УДК 621.01 DOI: 10.17587/mau.23.515-522

Е. А. Марчук[1], аспирант, e.marchuk@innopolis.ru, **Я. В. Калинин**[1], канд. техн. наук, доц., jkv83@mail.ru,
А. В. Малолетов[1,2], д-р физ.-мат. наук, проф., a.maloletov@innopolis.ru,
[1]Центр технологий компонентов робототехники и мехатроники, Университет Иннополис, г. Иннополис,
[2]Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград

Компенсация отклонений мобильной платформы параллельного тросового робота по силам натяжения тросов*

Параллельные тросовые роботы обладают простотой конструкции и возможностью масштабируемости. Вместе с тем параллельные тросовые роботы сложны в проектировании в силу специфики определения области рабочего пространства тросового робота, проблемы столкновения тросов, а также геометрической и конструктивной нелинейности в математических моделях основных элементов робота. В настоящей работе рассматривается проблема исключения неопределенности, связанной с деформациями несущих элементов конструкции робота. Выбирается такая конфигурация тросовой системы, при которой точки схода некоторых тросов можно считать не отклоняющимися от заданного положения. Тросовая система крупногабаритного робота монтируется на несущих башнях. Отклонение точек схода верхних тросов, расположенных в верхней части башен, становится существенным вследствие значительной деформации верхней части башен. Деформацию башен в средней части можно считать незначительной, поэтому точки схода нижних тросов, расположенных не выше середины башни, можно считать соответствующими заданному положению. Ставится задача компенсации отклонения от заданного положения центра масс мобильной платформы тросового робота вследствие деформаций тросов и несущих башен. Также ставится задача компенсации отклонения в ориентации мобильной платформы. Обе задачи подразумевают неопределенность в отношении координат точек схода верхних тросов. Деформации тросов определяются из закона Гука с использованием датчиков сил натяжения тросов. Задача компенсации отклонений решается в два этапа. На первом этапе находится приближенное значение отклонения центра масс мобильной платформы по вертикальной координате, которая определяется как высота усеченной пирамиды, ребра которой образованы деформированными нижними тросами. На втором этапе определяются отклонения ориентации мобильной платформы и с использованием матрицы поворотов находятся отклонения по высоте точек крепления тросов в подвижной системе координат. В рассмотренных примерах используется ПИД регулирование, однако более совершенные методы автоматического управления, например, оптимальное регулирование, могут обеспечить лучшие результаты. Задачи рассматриваются на примере параллельного симметричного восьмитросового робота.

Ключевые слова: *тросовый робот, отклонения, положение, ориентация, односторонняя связь*

Параллельные тросовые роботы сочетают в себе простоту тросовых подъемных механизмов и эффективность современных систем автоматического управления. Устройство современных параллельных тросовых роботов во многом аналогично механизмам кабельных кранов, которые широко используются с конца XIX века [1]. Более того, подъемные механизмы, такие как лебедки, были хорошо известны в античном мире, и их конструкция не претерпела существенных изменений вплоть до наших дней [2]. Механизмы из прошлого отличаются от современных, главным образом, типом используемых источников энергии и отсутствием автоматического управления. Традиционные китайские и корейские подъемные краны, известные по гравюрам и описаниям XVII—XVIII веков, представляют собой механизмы с тросовым приводом, аналогичные современным тросовым роботам [3, 4]. Отличие от современных тросовых систем с электроприводом и автоматическим управлением состоит лишь в том, что приводились они в движение мускульной силой людей под руководством опытного человека.

Параллельные тросовые роботы стали использоваться в широком спектре практических задач только с начала XXI века. Одно из первых исследований параллельных роботизированных систем с тросовым приводом появилось в 80-х годах XX века [5]. В качестве

*Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант 22-29-01618).

практического примера можно привести платформу Стюарта с тросовым приводом, которая использовалась для стабилизации крана морской платформы NIST Robocrane [6]. Начиная с 90-х годов XX века, были изготовлены многочисленные экспериментальные образцы параллельных тросовых роботов. Наиболее известными из них являются описанные в научных статьях и отчетах: FALCON, WARP, SEGESTA, IPANEMA, CableBOT, CoGiRo [7—12]. Параллельные тросовые роботы различаются особенностями механики (например, числом степеней свободы), управлением (например, оптимальное или нечеткое), эксплуатационными характеристиками (скорость и ускорение мобильной платформы), способностью перевозить полезную нагрузку различной массы, с разными линейными размерами (десятки сантиметров и десятки метров) и так далее [13].

Моделирование движения мобильной платформы как твердого тела описывается выражением

$$M\ddot{q} + D\dot{q} + g_c = -w_p + A^{\mathrm{T}} f, \qquad (1)$$

где M — матрица масс; D — матрица затухания; q — вектор обобщенных координат; g_c — фактор воздействия центростремительной и кориолисовой сил; w_p — динамический винт внешних сил; A^{T} — транспонированная матрица Якоби, представляющая собой матрицу смежности, которая связывает пространство обобщенных координат приводов и пространство обобщенных координат рабочего инструмента; f — вектор сил натяжений в тросах.

При использовании методов линейной алгебры необходимо знать точные координаты точек схода тросов с направляющих роликов на несущих башнях в неподвижной системе координат. Проблему представляет определение координат точек схода тросов с направляющих роликов с учетом деформаций башен. Представление башни как балки Эйлера—Бернулли с консольной заделкой при невысоких вычислительных затратах дает слишком грубое приближение, а более точное конечно-элементное представление башни или мачты предполагает высокие вычислительные затраты. В инженерных расчетах тросов наиболее распространено моделирование деформаций в соответствии с теорией тяжелой гибкой нити [14, 15]. Конечно-элементное представление тросов также используется в некоторых инженерных задачах, однако практически не применяется в моделировании тросовых роботов. В моделировании тросовых роботов часто используются более простые способы представления тросов, например, как эластичных стержней с включением условия односторонней связи [16, 17]. Наиболее полные описания принципов устройства параллельных тросовых роботов, а также методики их проектирования приведены в работах [18, 19].

Проблема деформации элементов тросового робота

В процессе работы параллельного тросового робота в силу деформаций как самих тросов, так и несущих элементов возникают отклонения мобильной платформы от заданного положения. При небольших линейных размерах робота, порядка нескольких метров, несущая конструкция может выполняться в виде пространственного многогранника, обладающего достаточной жесткостью. В таком случае деформации несущих элементов можно считать несущественными. Также при относительно небольшой массе полезной нагрузки на мобильной платформе (порядка нескольких килограммов) деформации тросов могут считаться пренебрежимо малыми. Скорости и ускорения центра масс мобильной платформы параллельных тросовых роботов при движении в большинстве практических задач невелики и, как правило, не превышают 1 м/с и 1 м/с^2 соответственно. При проектировании крупногабаритных параллельных тросовых роботов с линейными размерами порядка десятков метров и полезной нагрузке порядка нескольких сотен или тысяч килограмм несущая конструкция может выполняться в виде башен или мачт (рис. 1, см. третью сторону обложки). Отклонения верхней части башни или мачты в силу деформаций под воздействием изгибающих нагрузок становятся значительными. В случае жесткой несущей конструкции отклонение мобильной платформы от заданного положения обусловлено только деформацией тросов и может быть с достаточной точностью определено из закона Гука по показаниям датчиков сил натяжения тросов.

В случаях использования в конструкции робота башен или мачт точное отклонение точки схода троса в верхней части опоры определить затруднительно. К деформации троса

добавляется неизвестная величина, вызванная отклонением точки схода троса. Появляется фактор неопределенности. Определить точное положение мобильной платформы робота исходя только из показаний датчиков сил натяжения тросов и, соответственно, длин тросов становится невозможно. Для определения положения мобильной платформы робота в неподвижной системе координат могут использоваться методы непосредственного измерения положения, такие как: оптические устройства (лазерный дальномер, лазерный трекер), радиопеленг, эхолокация, компьютерное зрение [20, 21]. Перечисленные методы показывают хорошие результаты в лабораторных условиях, однако не всегда подходят для использования в промышленной робототехнике. К примеру, одним из перспективных направлений применения крупногабаритных параллельных тросовых роботов является использование их в качестве основы строительного 3D-принтера. В условиях строительной площадки из-за наличия загрязнений постоянное использование оптических датчиков и компьютерного зрения видится затруднительным, а использование прочих высокоточных измерительных средств представляется экономически необоснованным.

Заметим, что значение отклонения точки схода троса от заданного положения на уровне не выше середины высоты башни или мачты вследствие деформации существенно меньше, чем отклонение точки схода троса на вершине башни или мачты. В таком случае точки схода нижних тросов можно считать находящимися в заданном положении, и при определенной конфигурации тросовой системы становится возможным приближенное определение отклонения центра масс мобильной платформы по вертикальной координате на основании показаний датчиков сил натяжения только нижних тросов.

Ставится задача управления положением мобильной платформы параллельного тросового робота с помощью обратной связи, построенной на базе датчиков усилий в тросах и наклона тросов относительно платформы, без применения средств измерения координат платформы. В исследовании рассматривается двухэтапный метод компенсации вертикальных отклонений мобильной платформы параллельного тросового робота от заданного программного движения.

Описание расчетной модели тросового робота

Рассматривается тросовая система, в которой направляющие ролики нижних тросов закреплены на подвижных каретках, перемещающихся вертикально вдоль опор, и система управления обеспечивает согласованное перемещение кареток таким образом, чтобы точки схода всех четырех нижних тросов образовывали горизонтальную плоскость на высоте желаемого положения мобильной платформы.

На мобильной платформе тросы закреплены таким образом, что верхние тросы крепятся к верхней части платформы, а нижние — к нижней. Такая конфигурация тросов при заданной ориентации мобильной платформы с нулевыми углами Эйлера гарантированно исключает проблему столкновения тросов в процессе перемещения платформы в рабочем пространстве робота.

При этом платформа фактически висит на верхних тросах, длины которых обеспечивают управление положением платформы, в то время как нижние тросы обеспечивают только сохранение ориентации платформы.

Для обозначенной конфигурации тросовой системы робота и ориентации мобильной платформы ее положение в случае нерастяжимых тросов однозначно определяется длинами четырех нижних тросов, лежащих в одной плоскости. При рассмотрении задачи с учетом растяжимости тросов однозначность теряется, и могут иметь место два симметричных случая: центр масс платформы находится выше или ниже уровня заданного положения. Следует заметить, что в случае высоконагруженного тросового робота допустимо считать тросы растяжимыми стержнями. Принимается, что полезная нагрузка обеспечивает сильное натяжение тросов, и, таким образом, исключается геометрическая нелинейность тросов. Условие конструктивной нелинейности тросов сохраняется.

В таком случае для определения положения центра масс мобильной платформы робота необходимо оборудовать четыре нижних троса датчиками натяжения и датчиками угла наклона. Датчики натяжения тросов позволяют найти удлинение каждого троса из закона Гука. Датчики угла наклона тросов позволяют определить восходящее или нисходящее направление тросов. Таким образом, для решения поставленной задачи робот должен быть оборудован датчиками натяжения нижних

тросов, датчиками угла наклона нижних тросов, а также гироскопом, определяющим ориентацию мобильной платформы.

Линейные размеры робота в расчетной модели составляют 15...20 м. Тросы из высокомолекулярного полиэтилена Dayneema имеют площадь поперечного сечения $1{,}13\cdot10^{-4}$ м^2. Отклонения точек схода верхних тросов от заданного положения заданы произвольным образом и изменяются в диапазоне $1...3{,}5\cdot10^{-2}$ м. По истечении первых 60 с, в течение которых происходит затухание колебаний твердого тела, закрепленного на тросовой системе и лишенного опоры, начинается движение по заданной траектории. Мобильная платформа робота движется по пространственной криволинейной траектории со скоростью не более 0,15 м/с. Масса мобильной платформы с полезной нагрузкой составляет 1200 кг.

Компенсация отклонения по высоте

Первый этап решения задачи предполагает вывод центра масс мобильной платформы на заданный уровень высоты. В процессе движения платформа отклоняется от заданного желаемого уровня (рис. 2), причем отклонение может произойти как вниз, если верхние тросы будут длиннее требуемого, так и вверх, если верхние тросы окажутся короче требуемого. В этом случае четыре нижних троса образуют боковые ребра усеченной пирамиды, большее основание которой образовано точками схода нижних тросов, а меньшее основание образовано точками крепления тросов к платформе. В общем случае основания усеченной пирамиды могут быть произвольными четырехугольниками, но, не теряя общности, можно ограничиться рассмотрением прямоугольных оснований со сторонами a, b и c, d.

Строго говоря, после деформации тросов получается неправильная усеченная пирамида, а ее боковые грани являются выпуклыми четырехугольниками. Однако с учетом относительно небольшого удлинения тросов отклонениями платформы от заданной ориентации можно пренебречь и считать боковые грани трапециями.

Для определения отклонения центра платформы по высоте от уровня желаемого положения решается следующая геометрическая задача. Сначала, полагая длины тросов известными, определяются высоты трапеций двух любых противоположных боковых граней усеченной пирамиды:

$$h_1 = \sqrt{l_4^{*2} - \left(\frac{(d-a)^2 + l_4^{*2} - l_1^{*2}}{2(d-a)}\right)^2}; \qquad (2)$$

$$h_2 = \sqrt{l_3^{*2} - \left(\frac{(d-a)^2 + l_3^{*2} - l_2^{*2}}{2(d-a)}\right)^2}, \qquad (3)$$

где $l_1^*, l_2^*, l_3^*, l_4^*$ — длины деформированных нижних тросов, определенные на основании показаний датчиков усилий и известных параметров тросов; a — расстояние между двумя соседними точками крепления нижних тросов к мобильной платформе; d — расстояние между двумя соседними точками схода нижних тросов с опорных башен.

Далее строится третья трапеция, так чтобы ее малое основание лежало в плоскости нижней грани мобильной платформы параллельно сторонам a, а боковые стороны были образованы найденными высотами рассмотренных выше трапеций. Тогда отклонение центра платформы по высоте от уровня программного положения определяется выражением

$$h = \sqrt{h_2^2 - \left(\frac{(c-b)^2 + h_2^2 - h_1^2}{2(c-b)}\right)^2}, \qquad (4)$$

где b — расстояние между двумя соседними точками крепления нижних тросов к мобильной платформе; c — расстояние между двумя соседними точками схода нижних тросов с опорных башен.

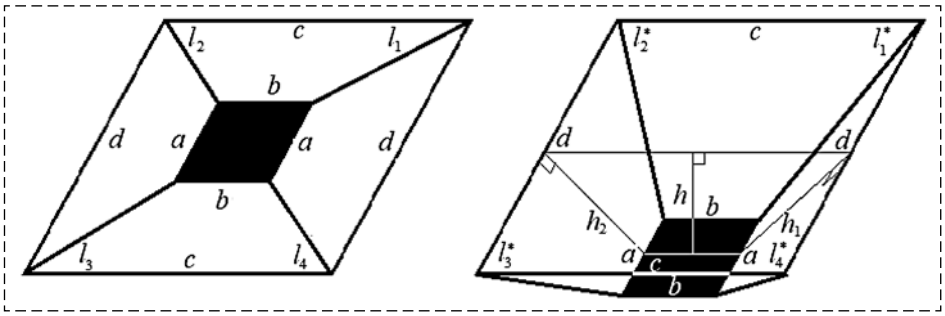

Рис. 2. Геометрия нижних тросов без нагрузки (плоскость) и под нагрузкой (усеченная пирамида)

Fig. 2. Geometry of lower cables without loading (plane) and with loading (frustum)

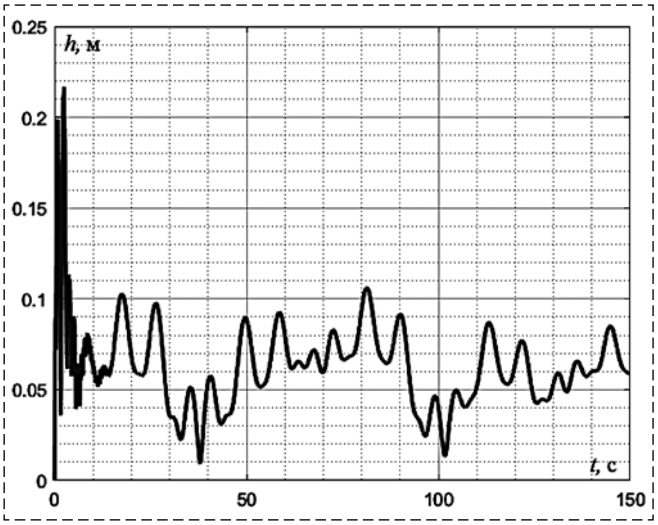

Рис. 3. Определение отклонения мобильной платформы по высоте от заданного программного движения. Первый этап
Fig. 3. Computation of height error. The first stage

Основным источником ошибок при определении отклонений таким способом в реальном роботе может стать шум в показаниях датчика усилий, на основании которых вычисляются длины тросов. Однако в теоретической модели предполагается, что шум в этих показаниях эффективно фильтруется. В качестве примера на рис. 3 показан результат численного моделирования при программном движении платформы по некоторой траектории в горизонтальной плоскости.

Найденное значение всегда неотрицательно, и для регулирования относительно нулевого уровня заданного положения необходимо определить знаки участков полученной кривой. Предлагается определять превышение или занижение относительно заданного уровня высоты центра масс платформы с использованием показаний датчиков угла наклона нижних тросов. Для определения знака можно использовать функцию sign. Тогда знак отклонения вычисляется согласно выражениям

$$\alpha = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i; \tag{5}$$

$$f(\alpha) = \operatorname{sign}(\alpha), \tag{6}$$

где α_i — угол наклона нижнего троса к горизонтальной плоскости.

Предложенный алгоритм определения знака функции h как знака алгебраической суммы углов работает достаточно адекватно. Недостатками является негладкость и неплавность функции sign. Предложенный способ оценки знака имеет нечувствительность к значениям отклонения, близким к нулю, что приводит к дребезгу на начальном этапе неустановившегося движения, для которого характерны высокочастотные колебания платформы. Однако это не является проблемой, так как в случае неустановившегося движения задача компенсации отклонений не актуальна.

В целях сглаживания функции знака вместо функции sign можно использовать сигмоидальную единичную ступенчатую функцию активации, в которой $\sigma(\alpha) \in (-1, 1)$:

$$\sigma(\alpha) = \frac{2}{1 + \mathbf{e}^{-k(\alpha - c)}} - 1, \tag{7}$$

где k, c — некоторые постоянные коэффициенты.

Результат моделирования приведен на рис. 4 (см. третью сторону обложки). Как можно видеть, предложенный алгоритм определения знака функции h как знака алгебраической суммы углов работает адекватно и с сигмоидальной функцией, которая обеспечивает гладкость полученной зависимости в установившемся режиме движения.

Окончательно значение отклонения по высоте с учетом знака определяется выражениями:

$$h = f(l_1^*, l_2^*, l_3^*, l_4^*); \tag{8}$$

$$\Delta h = h\sigma(\alpha). \tag{9}$$

Результат моделирования приведен на рис. 5 (см. третью сторону обложки). Полученные значения являются приближенными, поскольку значительные отклонения центра масс платформы в проекции на горизонтальную плоскость будут увеличивать погрешность определения уровня отклонения по высоте с использованием предложенного метода трапеций. Вместе с тем, по мере уменьшения значения отклонения в процессе регулирования погрешность будет уменьшаться (рис. 6, см. третью сторону обложки). Подтяжка верхних тросов на первом этапе может осуществляться, например, синхронным ПИД регулированием длин верхних тросов с минимизацией отклонения центра масс платформы по высоте от заданного уровня.

Предлагаемый метод может быть также обобщен на тросовые роботы с нисходящим направлением нижних тросов, а также с большим или меньшим числом тросов. Необходимым условием применимости метода является условие соответствия положения точек схода нижних тросов заданному положению. В подобных случаях

сначала следует определять высоту усеченной фигуры для заданного положения, затем высоту усеченной фигуры для деформированных тросов и после находить разность их высот. Алгоритм определения знака функции h как знака алгебраической суммы углов наклона нижних тросов также будет несколько отличаться, но без принципиальных изменений.

По результатам компьютерного моделирования предложенный метод в комбинации с ПИД регулированием обеспечивает погрешность отклонения по высоте не более $\pm 2{,}5 \cdot 10^{-3}$ м, при отклонении в отсутствие регулирования — до $-5 \cdot 10^{-2}$ м и сохраняющихся значениях отклонений в проекции на горизонтальную плоскость — до $\pm 5 \cdot 10^{-2}$ м (рис. 7 и 8, см. третью сторону обложки).

Компенсация отклонений ориентации

Второй этап задачи предполагает минимизацию отклонений ориентации твердого тела от заданных значений. Рассмотренный выше метод позволяет вывести центр масс тела на заданный уровень, почти не оказывая влияние на его ориентацию. Для управления ориентацией мобильной платформы тросового робота необходимо оборудовать платформу трехосевым гироскопом и с использованием матрицы поворотов найти вертикальную координату z_b^* каждой из точек крепления нижних тросов относительно подвижной системы координат:

$$\begin{bmatrix} x_b^* \\ y_b^* \\ z_b^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c(\psi)c(\varphi) + s(\psi)s(\theta)s(\varphi) & -c(\psi)s(\varphi) + s(\psi)s(\theta)c(\varphi) & s(\psi)c(\theta) \\ c(\theta)s(\varphi) & c(\theta)c(\varphi) & -s(\varphi) \\ -s(\psi)c(\varphi) + c(\psi)s(\theta)s(\varphi) & s(\psi)s(\varphi) + c(\psi)s(\theta)c(\varphi) & c(\psi)c(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где x_b, y_b, z_b — координаты i-й точки крепления нижнего троса к мобильной платформе робота; θ, ψ, φ — углы поворотов платформы; $c(\theta) = \cos(\theta)$, $s(\theta) = \sin(\theta)$ и т. д. В формуле (10) в качестве углов поворота использованы корабельные углы. Их применение оправданно тем, что такой набор углов не вырождается при сохранении горизонтальной ориентации платформы.

Подтяжка верхних тросов на втором этапе может осуществляться ПИД регулированием длины каждого из верхних тросов с минимизацией отклонения каждой точки крепления нижнего троса по высоте от заданного уровня в подвижной системе координат. Таким образом, нижняя плоскость мобильной платформы приводится к заданному горизонтальному положению. Повороты вокруг вертикальной оси платформы в данном примере не рассматриваются ввиду их малости и несущественности, что, в свою очередь, связано с выбранной конфигурацией тросовой системы.

По результатам компьютерного моделирования видно, что после применения компенсирующих воздействий отклонения в проекции на горизонтальную плоскость не превышают $\pm 2{,}5 \cdot 10^{-2}$ м. Погрешность отклонения по высоте составляет не более $\pm 2{,}5 \cdot 10^{-3}$ м после применения компенсирующего воздействия вместе с компенсацией отклонений ориентации. Для практического использования крупногабаритного параллельного тросового робота в качестве основы строительного 3D-принтера отклонения в горизонтальной плоскости в $\pm 2{,}5 \cdot 10^{-2}$ м и отклонения по вертикальной координате в $\pm 2{,}5 \cdot 10^{-3}$ м можно считать допустимыми.

В дальнейших исследованиях представляется предпочтительным введение системы оптимального регулирования вместо ПИД регуляторов. Также следует уделить внимание робастному управлению тросовой системой робота, поскольку стабильность управления тросовой системой является критически важной при промышленном использовании робота.

Список литературы

1. **Samset I.** Winch and cable systems. Springer Netherlands, 1985. 534 p.

2. **McNeil I.** An Encyclopaedia of the history of technology. Routledge, 1996. 1084 p.

3. **Kim P. W.** Scientific Disciplines of Geojunggi (the Traditional Crane) in Korean Science, Technology and History Class // EURASIA Journal of Mathematics Science and Technology Education. 2017. Iss. 13(9). P. 6147—6163.

4. **Gujin Tushu Jicheng.** Imperial Encyclopaedia — Manufacture. Vol. 800 (1700—1725). Taiwan, 1977. 121 p.

5. **Landsberger S. E.** Design and construction of a cable-controlled, parallel link manipulator. Massachusetts Institute of Technology, 1984.

6. **Albus J. S.** Cable arrangement and lifting platform for stabilized load lifting US Patent No. 4 883 184, Nov. 28, 1989.

7. **Kawamura S., Choe W., Tanaka S., Pandian S. R.** Development of an ultrahigh speed robot FALCON using wire drive system // Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1995. Vol. 1. P. 215—220.

8. **Maeda K., Tadokoro S., Takamori T., Hiller M, Verhoeven R.** On design of a redundant wire-driven parallel robot WARP manipulator // Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1999. Vol. 2. P. 895—900.

9. **Bruckmann T., Pott A., Hiller M.** Calculating force distributions for redundantly actuated tendon-based Stewart platforms // Advances in Robot Kinematics. 2006. P. 403—412.

10. **Pott A., M therich H., Kraus W., Schmidt V., Miermeister P., Verl A.** IPAnema: A family of Cable-Driven Parallel Robots for Industrial Applications // Cable-Driven Parallel Robots. Mechanisms and Machine Science. 2012. Vol. 12. P. 19—34.

11. **Rodriguez M.** Parallel Cable Robotics for Improving Maintenance and Logistics of Large-Scale Products. Tecnalia, 2013.

12. **Tempel P., Herve P., Tempier O., Gouttefarde M, Pott A.** Estimating inertial parameters of suspended cable-driven parallel robots — Use case on CoGiRo // 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2017. P. 6093—6098.

13. **Marchuk E., Kalinin Ya., Maloletov A.** Mathematical Modeling of Eight-Cable-Driven Parallel Robot // 2021 International Conference "Nonlinearity, Information and Robotics" (NIR). 2021. P. 1—5.

14. **Irvine. H. M.** Cable structures. The MIT Press, 1981. 259 p.

15. **Меркин Д. Р.** Введение в механику гибкой нити. М.: Наука, 1980. 240 с.

16. **Kalinin Ya.V., Marchuk E. A.** Specifity of Including of Structural Nonlinearity in Model of Dynamics of Cable-Driven Robot // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. Vol. 22, N. 10. 2021. P. 547—552.

17. **Maloletov A. V., Fadeev M. Y., Klimchik A. S.** Error Analysis in Solving the Inverse Problem of the Cable-Driven Parallel Underactuated Robot Kinematics and Methods for Their Elimination // IFAC-PapersOnLine. 9th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control, MIM 2019. 2019. P. 1156—1161.

18. **Pott A.** Cable-Driven Parallel Robots. Springer International Publishing, 2018. 465 p.

19. **Zi B., Qian S.** Design, Analysis and Control of Cable-Suspended Parallel Robots and Its Applications. Springer Singapore, 2017. 299 p.

20. **Boby R. A., Maloletov A., Klimchik A.** Measurement of End-effector Pose Errors and the Cable Profile of Cable-Driven Robot using Monocular Camera // Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications. 2021. Iss. 103 (2). P. 32.

21. **Akhmetzyanov A., Rassabin M., Maloletov A., Fadeev M., Klimchik A.** Model Free Error Compensation for Cable-Driven Robot Based on Deep Learning with Sim2real Transfer Learning // Lecture Notes in Electrical Engineering, 793. 2022. P. 479—496.

Error Compensation in Position and Orientation of Mobile Platform of Cable-Driven Robots via Tensile Forces Measurement

E. A. Marchuk, e.marchuk@innopolis.ru, **Ya. V. Kalinin**, jkv83@mail.ru, **A. V. Maloletov**, a.maloletov@innopolis.ru,
Innopolis University, Innopolis, 420500, Russian Federation,
Volgograd State Technical University, Volgograd, 400005, Russian Federation

Corresponding author: **Maloletov A. V.**, Dr. Sc., Professor,
Innopolis University, Innopolis, 420500, Russian Federation, e-mail: a.maloletov@innopolis.ru

Accepted on June 28, 2022

Abstract

The paper deals with a problem of position and orientation errors of mobile platform of large-sized parallel cable-driven robots. The advantages of parallel cable-driven robots are simplicity of structure and scalability. At the same time, parallel cable-driven robots are difficult to design due to the specific problems such as collision of cables, geometric and structural nonlinearity in the mathematical models of the main elements of the robot. In this paper, we consider the problem of eliminating the uncertainty associated with deformations of the elements of the robot structure. Such a configuration of the cable system is selected, in which the proximal anchor points of some cables can be considered without errors relatively to given positions. The cable system of a large-sized robot is mounted on the towers. The errors in the proximal anchor points relatively to given positions become significant due to the significant deformations of upper sections of the towers. The deformations of the towers in lower sections can be considered insignificant, and the proximal anchor points have to be located no higher than the middle of the tower to be considered corresponding to a given position. The aim is to compensate the position and orientation errors of the mobile platform of large-sized parallel cable-driven robot due to deformations of the cables and towers. The task suppose uncertainty about the coordinates of the proximal anchor points of the upper cables. Cable deformations are determined from Hooke's law using tensile forces measurement in cables. The problem of compensations is solved in two stages. At the first stage, the approximate bias of the center of mass of the mobile platform along the vertical coordinate is found. It is defined as the height of the truncated pyramid, the edges of which are formed by stretched lower cables. At the second stage, rotation angles of the mobile platform are determined. Using the rotation matrix, biases in the heights of each distal anchor points are found in the tool coordinate system. In the studied cases PID regulation is used, however, more advanced techniques of automatic regulation, for example, optimal control, can provide better results. The tasks are applied to the model of large-sized symmetric parallel eight-cable-driven robot.

Keywords: *cable-driven robot, position, orientation, errors, tensometer*

For citation:

Marchuk E. A., Kalinin Ya.V., Maloletov A. V. Error Compensation in Position and Orientation of Mobile Platform of Cable-Driven Robots via Tensile Forces Measurement, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie,* 2022, vol. 23, no. 10, pp. 515—522.

DOI: 10.17587/mau.23.515-522

References

1. **Samset I.** Winch and cable systems, Springer Netherlands, 1985, 534 p.
2. **McNeil I.** An Encyclopaedia of the history of technology, Routledge, 1996, 1084 p.
3. **Kim P. W.** Scientific Disciplines of Geojunggi (the Traditional Crane) in Korean Science, Technology and History Class, *EURASIA Journal of Mathematics Sci-ence and Technology Education*, 2017, iss. 13(9), pp. 6147—6163.
4. **Gujin Tushu Jicheng.** Imperial Encyclopaedia — Manufacture, vol. 800 (1700—1725), Taiwan, 1977, 121 p.
5. **Landsberger S. E.** Design and construction of a cable-controlled, parallel link ma-nipulator, Massachusetts Institute of Technology, 1984.
6. **Albus J. S.** Cable arrangement and lifting platform for stabilized load lifting US Pa-tent No. 4 883 184, Nov. 28, 1989.
7. **Kawamura S., Choe W., Tanaka S., Pandian S. R.** Development of an ultrahigh speed robot FALCON using wire drive system, *Proceedings of 1995 IEEE Interna-tional Conference on Robotics and Automation,* 1995, vol. 1, pp. 215—220.
8. **Maeda K., Tadokoro S., Takamori T., Hiller M, Verhoeven R.** On design of a redundant wire-driven parallel robot WARP manipulator, *Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation,* 1999, vol. 2, pp. 895—900.
9. **Bruckmann T., Pott A., Hiller M.** Calculating force distributions for redundantly actuated tendon-based Stewart platforms, *Advances in Robot Kinematics*, 2006, pp. 403—412.
10. **Pott A., M therich H., Kraus W., Schmidt V., Miermeister P., Verl A.** IPAne-ma: A family of Cable-Driven Parallel Robots for Industrial Applications, *Cable-Driven Parallel Robots. Mechanisms and Machine Science*, 2012, vol. 12, pp. 19—34.
11. **Rodriguez M.** Parallel Cable Robotics for Improving Maintenance and Logistics of Large-Scale Products, Tecnalia, 2013.
12. **Tempel P., Herve P., Tempier O., Gouttefarde M., Pott A.** Estimating inertial pa-rameters of suspended cable-driven parallel robots — Use case on CoGiRo, *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2017, pp. 6093—6098.
13. **Marchuk E., Kalinin Ya., Maloletov A.** Mathematical Modeling of Eight-Cable-Driven Parallel Robot, *2021 International Conference "Nonlinearity, Information and Robotics" (NIR),* 2021, pp. 1—5.
14. **Irvine H. M.** Cable structures, The MIT Press, 1981, 259 p.
15. **Merkin D. R.** Vvedenie v mehaniku gibkoy niti (Introduction to the mechanics of a flexible thread), Moscow, Nauka, 1980, 240 p. (in Russian).
16. **Kalinin Ya. V., Marchuk E. A.** Specifity of Including of Structural Nonlinearity in Model of Dynamics of Cable-Driven Robot, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 10, pp. 547—552 (in Russian).
17. **Maloletov A. V., Fadeev M. Y., Klimchik A. S.** Error Analysis in Solving the In-verse Problem of the Cable-Driven Parallel Underactuated Robot Kinematics and Methods for Their Elimination, *IFAC-PapersOnLine. 9th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control, MIM 2019,* 2019, pp. 1156—1161.
18. **Pott A.** Cable-Driven Parallel Robots, Springer International Publishing, 2018, 465 p.
19. **Zi B., Qian S.** Design, Analysis and Control of Cable-Suspended Parallel Robots and Its Applications, Springer Singapore, 2017, 299 p.
20. **Boby R. A., Maloletov A., Klimchik A.** Measurement of End-effector Pose Errors and the Cable Profile of Cable-Driven Robot using Monocular Camera, *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, 2021, iss. 103 (2), pp. 32.
21. **Akhmetzyanov A., Rassabin M., Maloletov A., Fadeev M., Klimchik A.** Model Free Error Compensation for Cable-Driven Robot Based on Deep Learning with Sim2real Transfer Learning, *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 793, 2022, pp. 479—496.

Federal Research Center "Computer Science and Control" of the RAS,
Ivannikov Institute for System Programming of the RAS, Lomonosov Moscow State University,
St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", and Bauman Moscow State Technical University
invite you to participate in the 15th International Conference "Intelligent Systems – 2022" (INTELS'22),
that will take place in **Moscow, Russia, December 14–16, 2022.**

Topics of interest include but not limited to

Logic inference and many-valued logic
Intelligent and AI-based control
Optimal control
Optimization
Artificial neural networks
Fuzzy systems
Machine Learning
Symbolic regression and genetic programming
Patterns recognition
Evolutionary computations
Bionic systems
Cognitive systems
Brain-machine interface systems
Identification of dynamical plants
Intelligent aerocosmic systems Intelligent systems in bioinformatics
Adaptive Security Architecture for intelligent systems
Autonomous Agents and Things
Big Data Analysis
Data mining: WEB mining, image mining
Deep Learning
Design and implementation of interdisciplinary systems for computer mathematics
Computer algebra and symbolic computation in theorem proving systems
Knowledge representation and automated reasoning
Decision support systems
Multi-agent systems
Swarm intelligence in robotics
Intelligent systems in robotics