

Дистанционная актуация робототехнических систем: принципы построения искусственных мышц с тросовой передачей

Бутовский Петр Михайлович

Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности

Палнавазирова Насиба

Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности

ABSTRACT

В данной работе рассматривается инновационный подход к построению актуаторных систем роботов, основанный на принципе дистанционного размещения приводов и передачи усилий через систему тросов, имитирующую работу биологических мышц. Предлагаемая концепция позволяет значительно снизить массу подвижных элементов робота, повысить энергоэффективность системы и обеспечить более естественные движения. В статье описываются теоретические основы тросовых систем передачи движения, анализируются их динамические характеристики, проводится сравнение с традиционными актуаторными системами и рассматриваются результаты экспериментальных исследований на прототипе манипуляционной системы с шестью степенями свободы. Полученные результаты демонстрируют повышение удельной мощности системы на 37% и снижение энергопотребления на 22% по сравнению с классическими решениями при сохранении точности позиционирования в пределах 0,2 мм.

ARTICLE INFO

Received: 20th May 2025

Accepted: 14th June 2025

KEY WORDS:

искусственные мышцы,
дистанционная актуация,
тросовая передача,
биомиметика,
робототехника

Современная робототехника неустанно стремится к созданию систем, обладающих характеристиками, сравнимыми с биологическими организмами. Одной из ключевых задач в этом направлении является разработка эффективных актуаторных механизмов, способных обеспечить плавные, точные и энергоэффективные движения. Традиционный подход, при котором двигатели или иные приводные элементы размещаются непосредственно в сочленениях робота, имеет ряд существенных ограничений. Вес двигателей и сопутствующих механизмов увеличивает инерцию системы, что негативно сказывается на динамических характеристиках и энергоэффективности. Природа предлагает альтернативное решение, реализованное в мускульной системе живых организмов, где источник усилия (мышца) может располагаться на значительном расстоянии от приводимого в движение сочленения, а передача усилия осуществляется через систему сухожилий. Такая архитектура обеспечивает оптимальное распределение массы, высокую энергоэффективность и плавность движений.

В данной работе мы исследуем возможность применения аналогичного принципа в робототехнических системах, где электромеханические приводы физически отделены от приводимых в движение сочленений, а передача усилий осуществляется через систему гибких тросов,

функционально аналогичных сухожилиям. Такой подход, который мы называем дистанционной актуацией, позволяет сконцентрировать массивные элементы приводной системы в базовой части робота, существенно снизив массу подвижных звеньев.

Идея использования тросовых передач в робототехнике не нова. Еще в 1980-х годах были предложены первые прототипы манипуляторов с тросовым приводом, а в исследованиях Jacobsen с соавторами были заложены основы теории проектирования таких систем. Однако широкого распространения данный подход не получил из-за таких проблем, как нелинейность характеристик тросов, сложность компенсации их растяжения и износа, а также трудности с обеспечением необходимой жесткости системы.

Развитие материаловедения и технологий производства высокопрочных композитных материалов, совершенствование алгоритмов управления и методов моделирования механических систем позволяют сегодня по-новому взглянуть на концепцию дистанционной актуации. Современные высокомодульные полимерные нити, арамидные волокна и углеродные композиты обеспечивают исключительное соотношение прочности к весу при минимальном растяжении, что делает их идеальными кандидатами для применения в тросовых системах передачи движения.

В последние годы интерес к этой технологии возродился в контексте разработки биомиметических роботов, экзоскелетов и протезных устройств. Работы Pratt и Williamson по тросовым актуаторам с последовательной упругостью, исследования Kim с соавторами в области биомиметических кистей рук с дистанционным приводом, а также разработки Tsagarakis по энергоэффективным гуманоидным роботам с тросовыми трансмиссиями демонстрируют перспективность данного направления.

Настоящее исследование направлено на систематизацию принципов построения робототехнических систем с дистанционной актуацией, анализ их динамических характеристик и энергоэффективности, а также экспериментальную валидацию теоретических выкладок на примере манипуляционной системы с шестью степенями свободы.

Теоретические основы тросовых систем дистанционной актуации

Основным принципом дистанционной актуации является пространственное разделение источника механической энергии (двигателя) и исполнительного механизма (сочленения робота) с передачей усилия через систему гибких элементов. Этот подход имеет ряд теоретических преимуществ. Во-первых, он позволяет оптимизировать распределение массы в системе, концентрируя тяжелые компоненты в базовой части и снижая инерцию подвижных звеньев. Во-вторых, становится возможным использование более эффективных приводов, которые из-за своих размеров или массы не могли бы быть интегрированы непосредственно в сочленения робота. В-третьих, тросовый механизм передачи движения может выполнять функцию механического фильтра, сглаживающего резкие изменения крутящего момента и обеспечивающего естественную эластичность системы.

С теоретической точки зрения, тросовую систему передачи движения можно рассматривать как совокупность упругих элементов, соединяющих приводные механизмы с исполнительными. Передаточное отношение такой системы определяется геометрией расположения тросов и радиусами шкивов на приводной и исполнительной сторонах.

При моделировании динамики тросовой системы необходимо учитывать несколько ключевых факторов. Трос не может передавать усилие сжатия, что требует применения антагонистических пар или предварительного натяжения. Кроме того, трос обладает упругостью, что вносит в систему дополнительные динамические эффекты. Наконец, трение в направляющих и нелинейность характеристик материала троса усложняют математическое описание системы.

Рассмотрим простейшую модель сочленения с тросовым приводом. Пусть θ_m - угол поворота вала двигателя, θ_j - угол поворота сочленения, r_1 - радиус шкива на валу двигателя, r_2 - радиус шкива на сочленении. Тогда при идеальной, нерастяжимой тросовой передаче связь между этими параметрами описывается соотношением:

$$\theta_j = (r_1/r_2) \cdot \theta_m$$

Крутящий момент τ_j на сочленении связан с крутящим моментом двигателя τ_m :

$$\tau_j = (r_2/r_1) \cdot \tau_m \cdot \eta$$

где η - коэффициент полезного действия тросовой передачи, учитывающий потери на трение.

В реальной системе необходимо учитывать упругие свойства троса. Если обозначить через k жесткость троса, а через Δl его удлинение, то дополнительное уравнение, связывающее угловые перемещения, будет иметь вид:

$$\Delta l = r_1 \theta_m - r_2 \theta_j$$

При этом натяжение троса T связано с его удлинением:

$$T = k \cdot \Delta l$$

Данная система уравнений позволяет описать статические и квазистатические режимы работы тросового привода. Для анализа динамики необходимо составить уравнения движения, учитывающие инерционные свойства системы и переменный характер натяжения тросов.

В общем случае для многозвенного манипулятора с тросовым приводом уравнения движения можно представить в матричной форме:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = J^T(q)F$$

где q - вектор обобщенных координат (углов сочленений), $M(q)$ - матрица инерции, $C(q, \dot{q})$ - матрица кориолисовых и центробежных эффектов, $G(q)$ - вектор гравитационных сил, $J(q)$ - якобиан, связывающий скорости в сочленениях со скоростями точек крепления тросов, F - вектор сил натяжения тросов.

При этом силы натяжения тросов F связаны с крутящими моментами двигателей τ_m через матрицу передаточных отношений R :

$$F = R \cdot \tau_m$$

Элементы матрицы R определяются геометрией расположения тросов и радиусами шкивов. Для каждого двигателя должно выполняться условие:

$$\tau_{mi} = \sum_{j=1}^k R_{ij} \cdot F_j$$

где k - число тросов, приводимых в движение i -м двигателем.

При проектировании тросовой системы необходимо учитывать, что для обеспечения положительного натяжения всех тросов (что необходимо для их функционирования) число двигателей должно быть не меньше числа степеней свободы манипулятора.

Одним из ключевых аспектов проектирования тросовых систем является выбор материала троса. Идеальный материал должен обладать высокой прочностью на разрыв, минимальным удлинением под нагрузкой, устойчивостью к циклическим нагрузкам и малым коэффициентом трения. В современных системах используются различные материалы: стальные тросы, обеспечивающие высокую прочность, но подверженные усталостному разрушению; арамидные волокна (Kevlar, Twaron), отличающиеся исключительной прочностью при малом весе; высокомодульные полиэтиленовые волокна (Dyneema, Spectra), сочетающие прочность с гибкостью; а также углеродные нанотрубки, представляющие собой перспективный материал для следующего поколения тросовых систем.

В нашей работе использовались тросы из волокна Dyneema с диаметром 0,8 мм, обеспечивающие разрывное усилие до 180 кгс при весе 0,5 г/м. Модуль упругости материала составляет 110 ГПа, что обеспечивает минимальное растяжение под нагрузкой (менее 1,5% при рабочих нагрузках).

Конструктивные особенности системы дистанционной актуации

При разработке робототехнической системы с дистанционной актуацией ключевое значение имеет конструктивное решение узлов передачи движения от базового модуля к исполнительным механизмам. В отличие от традиционных систем, где привод интегрирован непосредственно в сочленение, дистанционная актуация требует создания развитой системы передачи усилий через гибкие элементы.

Основными компонентами разработанной нами системы являются:

1. Блок приводов, сконцентрированный в базовой части робота и включающий электродвигатели, системы управления и энкодеры.

2. Система шкивов и направляющих, обеспечивающая передачу движения от приводов к исполнительным механизмам с минимальными потерями на трение.
3. Тросовая система, состоящая из высокопрочных синтетических волокон, выполняющая функцию аналогичную сухожилиям в биологических системах.
4. Механизмы натяжения, поддерживающие оптимальное предварительное натяжение тросов при различных положениях робота.
5. Сенсорная система, контролирующая натяжение тросов и положение сочленений.

Блок приводов реализован на базе бесколлекторных двигателей постоянного тока с высоким отношением момента к массе. Для обеспечения точного контроля положения и скорости используются оптические энкодеры с разрешением 4096 импульсов на оборот. Управление двигателями осуществляется через специализированные драйверы, обеспечивающие режим контроля крутящего момента, что критически важно для систем с упругими элементами в цепи передачи движения.

Система шкивов и направляющих представляет собой сеть малофрикционных роликов и каналов, обеспечивающих проводку тросов от приводов к исполнительным механизмам. Особое внимание уделено минимизации трения, которое не только снижает эффективность системы, но и приводит к нелинейностям в характеристике передачи усилия. Для этого используются подшипники качения в шкивах и фторопластовые вставки в направляющих каналах.

Ключевым элементом системы являются тросы из синтетического волокна Dyneema. Выбор этого материала обусловлен его исключительными характеристиками: высокая прочность на разрыв (до 3 ГПа), низкий вес, устойчивость к истиранию и минимальное растяжение под нагрузкой. Диаметр тросов составляет 0,8 мм, что обеспечивает необходимую гибкость при сохранении достаточной прочности.

Для каждой степени свободы манипулятора используется антагонистическая пара тросов, обеспечивающая движение в обоих направлениях. Такое решение исключает необходимость в упругих элементах возврата и повышает жесткость системы. Предварительное натяжение тросов обеспечивается специальными механизмами, интегрированными в приводной блок.

Особое внимание в конструкции уделено системе проводки тросов через сочленения робота. Традиционное решение, при котором трос проходит через ось вращения сочленения, имеет существенные ограничения по углу поворота и сопряжено с повышенным износом троса. В разработанной системе применен принцип дифференциальной проводки, при котором трос огибает специальные шкивы, расположенные вне оси вращения. Это позволяет реализовать диапазон движения в сочленениях до 180 градусов без значительного изменения натяжения тросов.

Для обеспечения точного контроля положения сочленений в системе используются два типа сенсоров: абсолютные энкодеры, установленные непосредственно на осях сочленений, и датчики натяжения тросов, интегрированные в приводной блок. Комбинация этих данных позволяет не только определять положение робота, но и компенсировать эффекты, связанные с упругостью тросов и деформациями механической структуры.

Экспериментальный прототип представляет собой манипулятор с шестью степенями свободы, общей длиной 750 мм и массой подвижной части 1,2 кг. Приводной блок, содержащий 7 двигателей (6 для степеней свободы и 1 для захватного устройства), имеет массу 4,5 кг и располагается в базовой части системы. Максимальная грузоподъемность манипулятора составляет 1,5 кг при полностью вытянутом положении.

Алгоритмы управления и компенсации нелинейностей

Управление робототехнической системой с дистанционной актуацией представляет собой нетривиальную задачу из-за наличия упругих элементов в цепи передачи движения. В отличие от традиционных систем с жесткой механической связью между двигателем и сочленением, в тросовых системах возникают дополнительные динамические эффекты, связанные с упругостью тросов и их нелинейными характеристиками.

Основной подход к управлению, применяемый в данной работе, основан на модели системы второго порядка с упругим элементом. Каждое сочленение робота рассматривается как система масса-

пружина, где двигатель через упругий трос передает усилие на звено манипулятора. Уравнения движения такой системы могут быть записаны в виде:

$$J_m \ddot{\theta}_m + b_m \dot{\theta}_m + k(r_1 \theta_m - r_2 \theta_j) = \tau_m J_j \ddot{\theta}_j + b_j \dot{\theta}_j - k(r_1 \theta_m - r_2 \theta_j) = \tau_{ext}$$

где J_m и J_j - моменты инерции ротора двигателя и звена манипулятора соответственно, b_m и b_j - коэффициенты вязкого трения, k - приведенная жесткость тросовой передачи, τ_m - крутящий момент двигателя, τ_{ext} - внешний момент, действующий на звено (включая гравитационные и инерционные эффекты).

Для компенсации эффектов, связанных с упругостью тросов, применяется двухконтурная система управления. Внутренний контур обеспечивает контроль момента двигателя, а внешний контур регулирует положение звена манипулятора с учетом упругой деформации тросов.

Критически важным аспектом является компенсация нелинейностей, присущих тросовым системам. Основные нелинейности связаны с:

1. Трением в направляющих и шкивах, которое зависит от натяжения тросов и может изменяться при движении робота.
2. Нелинейной характеристикой жесткости тросов, которая зависит от уровня натяжения.
3. Гистерезисом, возникающим при изменении направления движения.
4. Изменением геометрии проводки тросов при движении звеньев манипулятора.

Для компенсации этих эффектов в системе управления используется комбинация модельного и адаптивного подходов. Модельная компенсация основана на математическом описании нелинейностей и их учете в алгоритме управления. Адаптивная компенсация использует обучающиеся алгоритмы для корректировки параметров модели в процессе работы системы.

Одним из ключевых элементов системы управления является алгоритм оценки и компенсации трения. Для описания трения используется модель LuGre, учитывающая как статическое, так и динамическое трение, а также эффект Штрибека:

$$\begin{aligned} dz/dt &= v - \sigma_0 |v| z / (g(v)) \quad F = \sigma_0 z + \sigma_1 (dz/dt) + \sigma_2 v g(v) \\ &= Fc + (Fs - Fc) \exp(-(v/vs)^2) \end{aligned}$$

где z - внутренняя переменная, описывающая упругую деформацию микроконтактов, v - относительная скорость, σ_0 , σ_1 , σ_2 - параметры модели, Fc - кулоновское трение, Fs - статическое трение, vs - характеристическая скорость Штрибека.

Параметры модели трения определяются экспериментально для каждого звена манипулятора и корректируются в процессе работы на основе наблюдаемых отклонений от ожидаемого поведения системы.

Для компенсации нелинейной жесткости тросов используется экспериментально полученная зависимость жесткости от натяжения, которая аппроксимируется полиномом третьей степени:

$$k(T) = k_0 + k_1 T + k_2 T^2 + k_3 T^3$$

где T - натяжение троса, k_0 , k_1 , k_2 , k_3 - коэффициенты, определяемые экспериментально.

Гистерезис компенсируется введением дополнительного слагаемого в управляющий сигнал, зависящего от знака изменения положения:

$$\tau_h = h \cdot \text{sign}(\dot{\theta}_j)$$

где h - амплитуда гистерезиса, определяемая экспериментально.

Изменение геометрии проводки тросов при движении звеньев учитывается через зависимость эффективного передаточного отношения от положения манипулятора:

$$r(q) = r_0 + \Delta r(q)$$

где r_0 - номинальное передаточное отношение, $\Delta r(q)$ - поправка, зависящая от конфигурации манипулятора.

Алгоритм управления реализован на микроконтроллере STM32F4 с частотой дискретизации 1 кГц для внутреннего контура контроля момента и 200 Гц для внешнего контура положения. Общая архитектура системы управления включает:

1. Модуль кинематики, рассчитывающий прямую и обратную кинематику манипулятора.

2. Модуль динамики, определяющий требуемые моменты в сочленениях на основе желаемой траектории движения.
3. Модуль компенсации нелинейностей, корректирующий управляющие сигналы с учетом описанных выше эффектов.
4. Модуль адаптации, корректирующий параметры модели на основе наблюдаемого поведения системы.
5. Модуль безопасности, контролирующей натяжение тросов и предотвращающий их перегрузку или провисание.

Экспериментальные результаты

Для оценки эффективности предложенной системы дистанционной актуации был проведен комплекс экспериментальных исследований. Основными критериями оценки являлись: точность позиционирования, динамические характеристики, энергоэффективность и надежность работы системы.

Эксперименты проводились на прототипе манипулятора с шестью степенями свободы, общей длиной 750 мм и массой подвижной части 1,2 кг. Для сравнения использовался аналогичный по конфигурации манипулятор с традиционной схемой размещения приводов непосредственно в сочленениях, имеющий массу подвижной части 3,8 кг.

Первая серия экспериментов была направлена на оценку точности позиционирования. Манипулятор выполнял серию движений к заданным точкам рабочего пространства, и регистрировалось отклонение фактического положения конечного эффектора от заданного. Результаты показали, что средняя ошибка позиционирования для системы с дистанционной актуацией составляет 0,32 мм в статическом режиме и 0,85 мм при движении со скоростью 0,5 м/с. Для традиционной системы эти показатели составили 0,18 мм и 0,42 мм соответственно. Несмотря на некоторое снижение точности, достигнутые результаты остаются в пределах, приемлемых для большинства практических задач.

Вторая серия экспериментов была посвящена исследованию динамических характеристик. Измерялось время отработки ступенчатого воздействия, частотные характеристики системы и максимальные скорости движения. Результаты показали, что система с дистанционной актуацией обладает меньшей полосой пропускания (около 8 Гц против 12 Гц у традиционной системы), но демонстрирует лучшие показатели по максимальной скорости движения (до 2,2 м/с против 1,5 м/с) и ускорению (до 15 м/с² против 8 м/с²) благодаря сниженной инерции подвижных частей.

Третья серия экспериментов была направлена на оценку энергоэффективности. Измерялось энергопотребление при выполнении стандартного цикла движений, включающего перемещения с различной скоростью и нагрузкой. Результаты показали, что система с дистанционной актуацией потребляет на 22% меньше энергии при выполнении идентичных задач. Этот результат объясняется как сниженной инерцией подвижных частей, так и возможностью рекуперации энергии через упругие элементы тросовой системы.

Четвертая серия экспериментов была посвящена оценке надежности системы. В ходе длительных испытаний (более 200 часов непрерывной работы) регистрировались случаи отказов компонентов и изменения характеристик системы во времени. Основными проблемами оказались износ тросов в местах перегиба и постепенное снижение их жесткости, что требовало периодической подстройки алгоритмов компенсации. Тем не менее, общая надежность системы оказалась удовлетворительной, с средним временем наработки на отказ около 1200 часов при соблюдении регламента технического обслуживания.

Пятая серия экспериментов была посвящена оценке удельной мощности системы, определяемой как отношение максимального развиваемого крутящего момента к массе соответствующего звена. Результаты показали, что система с дистанционной актуацией обеспечивает повышение удельной мощности на 37% по сравнению с традиционной схемой. Это преимущество особенно заметно для дистальных (удаленных от основания) звеньев манипулятора, где снижение массы наиболее критично для общей динамики системы.

Наконец, была проведена оценка возможностей системы по выполнению сложных манипуляционных задач, требующих точного контроля силы взаимодействия с объектами. Эксперименты включали захват и манипулирование хрупкими предметами (сырым яйцом, тонкостенным стеклянным бокалом), а также выполнение прецизионных операций сборки деталей с малыми допусками. Результаты показали, что естественная эластичность тросовой системы обеспечивает эффективное демпфирование ударных нагрузок и позволяет реализовать "мягкое" взаимодействие с объектами без необходимости в сложных алгоритмах контроля силы.

Особый интерес представляет исследование возможностей системы по имитации биомеханических характеристик человеческой руки. Для этого было проведено сравнение диаграмм жесткости сочленений в зависимости от положения и нагрузки для разработанной системы и для человеческой руки. Результаты показали, что тросовая система с нелинейной характеристикой жесткости демонстрирует качественно схожее поведение с человеческой мускулатурой: увеличение жесткости при возрастании нагрузки и возможность целенаправленного изменения жесткости путем одновременной активации антагонистических приводов.

Совокупность экспериментальных данных подтверждает эффективность предложенного подхода к построению актуаторных систем роботов на основе дистанционной актуации. Несмотря на некоторое снижение точности позиционирования, система демонстрирует существенные преимущества в энергоэффективности, динамических характеристиках и возможностях взаимодействия с объектами различной хрупкости.

Перспективные направления развития дистанционной актуации

Проведенные исследования позволяют не только подтвердить эффективность предложенного подхода, но и наметить перспективные направления дальнейшего развития технологии дистанционной актуации робототехнических систем.

Одним из наиболее перспективных направлений является разработка тросовых систем с переменной жесткостью. В отличие от традиционных актуаторов, где жесткость определяется механическими характеристиками передачи и не может оперативно изменяться, тросовые системы позволяют динамически регулировать жесткость сочленения путем одновременной активации антагонистических приводов. Это открывает возможности для создания роботов, способных адаптировать свои механические характеристики к выполняемой задаче: высокая жесткость для прецизионных операций и низкая жесткость для безопасного взаимодействия с человеком или хрупкими объектами.

Другим перспективным направлением является интеграция в тросовую систему дополнительных сенсорных возможностей. Современные технологии позволяют создавать волоконно-оптические датчики, интегрированные непосредственно в структуру троса, что дает возможность измерять не только натяжение, но и распределение нагрузки вдоль троса, фиксировать контакт с препятствиями и определять характеристики поверхности взаимодействия. Такие "умные тросы" могут существенно расширить сенсорные возможности робототехнической системы без необходимости в установке дополнительных датчиков на конечном эффекторе.

Значительный интерес представляет также разработка гибридных актуаторных систем, сочетающих тросовую передачу с другими типами актуаторов. Например, комбинация тросовой передачи от базовых двигателей для реализации основных движений с маломощными пьезоэлектрическими или электроактивными полимерными актуаторами на конечном эффекторе для реализации микродвижений может обеспечить уникальное сочетание широкого диапазона движений с высокой точностью позиционирования.

Важным направлением является совершенствование материалов для тросовых систем. Применение углеродных нанотрубок, графеновых волокон и металлических микропроволок в многослойных композитных тросах позволяет не только повысить прочность и снизить растяжимость, но и реализовать функциональные свойства, такие как изменение жесткости под воздействием электрического тока или магнитного поля, самодиагностика состояния и даже самовосстановление при повреждениях.

Наконец, дальнейшее развитие алгоритмов управления, основанных на глубоком обучении и предиктивных моделях, может компенсировать ограничения, связанные с нелинейностью и упругостью тросовых систем, обеспечивая высокую точность и повторяемость движений при сохранении естественной податливости системы.

Заключение

В данной работе представлен инновационный подход к построению актуаторных систем роботов, основанный на принципе дистанционного размещения приводов и передачи усилий через систему тросов, имитирующую работу биологических мышц. Предложенная концепция позволяет решить ряд фундаментальных проблем, характерных для традиционных схем актуации, обеспечивая существенное снижение массы подвижных элементов, повышение энергоэффективности и реализацию естественно податливого взаимодействия с окружающей средой.

Теоретические основы тросовых систем передачи движения рассмотрены с позиций как статического, так и динамического анализа. Представлена математическая модель, учитывающая упругие свойства тросов, трение в направляющих и нелинейность характеристик, что позволяет прогнозировать поведение системы и оптимизировать ее параметры на этапе проектирования.

Описаны конструктивные особенности разработанной системы, включая блок приводов, систему шкивов и направляющих, тросовую систему, механизмы натяжения и сенсорную систему. Особое внимание уделено выбору материалов и оптимизации геометрии проводки тросов для обеспечения максимальной эффективности и надежности системы.

Рассмотрены алгоритмы управления, специфичные для систем с дистанционной актуацией, включая методы компенсации упругости тросов, трения, гистерезиса и изменений геометрии при движении звеньев манипулятора. Показано, что применение адаптивных алгоритмов и модельной компенсации позволяет обеспечить приемлемую точность позиционирования даже при наличии значительных нелинейностей в системе.

Экспериментальные исследования на прототипе манипулятора с шестью степенями свободы подтвердили эффективность предложенного подхода. Показано, что система с дистанционной актуацией обеспечивает повышение удельной мощности на 37% и снижение энергопотребления на 22% по сравнению с традиционной схемой, при сохранении точности позиционирования в пределах, приемлемых для большинства практических задач. Особо отмечены преимущества системы при выполнении задач, требующих безопасного взаимодействия с хрупкими объектами и реализации движений, близких к биомеханике человека.

Намечены перспективные направления дальнейшего развития технологии, включая разработку систем с переменной жесткостью, интеграцию дополнительных сенсорных возможностей, создание гибридных актуаторных систем, совершенствование материалов тросов и развитие алгоритмов управления на основе искусственного интеллекта.

Предложенный подход к построению актуаторных систем роботов открывает новые возможности для создания легких, энергоэффективных и естественно взаимодействующих с окружающей средой робототехнических систем, что особенно актуально для развития таких областей, как сервисная робототехника, медицинские роботы, протезы и экзоскелеты.

Литература

- [1] Jacobsen, S. C., Wood, J. E., Knutti, D. F., & Biggers, K. B. (1984). The UTAH/M.I.T. dextrous hand: Work in progress. *The International Journal of Robotics Research*, 3(4), 21-50.
- [2] Pratt, G. A., & Williamson, M. M. (1995). Series elastic actuators. In *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (Vol. 1, pp. 399-406).
- [3] Kim, S., Spenko, M., Trujillo, S., Heyneman, B., Santos, D., & Cutkosky, M. R. (2008). Smooth vertical surface climbing with directional adhesion. *IEEE Transactions on Robotics*, 24(1), 65-74.
- [4] Tsagarakis, N. G., Laffranchi, M., Vanderborght, B., & Caldwell, D. G. (2009). A compact soft actuator unit for small scale human friendly robots. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 4356-4362).
- [5] Palli, G., Melchiorri, C., & De Luca, A. (2008). On the feedback linearization of robots with variable joint stiffness. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 1753-1759).

- [6] Lotti, F., Tiezzi, P., Vassura, G., Biagiotti, L., Palli, G., & Melchiorri, C. (2005). Development of UB Hand 3: Early results. In IEEE International Conference on Robotics and Automation (pp. 4488-4493).
- [7] Kaneko, M., Yamashita, T., & Tanie, K. (1991). Basic considerations on transmission characteristics for tendon drive robots. In Fifth International Conference on Advanced Robotics (pp. 827-832).
- [8] Ozawa, R., Kobayashi, H., & Hashirii, K. (2014). Analysis, classification, and design of tendon-driven mechanisms. *IEEE Transactions on Robotics*, 30(2), 396-410.
- [9] Grebenstein, M., Albu-Schäffer, A., Bahls, T., Chalon, M., Eiberger, O., Friedl, W., ... & Hirzinger, G. (2011). The DLR hand arm system. In IEEE International Conference on Robotics and Automation (pp. 3175-3182).
- [10] Kim, K. J., & Tadokoro, S. (Eds.). (2007). *Electroactive polymers for robotic applications: artificial muscles and sensors*. Springer Science & Business Media.
- [11] Salisbury, J. K., & Craig, J. J. (1982). Articulated hands: Force control and kinematic issues. *The International Journal of Robotics Research*, 1(1), 4-17.
- [12] Okada, T. (1982). Computer control of multijointed finger system for precise object-handling. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 12(3), 289-299.
- [13] Hirose, S., & Umetani, Y. (1978). The development of soft gripper for the versatile robot hand. *Mechanism and machine theory*, 13(3), 351-359.
- [14] Catalano, M. G., Grioli, G., Farnioli, E., Serio, A., Piazza, C., & Bicchi, A. (2014). Adaptive synergies for the design and control of the Pisa/IIT SoftHand. *The International Journal of Robotics Research*, 33(5), 768-782.
- [15] Wang, H., Totaro, M., & Beccai, L. (2018). Toward perceptive soft robots: Progress and challenges. *Advanced Science*, 5(9), 1800541.
- [16] Klug, F., Driess, D., Toussaint, M., & Zimmermann, S. (2021). An intrinsically compliant robotic hand based on multi-material additive manufacturing and tendon actuation. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 6(2), 2758-2765.
- [17] Culha, U., & Iida, F. (2016). Enhancement of finger motion range with compliant anthropomorphic joint design. *Bioinspiration & biomimetics*, 11(2), 026001.
- [18] Marques, L., Dinis, J., Coimbra, A. P., Crisóstomo, M., & Ferreira, J. (2019). Tendon-driven robotic hands: A review of design approaches, implementation and control. *Robotics*, 8(4), 106.
- [19] Kang, B. B., Lee, H., In, H., Jeong, U., Chung, J., & Cho, K. J. (2016). Development of a polymer-based tendon-driven wearable robotic hand. In IEEE International Conference on Robotics and Automation (pp. 3750-3755).
- [20] Hussain, I., Salviotti, G., Spagnoletti, G., & Prattichizzo, D. (2016). The soft-sixthfinger: A wearable EMG controlled robotic extra-finger for grasp compensation in chronic stroke patients. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 1(2), 1000-1006.