещения грузов работает следующим образом. При вращении электродвигателей с устройствами для укладки кабелей и редукторами 1, 2, 3, 4, угловое положение валов которых задается устройством управления 5, происходит изменение длины кабелей 10, 11, 12, 13, поддерживаемых роликами 14, 15, 16, 17, распо-

ложенными на опорных башнях 6, 7, 8, 9 и телескопического звена 18 с захватным устройством 19, в результате чего захватное устройство 19 перемещается в нужную точку пространства. При этом предполагается, что горизонтальное перемещение захватного устройства 19 осуществляется за счет изменения длины кабелей 10, 11, 12, 13, а вертикальное перемещение осуществляется совокупностью изменения длин кабелей 10, 11, 12, 13 и телескопического звена 18, что обеспечивается устройством управления 5.

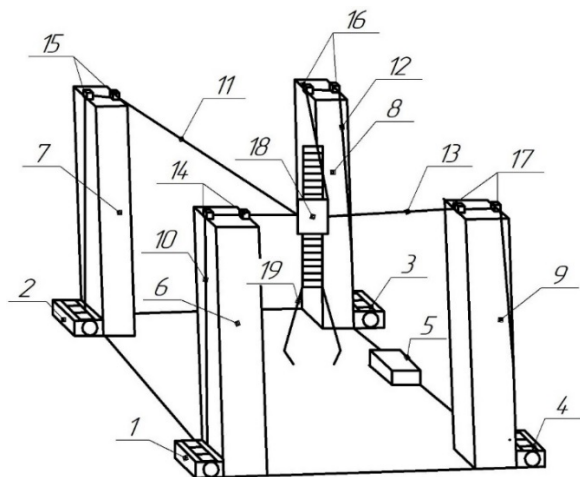


Рис. 13. Устройство перемещения грузов

Выводы. Хотя идея кабельной робототехники рассматривается только на протяжении нескольких десятилетий, она становится все более популярной. Все еще остается очень большой потенциал для разработки новых применений и конструкций для этого типа роботов. Остается много областей, открытых для теоретических исследований, хотя многие теоретические основы были заложены. Самая очевидная область исследований – управление. Как отметили некоторые исследователи, все еще нет надежных алгоритмов управления в реальном времени. Это делает большие или быстрые кабельные роботы несколько неустойчивыми. Кроме того, нуждаются в большем изучении и компенсации различных внешних факторов в динамике и управлении. Хотя тема рабочего пространства изучалась многими исследователями, по-прежнему существует необходимость в проведении работы по оптимизации рабочей области для различных применений этих устройств. Другие открытые области работы – поиск и использование всех преимуществ, предлагаемых кабельными устройствами. Например, гибкие связи позволяют продолжать использование механизма во время определенных столкновений, что было бы невозможно при использовании жестких параллельных роботов.

В отношении, как теоретических исследований, так и практического применения, понятно, что, несмотря на всю работу, которая была проделана, многое еще нужно сделать для того, чтобы реализовать весь потенциал этого типа роботизированных систем.

Источник финансирования. РФФИ, грант № 18-31-20060.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Merlet J.-P., *Parallel Robots*, 2nd ed. Springer. 2007. Pp. 3–16.

2. Рыбак Л.А., Мамаев Ю.А., Мальшев Д.И., Виравян Л.Г. Программный модуль для реализации заданной траектории движения выходного звена робота-гексапода для 3D печати изделий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. №8. С. 155–164.

3. Kong H., Gosselin C.M., *Type Synthesis of Parallel Mechanisms* // Springer, 2007. Pp. 272–280.

4. Рыбак Л.А., Ержуков В.В., Чичварин А.В. Эффективные методы решения задач кинематики и динамики робота-станка параллельной структуры. ФИЗМАТЛИТ. 2011. 148 с.

5. Roberts R., Graham T., Lippitt T. On the inverse kinematics, statics, and fault tolerance of cable-suspended robots. // *Journal Field Robotics*. 1998. 15 (10). Pp. 581–597.

6. Merlet J.P. Daney D.A. A portable, modular parallel wire crane for rescue operations // *Robotics and Automation (ICRA)*. 2010 IEEE International Conference. 2010. Pp. 2834–2839.

7. Gosselin C. Global Planning of Dynamically Feasible Trajectories for Three-DOF Spatial Cable-Suspended Parallel Robots, in *Cable-Driven Parallel Robots*, T. Bruckmann and A. Pott, Eds., ed Berlin, Heidelberg // Springer Berlin Heidelberg, 2013. Pp. 3–22.

8. Duan Q.J., Xuechao D. Workspace Classification and Quantification Calculations of Cable-Driven Parallel Robots. // *Advances in Mechanical Engineering (Hindawi Publishing Corporation)*. 2014. Pp. 1–9. doi: 10.1155/2014/358727

9. Валюкевич Ю.А., Алепко А. В. Моделирование статической нагрузки на элементы конструкции и оценка энергоэффективности манипулятора с гибкими звеньями // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2012. №3 (162). С. 21–25.

10. Валюкевич Ю.А., Алепко А.В., Дубовсков В.В., Яковенко Д.М. Определение диапазона динамической управляемости манипулятора с гибкими связями // *Современные проблемы науки и образования*. 2012. № 3. С. 28–32.

11. Валюкевич Ю.А., Алепко А.В. Планирование траектории перемещения манипулятора с подвесом схвата на гибких звеньях (часть 1) // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2011. № 6 (159). С. 12–15.

12. Пат. 2372274 Российская Федерация, МПК В66С 21/00. Устройство перемещения грузов. / Ю.А. Валюкевич, А.А. Зеленский, О.Г. Толстунов, И.И. Наумов: заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО "ЮРГУЭС. № 2008110304; заявл. 17.03.2008; опубл. 10.11.2009, Бюл. № 31. 4 с.

13. Borgstrom P.H., Borgstrom N.P., Stealey M.J., Jordan B., Sukhatme G.S., Batalin M., Kaiser W. Generation of energy-efficient trajectories for

nims3d, a three-dimensional cabled robot // To Appear: IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2008. Pp. 325–339.

14. Borgstrom P.H., Stealey M., Batalin M., Kaiser W. Nims3d: A novel rapidly deployable robot for 3-dimensional applications // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2006. Pp. 3628–3635.

15. Валюкевич Ю.А., Козырев П.П., Нуждяк А.В., Сербул Г.Г. Кинематика манипуляторов параллельной структуры с гибкими звеньями // Вестник современных исследований. 2018. 4.2 (19). С. 207–213.

16. Duan Q.J., Xuechao D. Workspace Classification and Quantification Calculations of Cable-Driven Parallel Robots // Advances in Mechanical Engineering. Vol. 2014, Article ID 358727. Pp. 1–9. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/358727>

17. Donald B., Garipey L., Rus D. Distributed manipulation of multiple objects using ropes // Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA '00. IEEE International Conference on. 2000. Vol. 1. Pp. 450–457.

18. Cheng P., Fink J., Kumar V., Pang J.-S. Cooperative towing with multiple robots // ASME Journal of Mechanisms and Robotics. 2009. Vol. 1. № 1. Pp. 101–118.

19. Michael N., Fink J., Kumar V. Cooperative manipulation and transportation with aerial robots // Robotics: Science and Systems. 2009. Vol. Pp. 1–8.

20. Lorenzo R., Caro G.S., Gouttefarde M., Girin A.A. Reconfiguration Strategy for Reconfigurable Cable-Driven Parallel // 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) Washington State Convention Center Seattle, Washington. 2015. Pp. 1613–1620.

Информация об авторах

Гапоненко Елена Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения. E-mail: gaponenkobel@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Рыбак Лариса Александровна, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения. E-mail: rl_bgtu@intbel.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Холошевская Людмила Романовна, студент кафедры технологии машиностроения. E-mail: mila.kholoshevskaya@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в мае 2019 г.

© Гапоненко Е.В., Рыбак Л.А., Холошевская Л.Р., 2019

***Gaponenko E.V., Rybak L.A., Kholoshevskaya L.R.**

¹Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46

*E-mail: gaponenkobel@gmail.com

STRUCTURAL ANALYSIS AND CLASSIFICATION OF ROBOTIC SYSTEMS WITH DRIVING MECHANISMS ON THE BASIS OF CABLE ELEMENTS

Abstract. *The mechanisms of the parallel structure are very diverse. Cable-driven robots that use cables instead of retractable rods to control the position of the output link are of particular interest. They have several advantages, such as large workspace, easy assembly, and disassembly, high mobility, but also there are disadvantages associated with controlling the movement of robot cables. The paper gives examples of some of the first cable robots, their purpose, and application. The article also considers Russian and foreign scientists who deal with these issues and analyzes their work. As a result of the structural analysis, the classification of cable robots is compiled and considered in detail: by the method of placing the reels, by the DOF number of the working body and the number of flexible links, by the application method, by the type of base, by the method of cable fastening. The cable robot structure for the movement of goods is given. However, there are still many areas open to theoretical research. In conclusion, the topics that need more research are considered. The most obvious area of research is control, also optimizing the workspace for different applications of these devices, finding and take advantage of all the benefits offered by cable devices.*

Keywords: *cable-driven robots, cables, output link, structural analysis.*

REFERENCES

1. Merlet J.-P., *Parallel Robots*, 2nd ed. Springer, 2007. Pp. 3–16.
2. Rybak L.A., Mamaev Y.A., Malyshev D.I., Virabyan L.G. Software module for implementing a predetermined path of movement of the output link of the robot hexapod, for 3D printing products [Programmnyj modul' dlya realizacii zadannoj traektorii dvizheniya vyhodnogo zvena robota-geksapoda dlya 3D pechati izdelij]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2016. No. 8. Pp. 155–164. (rus)
3. Kong H., Gosselin C.M. *Type Synthesis of Parallel Mechanisms*. Springer, 2007. Pp. 272–280.
4. Rybak L.A., Ergakov V.V., Chichvarin A.V. Effective methods for solving problems of kinematics and dynamics of robot-machine parallel structures [Effektivnye metody resheniya zadach kinematiki i dinamiki robota-stanka paralel'noj struktury]. *FIZMATLIT*. 2011. Pp. 148. (rus)
5. Roberts R., Graham T., and Lippitt T. On the inverse kinematics, statics, and fault tolerance of cable-suspended robots. *Journal Field Robotics*. 1998. 15 (10): Pp. 581–597.
6. Merlet J.P. Daney D.A. A portable, modular parallel wire crane for rescue operations. *Robotics and Automation (ICRA)*. 2010. IEEE International Conference on 2010. Pp. 2834–2839.
7. Gosselin C. "Global Planning of Dynamically Feasible Trajectories for Three-DOF Spatial Cable-Suspended Parallel Robots", T. Bruckmann and A. Pott, Eds., ed Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg. 2013. Pp. 3–22.
8. Duan Q.J., Xuechao D. Workspace Classification and Quantification Calculations of Cable-Driven Parallel Robots. *Advances in Mechanical Engineering (Hindawi Publishing Corporation)*. 2014. Pp. 1–9. doi: 10.1155/2014/358727
9. Walukiewicz J.A., Aleph A.V. Modeling of static loads on structural elements and assessment of energy efficiency of a manipulator with flexible links. *News of higher educational institutions [Modelirovanie staticheskoj nagruzki na elementy konstrukcii i ocenka energoeffektivnosti manipulyatora s gibkimi zven'yami]*. North Caucasus region. *Technical science*. 2012. No. 3 (162). Pp. 21–25.
10. Walukiewicz J.A., Aleph A.V., Dubovsky V.V., Yakovenko D.M. Determination of the range of dynamic controllability of a manipulator with flexible links [Opredelenie diapazona dinamicheskoy upravlyaemosti manipulyatora s gibkimi svyazyam]. *Modern problems of science and education*. 2012. No. 3. Pp. 28–32. (rus)
11. Walukiewicz J.A., Aleph A.V. Trajectory Planning of the manipulator with the suspension grip on flexible links (part 1). *News of higher educational institutions [Planirovanie traektorii peremeshcheniya manipulyatora s podvesom skhvata na gibkih zven'yah (Chast' 1)]*. North Caucasus region. *Technical science*. Novocherkask. 2011. No. 6 (159). Pp. 12–15. (rus)
12. Valukevich Y.Y., Zelensky A. A., Tolstunov O.G., Naumov I. I. Device for the movement of goods. Patent RF, No 2008110304, 2009 (rus)
13. Borgstrom P.H., Borgstrom N.P., Stealey M.J., Jordan B., Sukhatme G.S., Batalin M., Kaiser W. Generation of energy-efficient trajectories for nims3d, a three-dimensional cabled robot. To Appear: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2008. Pp. 325–339
14. Borgstrom P.H., Stealey M., Batalin M., Kaiser W. Nims3d: A novel rapidly deployable robot for 3-dimensional applications. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, October 2006. Pp. 3628–3635
15. Walukiewicz Y.A., Kozyrev P.P., Nordac A.V., Scientific G.G. Kinematics of manipulators parallel structures with flexible links [Kinematika manipulyatorov paralel'noj struktury s gibkimi zven'yami]. *Bulletin of modern research*. 2018. 4.2. (19). Pp. 207–213.
16. Duan Q.J., Xuechao D. Workspace Classification and Quantification Calculations of Cable-Driven Parallel Robots // *Advances in Mechanical Engineering*. Vol. 2014, Article ID 358727. Pp. 1–9. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/358727>
17. Donald B., Garipey L., Rus D. Distributed manipulation of multiple objects using ropes *Robotics and Automation*. 2000. *Proceedings. ICRA '00. IEEE International Conference on*. 2000. Vol. 1. Pp. 450–457.
18. Cheng P., Fink J., Kumar V., Pang J.-S. Cooperative towing with multiple robots, *ASME Journal of Mechanisms and Robotics*. February 2009. Vol. 1. No. 1. Pp. 101–118.
19. Michael N., Fink J., Kumar V. Cooperative manipulation and transportation with aerial robots” *Robotics: Science and Systems*. 2009. Vol. Pp. 1–8.
20. Lorenzo R. Caro G.S., Gouttefarde M. and Girin A. A Reconfiguration Strategy for Reconfigurable Cable-Driven Parallel. 2015 *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* Washington State Convention Center Seattle, Washington. May 26-30. 2015. Pp. 1613–1620.

Information about the authors

Gaponenko, Elena V. PhD, Assistant professor. E-mail: gaponenkobel@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Rybak, Larisa A. DSc, Professor. E-mail: rl_bgtu@intbel.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Kholoshevskaya, Lyudmila R. Bachelor student. E-mail: mila.kholoshevskaya@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received in May 2019

Для цитирования:

Гапоненко Е.В., Рыбак Л.А., Холошевская Л.Р. Структурный анализ и классификация роботизированных систем с приводными механизмами на основе кабельных элементов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 9. С. 126–136. DOI: 10.34031/article_5da4652c1400a3.95219452

For citation:

Gaponenko E.V., Rybak L.A., Kholoshevskaya L.R. Structural analysis and classification of robotic systems with driving mechanisms on the basis of cable elements. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 9. Pp. 126–136. DOI: 10.34031/article_5da4652c1400a3.95219452