

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОДВЕСНОГО ТРОСОВОГО ПАРАЛЛЕЛЬНОГО РОБОТА ДЛЯ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА

Тулешов А.К.¹, Джомартов А.А.¹, Камал А.Н.¹, Абдураимов А.Е.¹

¹Институт механики и машиноведения имени академика У.А. Джолдасбекова, г. Алматы, Казахстан

Аннотация. В настоящее время, проводятся исследования тросовых параллельных роботов (ТПР). В ТПР тросы могут работать только на растяжение. Данная особенность ограничивает разработку и применение тросовых параллельных роботов и требует дальнейшего развития методов анализа и проектирования. Опыт работы наших преподавателей, показал, что для лучшего понимания студентами особенностей ТПР, необходимы разработка прототипа ТПР. В этой статье проводится анализ и разработка подвешного ТПР с точечной массой, для практического применения в учебном процессе. Разработана конфигурация системы прототипа подвешного точечного ТПР с учетом удобства и наглядности при демонстрации его работы студентам и изготовлен его прототип. Экспериментальные работы студентов на прототипе подвешного точечного ТПР, позволили существенно улучшить учебный процесс и привлечь внимание к изучению курса робототехники в институте.

Ключевые слова: тросовый параллельный робот, кинематика, статика, прототип, натяжение, рабочий орган

Введение. Тросовый параллельный робот (ТПР) это особый класс параллельного робота, в котором звено рабочего органа поддерживается параллельно m тросами, которые приводятся в движение n приводами. Для контроля положения и ориентации рабочего органа ТПР приводятся в движение гибкими тросами, а не жесткими звеньями в отличие от обычных параллельных роботов. ТПР обладают преимуществами параллельных роботов и имеют более высокое соотношение нагрузки и веса. ТПР имеют меньшие инерционные характеристики, что обеспечивает высокую скорость и ускорение рабочего органа. Благодаря гибкости тросов, ТПР имеет самую большую рабочую зону обслуживания среди существующих роботов. Главным недостатком ТПР является то, что тросы могут работать только на растяжение, и теряют свою работоспособность при сжатии.

Одним из первых ТПР был Robocrane (рисунок 1), который был разработан в 1989 году в США, Национальным институтом

стандартов и технологий (NIST) [1,2]. ТПР Robocrane предназначался для обработки грузов в портах, при строительстве мостов и т.д. ТПР Robocrane представляет собой подвешенную на шести тросах платформу Стюарта с шестью. Здесь вместо гидроцилиндров применяются тросы, и сила тяжести является неявным дополнительным приводом.



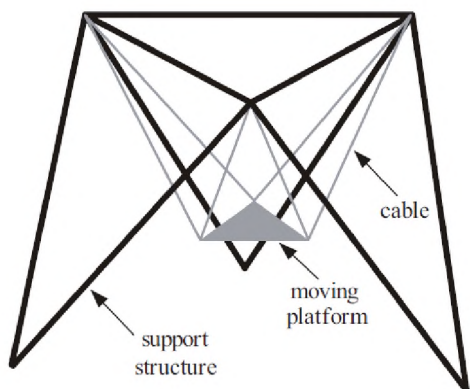


Рисунок 1 – ТПР RoboCrane (NIST)

Типовая ТПР состоит из трех частей, включая неподвижную раму, рабочий орган (РО), который соединяется через m тросов к неподвижной раме. Длина тросов изменяется лебедками, которые приводятся в действие серводвигателями, установленными на неподвижной раме, как показано на рис. 2 [3, 4].

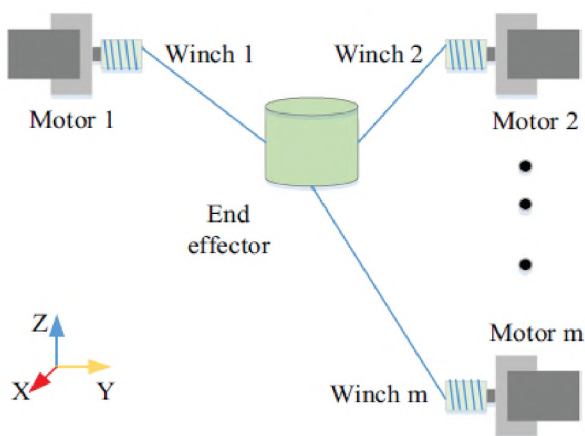


Рисунок 2 – Схема ТПР с m тросами

ТПР с m -количеством тросов и n – степенями свободы DOF, можно классифицировать [5], как не полностью удерживаемый $m < n + 1$, полностью закрепленный $m = n + 1$, непонтольно закрепленный $m > n + 1$. Кроме вышеуказанной классификации ТПР подразделяются на два вида - подвесные и не подвесные, в зависимости от расположения тросов. Если в ТПР все приводные тросы находятся над рабочим органом РО, а

сила тяжести действует как виртуальный трос для поддержания равновесия, то такой ТПР называется подвесным [1, 6-8]. В случае если в ТПР хотя бы один приводной трос находится ниже рабочего органа РО, то такой ТПР называется не подвесным [9,10].

В подвесных ТПР тросы находятся над рабочим органом РО, и полезная нагрузка распределяется между тросами, поэтому данные ТПР имеют большую нагрузочную способность. Особенностью подвесных ТПР является меньшая вероятность того, что тросы столкнутся с другим объектам внешней среды, в следствии того, что все тросы находятся выше РО. Структура подвесных ТПР хорошо подходит для работ по подъему и перемещению различных грузов. Недостатками подвесных ТПР является низкая жесткость в вертикальном направлении. Подвесные ТПР могут выйти из-под контроля при переменных внешних силах, особенно при операции разгрузки.

Особый интерес представляют подвесные ТПР с точечной массой [11,12]. ТПР с точечной массой представляют собой особую группу подвесных ТПР, в которых все тросы прикреплены к одной точке на РО и могут изменять длину, для контроля положения РО. Обычно РО моделируется как сосредоточенная масса, расположенная в точке пересечения тросов. Хотя во многих случаях центр масс РО не расположен в точке пересечения тросов, расстояние этого смещения считается небольшим по сравнению с размерами ТПР. ТПР с точечной массой хорошо подходят для выполнения операций, аналогичных операциям строительных кранов при подъеме и перемещении грузов. Однако ТПР имеет значительно меньшее колебание полезной нагрузки, чем кран, при выполнении той же операции из-за своей параллельной конструкции.

В работе [13] разработан подвесной ТПР с точечной массой для транспортировки и размещения тяжелых предметов на строительных площадках, как показано на рисунке 3.

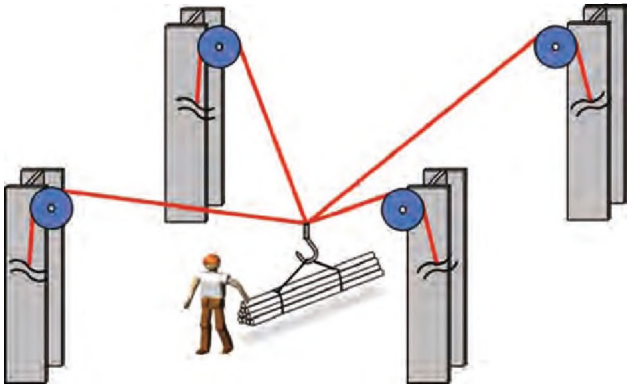


Рисунок 3 – Подвесной ТПР с точечной массой для транспортировки грузов

На рисунке 4 четыре троса соединяются в одной точке рабочего органа РО, и к нему подвешивается объект. Следовательно, положение объекта не ограничено. Рабочая зона находится между четырьмя колоннами. Жесткость ТПР в горизонтальной плоскости выше, чем у мостового крана, что выгодно для точного позиционирования.

В этой статье проводится анализ и проектирование конкретного типа ТПР, а именно подвесного ТПР с точечной массой с практическим применением в учебном процессе. В связи с тем, что ТПР являются относительно новыми роботами, которые принципиально отличаются от классических параллельных роботов с жесткими звеньями, возникли проблемы при проведении учебного процесса. Наши исследования показали, что чтение лекций и показ видео работы существующих ТПР, недостаточен для понимания студентами особенностей структуры, кинематики, статики данного вида роботов. Для улучшения учебного процесса, необходима разработка более простых методов анализа кинематики, статики ТПР. Кроме того необходимо спроектировать и изготовить прототип ТПР с возможностью проведения эксперимен-

тальных исследований студентами.

Методы исследования. Рассмотрим подвесной точечный ТПР с 3 степенями свободы и четырьмя приводными тросами, который показан на рисунке 4. Особенность данной конфигурации ТПР состоит в том, что для поддержания равновесия необходимо учитывать гравитацию. В данной конфигурации подвесного ТПР РО рассматривается как точечная масса, которая обладает только поступательными степенями свободы. Это предположение верно так, как размеры РО намного меньше рабочего пространства ТПР.

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

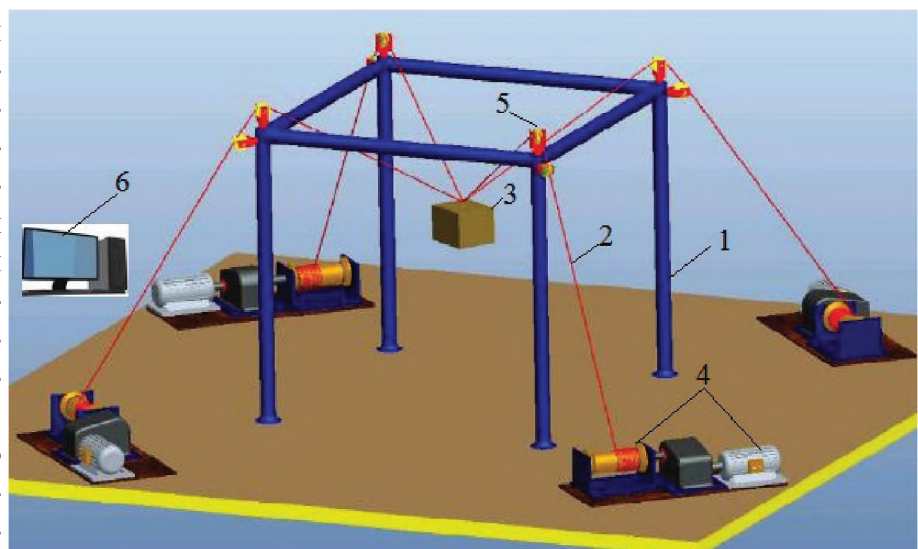


Рисунок 4 – Подвесной точечный ТПР

Кинематическая схема подвешенного точечного ТПР (рисунок 4) показана на рисунке 5. Введены следующие обозначения размеров неподвижной прямоугольной рамы ТПР: a – ширина, b – длина, h – высота. Глобальная система координат $O(XYZ)$ устанавливается в середине прямоугольного основания рамы ТПР, а РО имеет координаты положения $P(x, y, z)$. Расстояние между каждой вершиной A, B, C, D стоек тросовой опоры и РО составляет L_i ($i = 1, 2, 3, 4$). Координаты точек вершин опор следующие $A(-\frac{a}{2}, -\frac{b}{2}, h)$, $B(\frac{a}{2}, -\frac{b}{2}, h)$, $C(\frac{a}{2}, \frac{b}{2}, h)$, $D(-\frac{a}{2}, \frac{b}{2}, h)$.

Четыре стойки тросовых опор имеют одинаковую высоту и расположены прямоугольником на земле, если не учитывать деформацию. Для упрощения модели тросы рассматриваются как безмассовое тело без деформации и предполагается, что тросы прямолинейные и натянутые.

На рисунке 5 введены обозначения: \mathbf{p}_i – векторы положения точек A, B, C, D прикрепленных к неподвижной раме относительно глобальной системы координат $O(XYZ)$, \mathbf{L}_i – вектор длины тросов относительно глобальной системы координат $O(XYZ)$,

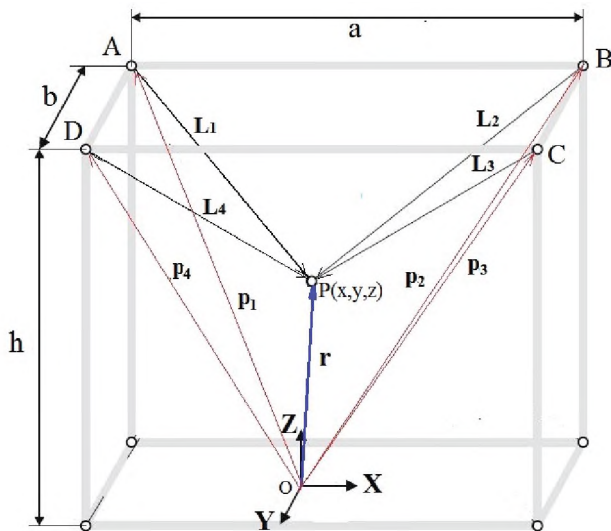


Рисунок 5 – Кинематическая схема подвешенного точечного ТПР

Уравнения для обратной задачи кинематики для указанной кинематической схемы

ТПР представлены как расстояния от точки P с текущими координатами x, y, z до вершин четырехугольника A, B, C, D получим из рисунка 5. Применяя метод замкнутых векторных контуров (рисунок 5) получим следующую систему ограничений

$$\mathbf{p}_i - \mathbf{r} - \mathbf{L}_i = \mathbf{0} \quad i = 1, \dots, 4 \quad (1)$$

где вектор $\mathbf{r} = [x, y, z]^T \in \mathbb{R}^3$ – декартово положение РО, относительно глобальной системы координат $O(XYZ)$. Из (1) можно определить вектор длины тросов \mathbf{L}_i

$$\mathbf{L}_i = \mathbf{p}_i - \mathbf{r}, \quad i = 1, \dots, 4 \quad (2)$$

Скалярная длина троса определяется по формуле

$$L_i = \|\mathbf{p}_i - \mathbf{r}\|, \quad i = 1, \dots, 4 \quad (3)$$

Единичный вектор \mathbf{u}_i вдоль троса имеет вид

$$\mathbf{u}_i = \frac{\mathbf{L}_i}{\|\mathbf{L}_i\|_2} = \frac{L_{xi} \mathbf{i}_x + L_{yi} \mathbf{i}_y + L_{zi} \mathbf{i}_z}{\sqrt{L_{xi}^2 + L_{yi}^2 + L_{zi}^2}} \quad (4)$$

Единичный вектор \mathbf{u}_i по соглашению направлен от РО к неподвижному основанию, это значит, что положительные силы направлены в направлении уменьшения значения векторов длины \mathbf{L}_i т.е. тросы укорачиваются.

Для решения прямой задачи о положении ТПР, из (3) и рисунка 5 получим

$$\begin{cases} L_1^2 = (x + \frac{a}{2})^2 + (y + \frac{b}{2})^2 + (z - h)^2 \\ L_2^2 = (x - \frac{a}{2})^2 + (y + \frac{b}{2})^2 + (z - h)^2 \\ L_3^2 = (x - \frac{a}{2})^2 + (y - \frac{b}{2})^2 + (z - h)^2 \\ L_4^2 = (x + \frac{a}{2})^2 + (y - \frac{b}{2})^2 + (z - h)^2 \end{cases} \quad (5)$$

Далее из системы четырех уравнений (5) нужно выбрать три из них и непосредственно рассчитать положение РО. Давайте выберем

уравнения, относящиеся первому, второму и третьему тросам, тогда из уравнения (5) получим значения координат РО

$$\begin{cases} x = \frac{L_2^2 - L_1^2}{2a} \\ y = \frac{L_3^2 - L_4^2}{2b} \\ z = h \pm \sqrt{L_1^2 - (x - \frac{a}{2})^2 - (y - \frac{a}{2})^2} \end{cases} \quad (6)$$

где z имеет два решения и в соответствии с особенностями рабочего пространства подвешного точечного ТПР, решение с отрицательным знаком является корректным. Необходимо отметить, что в (5) уравнение определения длины четвертого троса не используется. Координаты положения РО определяются с помощью первых трех уравнений системы (4).

В отличие от обычных последовательных или параллельных роботов, неясно, является ли ТПР статически устойчивым для данной позиции. Для исследования устойчивости различных позиций, в которых РО может быть статически уравновешен тросами, необходимо учитывать механическое равновесие РО. Для уравновешивания силы (рисунок 6) РО необходимо учитывать все силы, действующие на РО. Таким образом, верно [5]

$$\sum_{i=1}^4 \mathbf{T}_i + \mathbf{F}_p = 0 \quad (7)$$

где $\mathbf{F}_p = [f_x, f_y, f_z]^T \in \mathbb{R}^3$ – приложенные к РО внешние силы, $f_z = m_p g$, m_p – масса РО, $\mathbf{T}_i = T_i \cdot \mathbf{u}_i$ – вектор натяжения i -го троса.

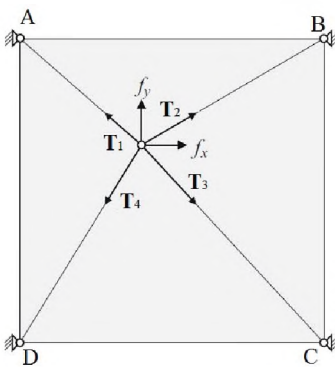


Рисунок 6 - Схема действия сил для ТПР с чисто поступательной схемой движения

Здесь вектор нормали троса \mathbf{u}_i , направлен от РО к раме ТПР. Из определения \mathbf{u}_i следует, что положительное натяжение тросов приводит к положительным значениям для T_i . Отсюда положительные значения сил натяжения тросов вызывают движение, которое уменьшает длину троса L_i .

Запишем уравнение (7) в матричной форме получаем линейную систему

$$\mathbf{A}^T(\mathbf{r})\mathbf{T} + \mathbf{F}_p = 0, \quad (8)$$

где $\mathbf{T} = [T_1, T_2, T_3, T_4]^T \in \mathbb{R}^3$, \mathbf{A}^T транспонированная матрица Якоби и называется структурной матрицей [5]. Таким образом, мы рассматриваем чисто силовое равновесие, и матрица структуры принимает вид

$$\mathbf{A}^T = [\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_4] \quad (9)$$

где векторы $\mathbf{u}_i = [u_{ix}, u_{iy}, u_{iz}]^T \in \mathbb{R}^3$.

В уравнении (8) количество неизвестных переменных ($m=4$) больше, чем количество уравнений ($n=3$), поэтому существует бесконечное количество решений для натяжения троса вектор \mathbf{T} , при действии силы \mathbf{F}_p .

В случае $m > n$ Накамура [14] показал, что решение по натяжению можно записать, используя псевдообратную матрицу для обращения уравнения (8) и получения известного частного и однородного решения для натяжения троса следующим образом:

$$\mathbf{T} = -\mathbf{A}^{+T}\mathbf{F}_p + (\mathbf{I} - \mathbf{A}^{+T}\mathbf{A}^T)\mathbf{Z} \quad (10)$$

где $\mathbf{A}^{+T} = \mathbf{A}(\mathbf{A}^T\mathbf{A})^{-1} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ – псевдообратная матрица к структурной матрице \mathbf{A}^T

$\mathbf{I} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ – единичная матрица

$\mathbf{Z} = [z_1, z_2, \dots, z_m]^T$ – произвольный вектор-столбец

В уравнении (10) первый член $\mathbf{A}^{+T}\mathbf{F}_p$ представляет собой конкретное решение по натяжению при действии силы \mathbf{F}_p . Вторым членом $(\mathbf{I} - \mathbf{A}^{+T}\mathbf{A}^T)\mathbf{Z}$, который называется однород-

ным решением, представляет собой эффект избыточности, который пресецирует \mathbf{Z} в нулевое пространство \mathbf{A}^T .

Для нашего подвешенного точечного ТПР количество тросов $m = n + 1$. Отсюда ТПР имеет одну степень резервирования срабатывания, которую можно использовать для поддержания положительного натяжения в каждом тросе [5]. Тогда уравнение (10) для этого случая выглядит в виде:

$$\mathbf{T} = -\mathbf{A}^{+T} \mathbf{F}_p + \lambda \mathbf{N} \quad (11)$$

где однородное решение теперь выражается как вектор ядра структурной матрицы \mathbf{A}^T ,

$\mathbf{N} = [n_1, n_2, \dots, n_4]^T$ умноженный на произвольный скаляр λ . При использовании этого метода для обеспечения положительного натяжения T_i на всех тросах для всех возможных действующих сил необходимо и достаточно, чтобы все компоненты вектора ядра n_i имели один и тот же знак. То есть для данной точки, лежащей в статической рабочей области, все $n_i > 0$ или все $n_i < 0$. Если одно из этих двух условий выполняется, независимо от конкретного решения, скаляр λ может быть найден в уравнении (11). Это гарантирует, что все натяжения тросов \mathbf{T} будут положительными, путем добавления (или вычитания) достаточно однородного решения. Обратите внимание, что требуется строгое неравенство; если один или несколько $n_i = 0$, рассматриваемая конфигурация не находится в статической рабочей области. В этом подходе (подход с нулевым пространством) вектор ядра можно найти с помощью правила Крамера. Следовательно, i -й нулевой компонент является определителем матрицы, образованной удалением i -го столбца структурной матрицы \mathbf{A}^T . Знак противоположен от одного компонента к следующему компоненту. Из выражения \mathbf{A}^T в уравнении (8) нулевые компоненты могут быть выражены как:

$$n_i = (-1)^i \cdot |\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_4| \quad (12)$$

После определения вектора ядра нужно проверить, все ли нулевые компоненты имеют одинаковый знак, согласно уравнения

$$\sum_{i=1}^4 |n_i| = |\sum_{i=1}^4 n_i|, \quad n_i \neq 0$$

После проверки это условие, можно найти правильный скаляр λ чтобы сохранить все тросы в натяжении.

Для определения скаляра λ используем метод оценки натяжения тросов ТПР [5]. Для устранения провисания тросов каждый компонент \mathbf{T} должен быть больше или равен заданному минимальному натяжению T_{min} . Для получения гарантированного минимального положительного натяжения во всех тросах, необходимо определять λ в каждом цикле управления ТПР.

Натяжение тросов \mathbf{T} рассчитывается для заданной силы \mathbf{F}_p , по уравнению:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} T_{p1} \\ T_{p2} \\ T_{p3} \\ T_{p4} \end{bmatrix} + \lambda \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \\ n_4 \end{bmatrix} \geq T_{min} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

где T_{pi} компоненты конкретного решения по натяжению тросов для заданной силы \mathbf{F}_p .

Проведем расчет для каждой конкретной составляющей натяжения

$$\lambda_i = \frac{(T_{min} - T_{pi})}{n_i}$$

Скаляр λ определяем, как максимум от λ_i
 $\lambda = \max \{ \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4 \}$

Полученное значение λ должно использоваться для всех компонентов в уравнении (11).

Результаты исследования. Для сборки прототипа подвешенного точечного ТПР была разработана конфигурация его системы с учетом удобства и наглядности при демонстрации его работы студентам. По разработанной конфигурации системы подвешенного точечного ТПР, был изготовлен его прототип (рисунок 7). Прототип ТПР имеет следующие исходные данные: размеры $a = 1485$ мм, $b = 1230$ мм, и $h = 1565$ мм. Масса рабочего органа $m=1,0$ кг. Тросы марки Dyneema, LIROS D-Pro 01505-0200, диаметр 2 мм площадь сечения $A = 3,14$ мм², масса единицы длины $\rho = 0,18 \cdot 10^{-2}$ кг/м, Радиусы шкивов барабанов лебедек $R=40$ мм. Привод тросов ТПР состоит из четырех лебе-

док с барабанами, закрепленными на валу с двумя подшипниками на обоих концах. Лебедки соединены через муфту с четырьмя гибридными шаговыми двигателями Nema34 - 86HB250-156 В с драйверами HBS86H. Драйвера HBS86H соединены с контроллером гибридных шаговых двигателей Mach 3. Контроллер поддерживает 4-осевое управление. С помощью контроллера Mach 3 управление ТПР осуществляется компьютером через порт USB. Напряжения в тросах ТПР определяются при помощи четырех тензодатчиков.

тросов с тензометрических датчиков, через АЦП отправляется в контроллер Mach 3, который связан с компьютером через порт USB. В компьютере задается значение минимальных натяжений в тросах подвешенного точечного ТПР, которое будет поддерживаться, с учетом полученных данных с тензодатчиков, во время его работы. Датчики силы подключены к измерительной тензометрической системе ZET 058 [15], которая совместно с программным обеспечением ZETLAB TENZO позволяет

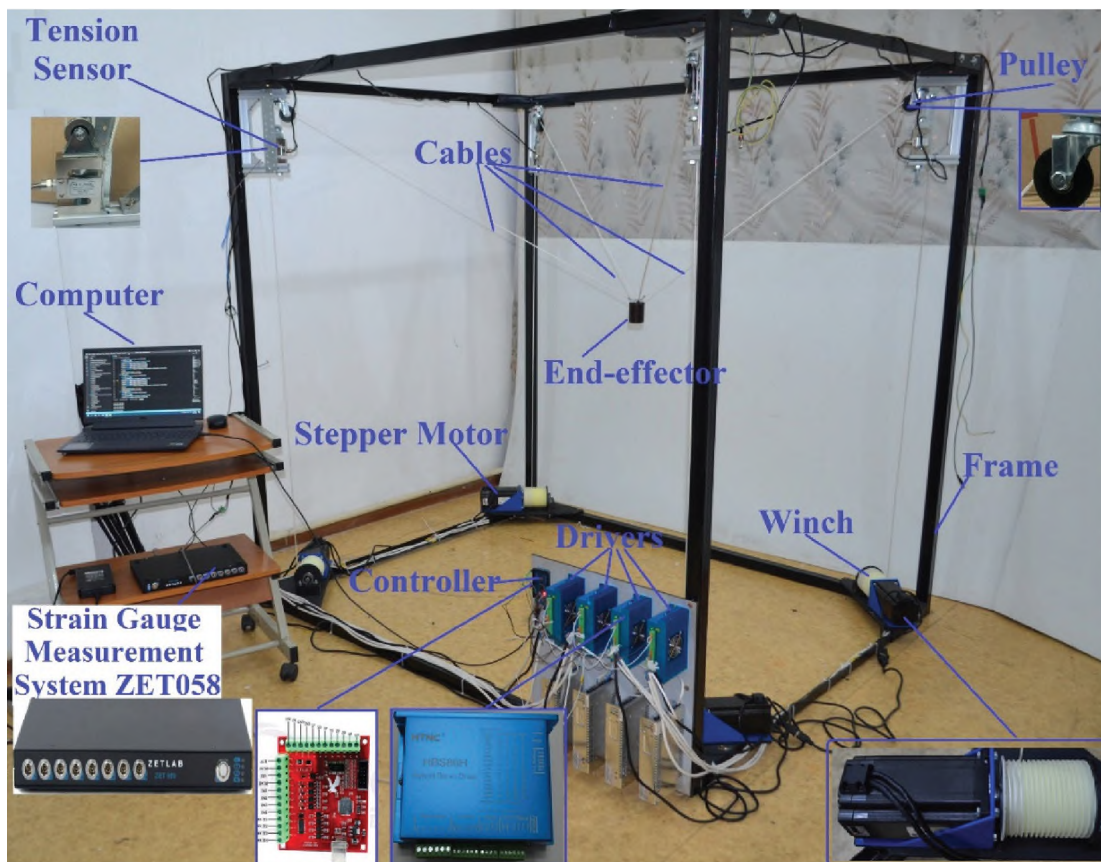


Рисунок 7 - Прототип подвешенного точечного ТПР

Для нормальной работы подвешенного точечного ТПР, необходимо поддерживать заданное минимальное натяжение тросов на протяжении всего цикла его работы. Для этого в системе управления подвешенного точечного ТПР учитываются данные с тензометрических датчиков. Сигнал об уровне натяжений

осуществлять сбор информации с тензодатчиков в режиме реального времени по восьми каналам одновременно.

На рисунке 8 показан интерфейс программы для управления подвешенным точечным ТПР.

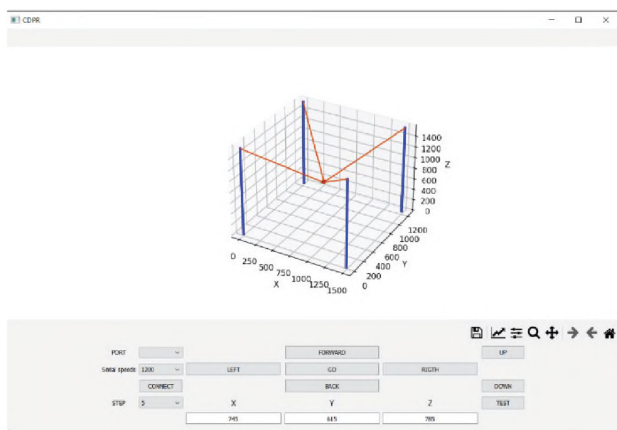


Рисунок 8 - Интерфейс программы для управления ТПР

интерфейс ТПР круговой траектории РО.

Выводы. Рассмотрены методы кинематического, статического анализа подвешенного точечного ТПР с 3 степенями свободы и четырьмя приводными тросами, совершающего только поступательное движение.

Разработана конфигурация системы прототипа подвешенного точечного ТПР с учетом удобства и наглядности при демонстрации его работы студентам. Изготовлен прототип подвешенного точечного ТПР, которая состоит из неподвижной прямоугольной рамы, четырех ле-

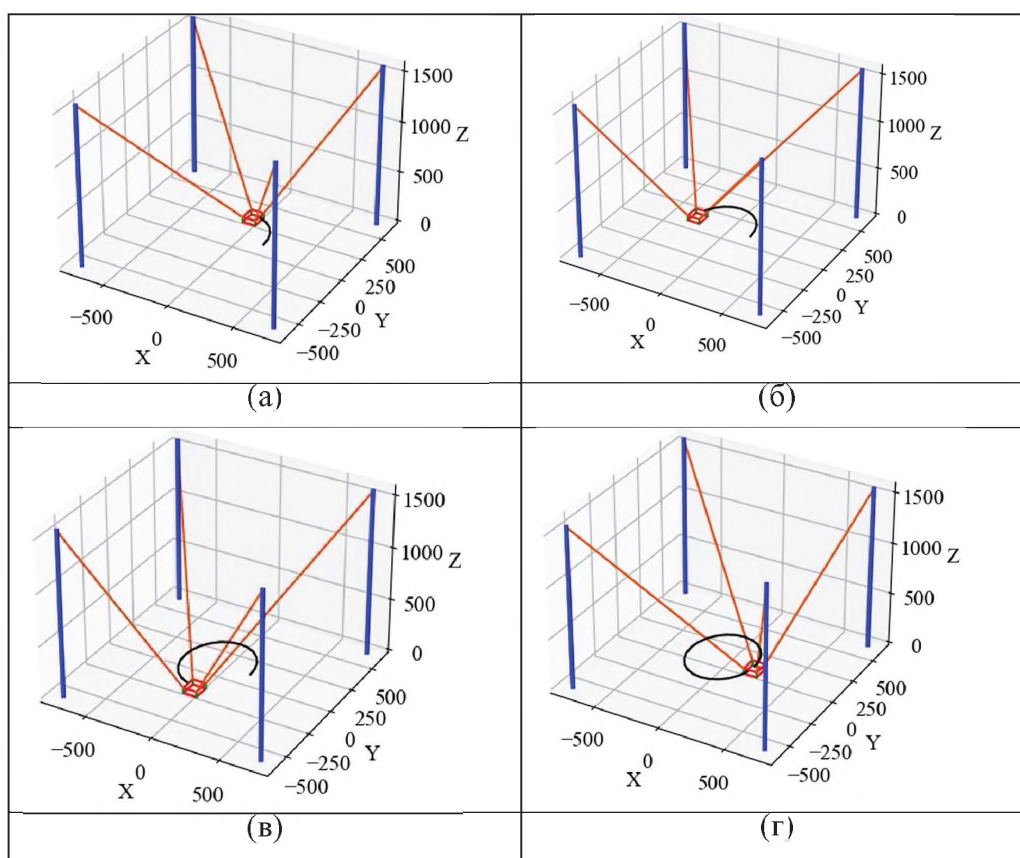


Рисунок 9 - Демонстрационный интерфейс траектории РО ТПР в разное время: (а) $t = 2$ с, (б) $t = 5$ с, (в) $t = 8$ с и (г) $t = 10$ с

При помощи интерфейса управления ТПР, мы можем вручную управлять РО. Можно совершать ручную поступательные движения РО: вперед-назад, влево-вправо. Кроме того имеется возможность воспроизведения траекторий движения РО ТПР заданных уравнениями кривых, например круг, эллипс и т.д. На рисунке 9. приведен демонстрационный

бедок, четырех гибридных шаговых двигателей с драйверами и четырех тросов. Прототип ТПР оснащен 4 датчиками силы, для экспериментального определения силы натяжения тросов. Датчики силы подключены к измерительной тензометрической системе ZET 058. Разработан графический интерфейс управления прототипом ТПР для воспроизведения РО

кривых (круг, эллипс и т.д.). Прототип ТПР имеет возможность ручного управления по ступательным движением РО: вперед-назад, влево-вправо, верх-вниз.

Проведение студентами лабораторных работ, с использованием прототипа подвешенного точечного ТПР, дало эффект лучшего понимания структуры и работы ТПР. Стоит отметить, что студенты, после практической работы на прототипе ТПР, быстрее усвоили методы кинематического, статического и динамического анализа и управления ТПР. Кроме этого, у студентов появился интерес к усо-

вершенствованию и созданию принципиально новых ТПР

Будущие работы будут в основном сосредоточены на экспериментальных методах измерения положения РО подвешенного точечного ТПР в пространстве, с целью повышения точности его работы.

Источник финансирования исследований. Работа выполнена в рамках грантового проекта АР09259339 финансируемого Министерством образования и науки Республики Казахстан.

Список литературы

- 1 *Bostelman R., Albus J., Dagalakis N., et al.* Applications of the NIST robocrane Proceedings of International Symposium on Robotics and Manufacturing Maui Hi. 1994.- pp. 14-18.
- 2 *James A., Roger B., Nicholas D.* The NIST robocrane // Journal of Robotic Systems. 1993.- №10.- pp. 709-724.
- 3 *Varela M. J., Ceccarelli M., Flores P.* A kinematic characterization of human walking by using CaTraSys. // Mechanism and Machine Theory. 2015.- №86.- pp. 125-139.
- 4 *Verhoeven R.* Analysis of the workspace of tendon-based Stewart platforms. - Duisburg: Department of Mechanical Engineering, University of Duisburg-Essen, 2004.
- 5 *Pott A.* Cable-Driven Parallel Robots. Theory and Application. - Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 2018. - 465 p.
- 6 *Heyden T., Woernle C.* A Dynamics and flatness based control of a kinematically undetermined cable suspension manipulator // Multibody System Dynamics. 2006. - №16. – pp. 155-177.
- 7 *Lamaury J., Gouttefarde M.* A Control of a large redundantly actuated cable-suspended parallel robot / Proceedings Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on. IEEE. 2013. - pp. 4659-4664.
- 8 *Nan R.* A Five hundred meter aperture spherical radio telescope (FAST) / Proceedings Science in China series G 49.2. 2006. - pp. 129-148.
- 9 *Pott A. et al.* A IPANema: a family of cable-driven parallel robots for industrial application // Cable-Driven Parallel Robots. Springer. 2013. - pp. 119-134
- 10 *Hiller M. et al.* A Design, analysis and realization of tendon based parallel manipulators // Mechanism and Machine Theory. 2005. - №40. - pp. 429-445.
- 11 *Boschetti G., Minto R.* A. Trevisani Improving a Cable Robot Recovery Strategy by Actuator Dynamics // Appl. Sci. 2020. - №10(20). – pp. 7362.
- 12 *Alp A. B., Agrawal S. K.* Cable Suspended Robots: Design, Planning, and Control / Proceedings of 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Washington. 2002. - pp. 4275-4280.
- 13 *Sugahara Y., Chen G., Atsumi N., Matsuura D., Takeda Y., Mizutani R., Katamura R.* A Suspended Cable-Driven Parallel Robot for Human-Cooperative Object Transportation // ROMANSY 23 - Robot Design, Dynamics and Control. 2021. - Vol. 601, pp. 109-117.
- 14 *Nakamura Y.* Advanced Robotics - Redundancy and Optimization. - Addison-Wesley Publishing Company, 1991.
- 15 ZETLAB Company. Available online: www.zetlab.com (accessed on 10 December 2022).

А.К. Тулешов, А.А. Джомартов, А.Н. Камал, А. Е. Абдураимов. ОҚУ ПРОЦЕСІ ҮШІН АСПАЛЫ СЫМАРҚАНДЫ ПАРАЛЛЕЛЬДІ РОБОТТЫ ЖОБАУ

Түйіндеме. Қазіргі уақытта сымарқанды параллельді роботтар (СПР) бойынша зерттеулер жүргізілуде. СПР-да кабельдер тек кернеуде жұмыс істей алады. Бұл мүмкіндік кабельдік параллельді роботтардың дамуы мен қолданылуын шектейді және талдау мен жобалау әдістерін одан әрі дамытуды талап етеді. Оқытушыларымыздың тәжірибесі студенттердің СПР ерекшеліктерін жақсы түсінуі үшін СПР тәжірибелік үлгісін жасау қажет екенін көрсетті. Бұл мақалада оқу процесінде практикалық қолдану үшін нүктелік массасы бар тоқтатылған СПР талданады және әзірленеді. СПР аспалы нүктесінің тәжірибелік жүйесінің конфигурациясы оның жұмысын студенттерге көрсету кезінде ыңғайлылығы мен көрнекілігін ескере отырып әзірленді және оның прототипі жасалды. Студенттердің СПР аспалы нүктесінің прототипі бойынша эксперименттік жұмысы оқу үдерісін айтарлықтай жақсартуға және институттағы робототехника курсын оқуға назар аударуға мүмкіндік берді.

Түйін сөздер: сымарқанды параллельді робот, кинематика, статика, прототип, кернеу, жұмыс органы

Tuleshov A.K., Jomartov A.A., Kamal A.N., Abduraimov A.E. DESIGNING A SUSPENDED CABLE PARALLEL ROBOT FOR THE LEARNING PROCESS

Abstract. Currently, research is being carried out on cable parallel robots (CPR). In CPR, cables can only work in tension. This feature limits the development and application of cable parallel robots and requires further development of analysis and design methods. The experience of our teachers showed that for a better understanding of the features of the CPR by students, it is necessary to develop a prototype of the CPR. This article analyzes and develops a suspended CPR with a point mass for practical use in the educational process. The configuration of the prototype system of the suspended point CPR was developed, taking into account the convenience and visibility when demonstrating its work to students, and its prototype was made. Experimental work of students on the prototype of the suspended point CPR allowed to significantly improve the educational process and draw attention to the study of the robotics course at the institute.

Keywords: cable parallel robot, kinematics, statics, prototype, tension, working body

Сведения об авторах

Тулешов А.К., доктор технических наук, профессор, член-корреспондент НАН РК. e-mail: aman_58@mail.ru

Джомартов А.А., доктор технических наук. e-mail: legsert@mail.ru,

Камал А.Н., магистрант. e-mail: kan77705@gmail.com

Абдураимов А.Е., магистрант. e-mail: kan77705@gmail.com