СИСТЕМА МОМЕНТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЕМ ДВУХТРОСОВОГО РОБОТА

Нгуен Д.Х.¹, Беляев А.С.² ¹ ТПУ, ИШИТР ОАР, студент группы 8E11, e-mail: nd01@tpu.ru ² ТПУ, ИШИТР ОАР, к.т.н., старший преподаватель, e-mail: asb22@tpu.ru

Аннотация

В работе рассмотрена задача имитационного моделирования двухтросового робота и синтеза системы управления им на основе принципа регулирования момента. Для определения требуемого задающего момента он был представлен в виде двух функциональных составляющих, отвечающих за статическую стабилизацию груза и за динамику его планируемого движения. Приведены результаты моделирования, показавшие высокую точность работы.

Ключевые слова: тросовый робот, системы управления, управление по моменту, имитационное моделирование.

Введение

Тросовые конструкции находят широкое применение в разных сферах жизни человека. Это объясняется принципом работы системы, а именно тем, что единственной подвижной частью системы, за исключением непосредственно подвешенного груза, являются тросы, а все исполнительные элементы, например, электродвигатели, закреплены стационарно и не относятся к перемещающейся массе. Отсюда следует, что инерция данной установки зависит только от массы подвешенного элемента. Именно по данной причине подобные автоматизированные конструкции находят широкое применение во многих задачах. Например, в медицине их используют в системах компенсации веса, которые позволяют пациентам с проблемами опорно-двигательного аппарата начать реабилитацию быстрее, дозировать нагрузки и, предотвращая падения, избегать повторного травмирования [1–4]. В космической отрасли такие системы применяют в качестве систем обезвешивания, которые компенсируют вес элементов космических аппаратов во время земных испытаний, чтобы приблизить условия эксперимента к космическим. Такие системы используют для обезвешивания как статичных конструкций, например: спутников [5], астронавтов [6], так и динамических, например, солнечных панелей в режиме раскрытия [7–9]. Также роботы, построенные на тросовых конструкциях, активно исследуются в качестве современных промышленных 3D принтеров, способных печатать на больших площадях с использованием таких материалов, как, например, бетон [10]. Такие роботы могут применяться при строительстве зданий. И конечно, такого рода системы могут использоваться в качестве подъемно-транспортных систем, например роботизированных кранов.

При этом, во всех из представленных случаев управление подобными системами строится на основе информации о длинах тросов или о положении подвешенной конструкции. То есть, система управления строится на основе контура положения. С одной стороны, данный выбор выглядит логично, ввиду того что именно положение объекта для конечного пользователя и разработчика является наиболее важной величиной, а для системы управления является выходной величиной. Однако поскольку объект во всех случая (медицина – человек, космос – солнечная панель, промышленность – экструдер 3D принтера с бетоном) обладает значительно большим весом по сравнению остальной перемещаемой массой системы, необходимо постоянно создавать усилия на тросах, чтобы компенсировать данный вес. Следовательно, для лучшего качества управления такой системой внутренний контур управления должен компенсировать вес подвешенной конструкции. В результате большинство систем управления такими роботами либо имеют сложную многоконтурную систему управления, например положение-скорость-ток [11], либо пренебрегают контуром тока [5] и теряют точность в компенсации силы и рывка. Поэтому в данной работе ставится вопрос о реализации системы управления таким роботом исключительно на контуре тока-момента, чтобы упростить процесс реализации и настройки и компенсировать вес груза в статическом и динамическом режимах.

Математическое описание системы

В качестве исследуемого объекта использована 2-х тросовая система с грузом, кинематическая схема которой приведена на рисунке 1.



Рис. 1. Кинетическая схема двухтросовой системы обезвешивания

Для описания динамики работы системы использовано уравнение Ньютона в векторной форме, описывающие действующие на груз силы:

$$\vec{F}_1 + \vec{F_2} = m\vec{a}.$$
 (1)

Принцип работы системы был разделен на две функциональных составляющих:

1. Статический режим работы – обеспечение на лебедках моментов, необходимых для поддержания груза в статическом состоянии, то есть при условии равновесия действующих на систему сил;

2. Динамический режим работы – обеспечение движения груза в пространстве по заданной траектории.

Для обеспечения статического режима работы системы в (1) в качестве ускорения использована исключительно составляющая веса груза. В результате разложения сил на проекции по осям ХОУ получены следующие зависимости сил для обеспечения статического режима:

$$\begin{cases} F_1(x, y) = \frac{l_1(x_2 - x)}{(x_2 - x)(y_1 - y) - (x_1 - x)(y_2 - y)} mg, \\ F_2(x, y) = \frac{l_2(x_1 - x)}{(x_1 - x)(y_2 - y) - (x_2 - x)(y_1 - y)} mg, \end{cases}$$
(2)

где x, y – координаты груза, x_1 , y_1 – координаты первой лебедки, x_2 , y_2 – координаты второй лебедки, m – масса груза, F_1 , F_2 – силы натяжения первого и второго троса соответственно, l_1 , l_2 – силы натяжения первого и второго троса соответственно, g – ускорение свободного падения.

Для обеспечения динамического режима работы были определены зависимости изменения сил в пространстве путем дифференцирования (2):

$$\begin{cases} dF_1(dx,dy) = \frac{\partial F_1}{\partial x} dx + \frac{\partial F_1}{\partial y} dy = \frac{l_1(x_1 - x_2)mg}{\left((x_2 - x)(y_1 - y) - (x_1 - x)(y_2 - y)\right)^2} \left((y_2 - y)dx - (x_2 - x)dy\right), \\ dF_2(dx,dy) = \frac{\partial F_2}{\partial x} dx + \frac{\partial F_2}{\partial y} dy = \frac{l_2(x_2 - x_1)mg}{\left((x_1 - x)(y_2 - y) - (x_2 - x)(y_2 - y)\right)^2} \left((y_1 - y)dx - (x_1 - x)dy\right). \end{cases}$$

Для определения кинематических зависимостей между длинами тросов и координатами груза использованы уравнения окружностей, проходящих через координаты лебедок:

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = l_1^2, \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = l_2^2. \end{cases}$$

Последним шагом математического описания стали уравнения исполнительных элементов – двигателей постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов:

$$\begin{cases} u_{j} = \omega_{j} \frac{Ce}{k_{red}} + i_{j} \cdot r + L \frac{di_{j}}{dt}, \\ M_{j} = i_{j} \cdot k \cdot k_{red}, \end{cases} \begin{cases} \frac{di_{j}}{dt} = \frac{u_{j}}{L} - \frac{\omega_{j} \cdot Ce}{L \cdot k_{red}} - i_{j} \frac{r}{L}, \\ M_{j} = i_{j} \cdot k \cdot k_{red}, \end{cases}$$

где k_{red} – передаточное число редуктора, k – конструктивный коэффициент движителя, Ce – электрическая постоянная двигателя, L – индуктивность обмотки якоря двигателя.

Объединение данных уравнений в виде системы или приведение к виду «вход-состояние-выход» позволит получить полную математическую модель описываемой системы, однако ввиду громоздкости данная модель не приведена в работе.

Описание системы моделирования

С целью проверки полученных ранее математических зависимостей, а также наглядной демонстрации принципов работы системы следующим шагом разработки стало создание имитационной модели системы в среде Matlab Simulink с применением библиотеки SimMechanics для моделирования механических систем и тросов. На рисунке 2 приведена имитационная модель лебедки с тросом с использованием блоков данной библиотеки.



Рис. 2. Модель лебедки с тросом

Собрав в единую имитационную модель 2 лебедки и груз, получена модель, внешний вид которой приведен на рисунке 3А. Стоит отметить, что для оценки качества работы системы управления был введен дополнительный мнимый груз (красный на рисунке 3А), вес которого скомпенсирован введением дополнительной силы. Рассогласование между координатами мнимого и реального груза в дальнейшем будут использованы в качестве метрики работы системы и будут обозначены как ошибки. Схематично данные об ошибке представлены на рисунке 3Б.



Рис. 3. а) Внешний вид имитационной модели; б) Схема определения ошибок рассогласования

Для того, чтобы добиться качественного процесса регулирования система управления должна одновременно обеспечивать оба вышеупомянутых режима работы: статический и динамический.

Это значит, что она должна компенсировать вес обезвешиваемого элемента и добавлять дополнительные моменты необходимые для перемещения груза в пространстве. Структура такой системы представлена на рисунке 4. Недостаток данной системы состоит в двух последовательно соединенных регуляторах по моменту, что несколько противоречит цели данного исследования. Однако, по сути, оба данных регулятора управляют непосредственно моментом на валу двигателей, что говорит об их функциональной близости. В дальнейших исследованиях данные регуляторы будут объединены.



Рис. 4. Контур управления по моментам

Итоговая модель системы с учетом системы управления, объектов (мнимого и реального) блоков, отвечающих за расчет и исполнительных элементов, приведена на рисунке 5. А параметры, выбранные для моделирования, в таблице 1.



Рис. 5. Модель системы в Simulink

Таблица 1

Обозначение	Значение	Обозначение	Значение	Обозначение	Значение
(x0, y0)	(0, 0) м	(x_{1}, y_{1})	(0, 2) м	т	5 кг
Ce	0,0075 В/(об/мин)	(x_2, y_2)	(4, 2) м	$m_{\pi \delta}$	1 кг
g	9,8067 м/с ²	R _{лб}	0,2 м	k	0,06 Н/(м*А)
L	0,0015 Гн	k _{red}	16		

Параметры системы моделирования

Заключительным этапом стала проверка системы управления для тестовой траектории движения. Для этого была определена кусочно-заданная функции состоящая из 4-х этапов: движение по оси ОХ, остановка, движение по оси ОУ, остановка. На рисунке 6 приведены графики ошибок по каждой из осей.



Рис. 6. Ошибки позиции по осям

По данным графикам можно сделать вывод о работоспособности системы, так как ошибка рассогласования не выходит за пределы 3 мм.

Заключение

В работе рассмотрен процесс моделирования двухтросового робота. На основании закона Ньютона получены основные уравнения динамики, позволяющие определять необходимые моменты на лебедках для компенсации веса груза в любой точке рабочего пространства. Построена имитационная модель в Matlab Simulink с применением библиотеки SimMechanics, моделирующей тросы и лебедки в виде готовых блоков. Реализована система управления на основе контура управления по моменту с разбиением требуемого момента на две составляющие: момент, необходимый для компенсации веса, и момент, необходимый для перемещения груза по требуемой траектории. Произведено моделирование работы системы, показавшее работоспособность предложенного метода с точностью в 3 мм.

Реализация подобной системы управления по сравнению с многоконтурными системами более проста в настройке и отладке, ввиду отсутствия подчиненности и меньшего количества настраиваемых параметров. В будущих исследованиях будут рассмотрены вопросы о переходе на единый контур регулирования и применении алгоритма регулирования другого типа, например линейно-квадратичного регулятора.

Список использованных источников

1. Systematic analysis of transparency in the gait rehabilitation device the FLOAT / M. Bannwart, M. Bolliger, P. Lutz [et al.] // 14th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV). - IEEE. - 2016. - P. 1-6.

2. The structure design of small satellite full-physical simulation system / Z. Xu, Y. Wang, Y. He, X. Bai // IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). - IEEE. - 2015. - P. 642-648.

3. A Novel Mechatronic Body Weight Support System / M. Frey, G. Colombo, M. Vaglio [et al.] // IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. – 2006. – Vol. 14. – № 3. – P. 311-321.

4. ZeroG: Overground gait and balance training system / J. Hidler, D. Brennan, iian Black [et al.] // The Journal of Rehabilitation Research and Development. $-2011. - Vol. 48. - N_{\odot} 4. - P. 287.$

5. INVERITAS: A facility for hardware-in-the-loop long distance movement simulation for rendezvous and capture of satellites and other autonomous objects / J. Paul, A. Dettmann, B. Girault [et al.] // Acta Astronautica. -2015. - Vol. 116. - P. 1-24.

6. Пятибратов, Г.Я. Электромеханическая силокомпенсирующая система разгрузки веса пациентов при их реабилитации на медицинском тренажере / Г.Я. Пятибратов, Л.Л. Алтунян, А.А. Даньшина // Пром-Инжиниринг: Труды IV международной научно-технической конференции, МоскваЧелябинск-Новочеркасск,

15–18 мая 2018 года. – Москва-ЧелябинскНовочеркасск: Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет). – 2018. – С. 335-340.

7. Беляев А.С. Системы активного обезвешивания трансформируемых конструкций космических аппаратов при их наземных испытаниях.: Дис. ... канд. техн. наук: 2.3.3. / А.С. Беляев. – Омск. – 2023. – 157с.

8. Четырехтросовая система обезвешивания с управлением по вектору силы / А.С. Беляев, А.А. Филипас, В.В. Курганов, Н.И. Поберезкин // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2022. – Т. 18. – № 2. – С. 98-106. – DOI 10.17122/1999-5458-2022-18-2-98-106. – EDN XNEZOS.

9. Docking Simulator. – Text: electronic // NASA. – 11.01.2010. – URL: http://crgis.ndc.nasa.gov/historic/File:1967_Docking_Simulator.jpg (usage data: 14 06.2022)

10. Design, Control, and Experimentation of Internally-Actuated Rovers for the Exploration of Low-gravity Planetary Bodies / B.J. Hockman, A. Frick, R.G. Reid [et al.] // Journal of Field Robotics. – 2017. – Vol. 34. – № 1. – P. 5-24.

11. Cable-Driven Parallel Robot: Distribution of Tension Forces, the Problem of Game Theory / E.A. Marchuk, A. Al Badr, Ya. V. Kalinin, A.V. Maloletov // Russian Journal of Nonlinear Dynamics. – 2023. – Vol. 19. – No. 4. – P. 613-631. – DOI 10.20537/nd231208. – EDN RYZTAM.

12. Design of RYSEN: An Intrinsically Safe and Low-Power Three-Dimensional Overground Body Weight Support / M. Plooij, U. Keller, B. Sterke [et al.] // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2018. – Vol. 3. – № 3. – P. 2253-2260.