

УДК 007.52

Прототип модуля управления трехкабельным щупальцем: конструкция и технические решения

Косыгин Егор Владимирович
Лятифов Роман Эйнулла оглы^(*)

egor_tech23@mail.ru
relyatifov@mail.ru
SPIN-код: 6774-2090

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Разработан и исследован тросовый щупальцевый модуль, выполненный из полиуретановых материалов с антифрикционными тефлоновыми трубками для снижения износа тросов. Управление обеспечивается коллекторными электромоторами с системой обратной связи на базе магнитных энкодеров и измерения тока, что обеспечивает высокую точность и плавность движений. Экспериментальные испытания подтвердили высокую долговечность (более 85 000 рабочих циклов) и адаптивность модуля при работе с объектами сложной формы. Предложенная конструкция и система управления обладают преимуществами по сравнению с гидравлическими приводами — компактностью, меньшим уровнем шума и упрощенным обслуживанием. Результаты открывают перспективы применения модуля в промышленной робототехнике, медицине и сервисных роботах с возможностью дальнейшей интеграции компьютерного зрения и нейросетевых алгоритмов для повышения адаптивности и устойчивости системы.

Ключевые слова: тросовое управление, адаптивный манипулятор, робототехника

Prototype of the control module for the three-cable tentacle: design and technical solutions

Kosygin Egor Vladimirovich
Lyatifov Roman Eynulla ogly^(*)

egor_tech23@mail.ru
relyatifov@mail.ru
SPIN-code: 6774-2090

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. A cable-driven tentacle module made of polyurethane materials with anti-friction Teflon tubes to reduce cable wear has been developed and studied. The control system uses brushed electric motors with feedback based on magnetic encoders and current sensing, providing high precision and smooth motion. Experimental tests confirmed the module's high durability (over 85,000 operational cycles) and adaptability when handling complex-shaped objects. The proposed design and control system offer advantages over hydraulic drives, including compactness, lower noise levels, and simplified maintenance. The results open prospects for applying the module in industrial robotics, medicine, and service robots, with potential for further integration of computer vision and neural network algorithms to enhance system adaptability and robustness.

Keywords: cable-driven control, adaptive manipulator, robotics

Введение. В последние годы робототехника активно внедряет механизмы, обладающие высокой гибкостью и адаптивностью, что делает тросовые роботы-щупальца одним из перспективных направлений для развития промышленных и сервисных манипуляторов [1]. Тросовые конструкции обеспечивают значительную степень свободы и способность к плавным движениям, приближенным к биологическим аналогам, что важно для работы в сложных и ограниченных пространствах [2].

Однако существующие решения часто сталкиваются с ограничениями по точности контрольных систем и износостойкости тросов, что снижает долговечность и надежность [3]. В данной работе предлагается новый подход к конструкции и управлению тросовым щупальцем, реализованным на базе полиуретановых материалов с применением антифрикционных компонентов и современной системы обратной связи на основе магнитных энкодеров и модели поведения тросового спирального манипулятора, геометрическая конструкция которого вдохновлена работой SpiRobs [4, 5]. В данной работе использована конструкция из 21-го сегмента с двумя степенями свободы на каждый сегмент и дополнительной возможностью продольного растяжения, что обеспечивает улучшенную маневренность и адаптивность. В дальнейшей работе описываются материалы и методы изготовления щупальца, затрагивается математическая модель управления, результаты экспериментальных исследований и перспективы применения разработанной системы в промышленной робототехнике.

Материалы и методы. Для изготовления тросового модуля использовались преимущественно полиуретановые материалы различных типов в зависимости от функциональных требований. Основным материалом является полиуретан, реализованный как аддитивный Thermoplastic Polyurethane (TPU) и химический литевой полиуретан, применяемый для обеспечения высокой эластичности и износостойкости элементов конструкции. В рамках перспективных разработок рассматривается использование твердых силиконов и возможность вулканизации резины для повышения механической устойчивости и долговечности.

Щупальце состоит из 21 сегмента, каждый из которых имеет две степени свободы и дополнительно имеет возможность продольного растяжения и сжатия, что обеспечивает улучшенную адаптивность к изменяющимся условиям работы и позволяет конструкции эффективно взаимодействовать с объектами сложной формы.

Для снижения трения в тросовых каналах каждого сегмента применены антифрикционные тефлоновые трубки, что существенно увеличивает ресурс работы, снижает износ тросов, повышает плавность движений и отзывчивость сегментов. Управление тросами осуществляется посредством коллекторных электромоторов (возможны конфигурации как с бесколлекторными, так и с шаговыми электромоторами) с редуктором, наматывающих леску на барабаны, благодаря чему достигается высокая точность и скорость отклика.

В качестве системы обратной связи используются магнитные энкодеры, выбор которых зависит от технических требований конкретной задачи. До-

полнительное управление усилием захвата реализовано через измерение тока, потребляемого моторами, что позволяет определить нагрузку и избежать повреждения как манипулятора, так и захватываемого объекта. В перспективе предусмотрено внедрение компьютерного зрения с использованием нейросетей для усовершенствования позиционирования, однако на данном этапе автоматизированное управление базируется на математической модели и данных энкодеров.

Начальные этапы управления были реализованы вручную для экспериментальной отработки, после чего была создана математическая модель кинематики щупальца, что позволило перейти к программированию автоматизированного управления и тестированию в реальных условиях.

Конструкция и технические характеристики. Тросовый модуль состоит одного вышеописанного щупальца и моторной рамы с платой управления. Конструкция имеет возможность продольного растяжения и сжатия, позволяя адаптироваться к различным рабочим ситуациям и обеспечивая дополнительную универсальность.

Сегменты выполнены преимущественно из полиуретана с использованием аддитивных технологий и химического литья, что сочетает высокую прочность и эластичность. Для снижения трения и повышения долговечности каждый сегмент содержит антифрикционные тефлоновые трубки, через которые проходят тросы управления. Такое решение существенно увеличивает срок службы элементов управления и улучшает кинематические характеристики.

Управление тросами осуществляется через моторы с намоткой лески на барабаны, что обеспечивает точное и быстрое позиционирование щупальца. Магнитные энкодеры обеспечивают обратную связь для контроля положения, что особенно важно при работе с деликатными и нестандартными объектами.

Основные технические параметры включают:

- модуль щупальца из 21 сегмента, по 2 степеням свободы на сегмент;
- возможность продольного растяжения/сжатия;
- применение полиуретановых материалов с антифрикционными элементами;
- управление тросами с обратной связью на основе магнитных энкодеров и измерения тока в обмотках моторов.

Параметры грузоподъемности, точности и скорости реакции варьируются в зависимости от конкретных условий эксплуатации и могут быть адаптированы под требования различных промышленных задач.

Экспериментальные результаты. Для оценки эффективности и рабочих характеристик разработанного тросового модуля были проведены комплексные экспериментальные испытания. В ходе тестов проверялись различные типы моторов, компоновок и обратных связей. Щупальце успешно продемонстрировало способность адаптироваться к захвату различных объектов сложной формы и размера благодаря большому количеству степеней свободы и сжатию сегментов.

Кроме того, применение антифрикционных тефлоновых трубок значительно снизило уровень трения и износа тросов, что было подтверждено испытаниями на долговечность, включающими более 85 000 рабочих циклов без существенного ухудшения рабочих характеристик.

Автоматизированное управление, основанное на математической модели и данных обратной связи, позволило обеспечить устойчивую и плавную работу щупальца, в том числе при выполнении комплексных манипуляций. Проведенное сравнительное тестирование с базовой конфигурацией, представленной в статье SpiRobs [4], выявило улучшение показателей по точности управления и ресурсу эксплуатации.

Данные эксперименты подтверждают целесообразность использования предложенной конструкции и управления для промышленных роботов, ориентированных на задачи с требованием высокой адаптивности и деликатного захвата.

Обсуждение полученных результатов. Результаты экспериментов демонстрируют, что предложенная конструкция тросового модуля обладает улучшенной маневренностью и адаптивностью. Использование полиуретановых материалов и антифрикционных тефлоновых трубок существенно повысило долговечность и снизило износ тросов, что решает одну из ключевых проблем классических тросовых роботов.

В то время как многие аналогичные схваты используют гидравлические или пневматические приводы для обеспечения силовых характеристик, такие системы требуют громоздкой и относительно шумной оснастки, включающей насосы, компрессоры и трубопроводы. Это значительно усложняет интеграцию таких роботов в ограниченные промышленные пространства и повышает требования к техническому обслуживанию.

В отличие от этого, тросовый привод, примененный в разработанном схвате, обеспечивает компактность, меньший уровень шума и более простую конструкцию, что облегчает эксплуатацию и снижает общие затраты. Такая архитектура особенно ценна для задач, требующих мобильности и гибкости, а также для применения в средах с ограничениями по шуму и габаритам оборудования. Этот фактор усиливает преимущества предложенного решения и расширяет потенциальный спектр областей, где оно может быть эффективно использовано.

Автоматизированная система управления, основанная на математической модели кинематики и обратной связи с магнитных энкодеров и тока двигателей, доказала свою эффективность в обеспечении точности и плавности движений. Однако текущий уровень автоматизации пока не использует потенциал компьютерного зрения и нейросетевых алгоритмов, что является перспективным направлением для дальнейших исследований и улучшений.

Несмотря на достигнутые успехи, существуют ограничения, связанные с максимальной нагрузкой и рабочей средой, которые требуют дальнейшей оптимизации материалов и управления, особенно для специфических промышленных условий. Таким образом, предложенный подход открывает но-

вые возможности для создания гибких и надежных схватов манипуляторов, которые могут найти широкое применение в промышленной робототехнике, медицине и сервисных роботах.

Заключение. Представленная конструкция прототипа модуля управления трехкабельным щупальцевым демонстрирует эффективность выбранных инженерных решений, включая применение тефлоновых трубок для снижения трения и оптимальное расположение электромоторов. Экспериментальные данные подтверждают возможность достижения высокой точности и отзывчивости управления модулем, что открывает перспективы для использования данной конструкции в робототехнических комплексах, требующих деликатного и надежного захвата. Дальнейшая работа будет сосредоточена на развитии модели управления с целью повышения адаптивности и устойчивости системы, а также на испытаниях с реальными объектами различной формы и массы. Полученные результаты могут стать основой для создания универсальных модулей гибких хватательных устройств следующего поколения.

Список источников

- [1] Cianchetti M. Design concept and validation of a robotic arm inspired by the octopus. *Materials Science and Engineering: C*, 2011, vol. 31, no. 6, pp. 1230–1239.
- [2] Kim S., Laschi C., Trimmer B. Soft robotics: a bioinspired evolution in robotics. *Trends in biotechnology*, 2013, vol. 31, no. 5, pp. 287–294.
- [3] Rus D., Tolley M.T. Design, fabrication and control of soft robots. *Nature*, 2015, vol. 521, no. 7553, pp. 467–475.
- [4] Wang Z., Freris N.M., Wei X. SpiRobs: Logarithmic spiral-shaped robots for versatile grasping across scales. *Device*, 2025, vol. 3, no. 4.
- [5] Wang Z., Freris N. M. Exploiting frictional effects to reproduce octopus-like reaching movements with a cable-driven spiral robot. *IEEE 7th International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*, 2024, pp. 537–542. <https://doi.org/10.1109/RoboSoft60065.2024.10522036>