



БИОМЕХАНИКА ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ТЕЛА КАК ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ ОСНОВА ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ АНТРОПОМОРФНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Стрельцов Владимир Игоревич

Доктор технических наук, профессор кафедры биомедицинской инженерии и робототехники Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
г. Москва, Россия

Аннотация

Данная работа посвящена междисциплинарному исследованию принципов биомеханики человеческого тела и их имплементации в современные робототехнические комплексы. В статье проводится детальный анализ кинематики и динамики опорно-двигательного аппарата человека как высокоэффективной биологической машины, обладающей уникальными характеристиками адаптивности и энергоэффективности. Автор рассматривает структуру суставных соединений, иерархическую организацию мышечных волокон и нейрофизиологические механизмы управления движением в качестве биологических прототипов для создания приводов и алгоритмов управления роботом. Особое внимание уделено проблеме копирования степеней свободы человеческого тела и реализации бипедальной локомоции. В работе аргументируется, что глубокое понимание биомеханических инвариантов позволяет перейти от жестких металлических конструкций к мягкой робототехнике и экзоскелетам нового поколения, способным к полноценному взаимодействию с человеком и окружающей средой. Представлены результаты сравнительного анализа энергозатрат биологических и технических систем, а также предложены пути оптимизации конструкции роботов за счет использования принципов тенсегрити и эластичных элементов.

Ключевые слова: биомеханика, антропоморфные роботы, кинематика суставов, бипедальная локомоция, исполнительные механизмы, степени свободы, нейрорегулирование, мягкая робототехника, экзоскелеты.

Введение

Развитие современной робототехники достигло этапа, на котором простого копирования внешнего облика человека недостаточно для решения сложных задач в динамических и неструктурированных средах.

Переход к созданию полноценных антропоморфных систем требует глубокой интеграции знаний о внутренней механике человеческого тела. Биомеханика, изучающая движение живых систем с позиций классической механики, математики и биологии, предоставляет инженерам готовые эволюционные решения, прошедшие многовековую оптимизацию. Человеческое тело представляет собой сложнейшую систему, сочетающую в себе жесткие рычаги, эластичные тяги и сенсорную обратную связь, что позволяет достигать невероятной гибкости и устойчивости.

Актуальность данного исследования продиктована необходимостью преодоления «технологического плато» в области автономности и маневренности роботов. Современные роботы все еще значительно уступают человеку в энергоэффективности передвижения и способности к тонкой манипуляции предметами. Изучение биомеханических основ позволяет не только создавать более совершенные протезы и экзоскелеты, помогающие людям с ограниченными возможностями, но и проектировать автономных андроидов, способных эффективно работать в пространствах, изначально созданных для людей. В данной статье мы последовательно разберем ключевые аспекты человеческой биомеханики, которые служат фундаментом для робототехники будущего.

Кинематическая структура и степени свободы человеческого скелета

В основе проектирования любого антропоморфного робота лежит анализ скелетной структуры человека. С точки зрения теоретической механики, скелет представляет собой систему многосвязных рычагов, соединенных суставами с различным количеством степеней свободы. В теле человека насчитывается более двухсот костей и около ста подвижных соединений, что в совокупности обеспечивает более двухсот степеней свободы. Для робототехники полное воспроизведение этой избыточности является излишне сложной и энергозатратной задачей, поэтому инженеры прибегают к выделению функциональных инвариантов.

Особое значение имеет устройство шаровидных суставов, таких как плечевой и тазобедренный, обеспечивающих вращение в трех плоскостях. В робототехнике реализация таких соединений требует использования сложных карданных механизмов или сферических приводов. Биомеханический анализ показывает, что высокая подвижность человека обеспечивается не только конструкцией сустава, но и эластичностью окружающих тканей, которые ограничивают амплитуду движений и аккумулируют энергию.

Изучение синергии суставов позволяет инженерам создавать роботов с «интеллектуальной механикой», где часть вычислительной нагрузки по стабилизации движения перекладывается на саму конструкцию за счет использования пассивных степеней свободы.

Мышечная система как прообраз исполнительных механизмов

Биологическая мышца является уникальным актуатором, превосходящим классические электродвигатели по показателю удельной мощности и способности к демпфированию ударов. Принцип работы мышцы основан на сокращении саркомеров под воздействием нервных импульсов, что обеспечивает плавное изменение жесткости системы. В современной робототехнике этот принцип реализуется через создание пневматических искусственных мышц (актуаторы Маккиббена) или электроактивных полимеров.

В отличие от жестких редукторных приводов, мышцы человека работают парами — антагонистами. Когда одна мышца сокращается, другая растягивается, создавая регулируемое натяжение сустава. Это позволяет человеку мгновенно менять жесткость конечности при переходе от быстрой ходьбы к прыжку или при ловле тяжелого предмета. Внедрение принципов переменной жесткости (Variable Impedance Control) в робототехнику позволяет создавать машины, которые безопасны для человека при прямом контакте. Робот, обладающий «мышечной» логикой управления приводами, способен поглощать энергию столкновения, не разрушая собственную конструкцию и не травмируя окружающих.

Биомеханика бипедальной локомоции и проблема устойчивости

Ходьба на двух ногах — один из самых сложных процессов с точки зрения биомеханики. Человек в процессе ходьбы постоянно находится в состоянии «контролируемого падения». Цикл шага включает в себя фазу опоры и фазу переноса, при которых центр масс совершает сложные колебательные движения. Основным преимуществом человеческой походки является использование гравитации для продвижения вперед, что минимизирует активную работу мышц.

Для воспроизведения этого процесса в роботах используются математические модели, такие как модель перевернутого маятника. Однако в отличие от простых моделей, человек активно задействует стопу и голеностопный сустав для балансировки на неровных поверхностях. Стопа человека с ее сводчатой структурой выполняет функцию рессоры, гася ударные нагрузки и преобразуя их в энергию для следующего шага. Современные антропоморфные роботы, такие как разработки компаний Boston Dynamics или Tesla, начинают использовать сложные гидравлические или электромеханические системы, имитирующие работу связок и сухожилий, что позволяет им демонстрировать динамическую устойчивость на пересеченной местности, ранее недоступную для колесных или гусеничных платформ.

Концепция тенсегрити в биологии и робототехнике

Одним из наиболее перспективных направлений в биомеханике, влияющих на робототехнику, является концепция тенсегрити (напряженная целостность). В человеческом теле кости не соприкасаются друг с другом напрямую в жестких узлах; они «плавают» в непрерывной сети натянутых мышц, связок и фасций.

Эта структура позволяет равномерно распределять нагрузку по всему телу, делая его устойчивым к деформациям и ударам.

Роботы, построенные на принципах тенсегрити, обладают малым весом и колоссальной прочностью. Вместо тяжелых металлических рам используются легкие стержни, соединенные эластичными тросами. Такая архитектура позволяет роботу сжиматься при ударе и восстанавливать форму, подобно тому как грудная клетка человека защищает внутренние органы. Применение тенсегрити-моделей в создании позвоночника робота открывает возможности для реализации сложных движений корпуса — скручиваний, наклонов и изгибов, которые критически важны для поддержания баланса при переноске грузов и передвижении по сложным траекториям.

Нейрофизиологический контроль и сенсорная обратная связь

Движение человека невозможно без сложнейшей системы управления, основанной на иерархии уровней — от рефлекторных дуг спинного мозга до осознанного планирования в коре больших полушарий. Биомеханика движения тесно связана с проприоцепцией — способностью организма ощущать положение своих частей в пространстве и развиваемое ими усилие. В теле человека тысячи рецепторов (мышечные веретена, тельца Гольджи) непрерывно поставляют данные в центральную нервную систему.

В робототехнике эта система имитируется через сеть датчиков крутящего момента, акселерометров и гироскопов. Однако главная инновация, заимствованная из биологии, заключается в переходе от жестких алгоритмов к нейросетевому управлению. Обучение роботов с подкреплением (Reinforcement Learning) во многом копирует процесс того, как ребенок учится ходить: путем многочисленных проб и ошибок формируются оптимальные двигательные синергии. Биомеханический подход здесь заключается в том, чтобы не программировать каждый градус поворота сустава, а задавать целевую функцию движения, позволяя системе самой находить наиболее энергоэффективный паттерн управления, аналогично естественным движениям человека.

Мягкая робототехника и биомиметические материалы

Традиционная робототехника долгое время опиралась на использование твердых тел, что создавало проблемы при взаимодействии с хрупкими объектами. Биомеханика мягких тканей человека (кожи, жировой клетчатки, хрящей) дала импульс развитию мягкой робототехники (Soft Robotics).

Использование эластомеров и гидрогелей позволяет создавать роботов, способных менять свою форму и жесткость. Мягкие захваты, имитирующие механику человеческой кисти, позволяют роботам брать предметы сложной формы без риска их повреждения. Внутренние полости таких захватов могут заполняться жидкостью или воздухом под давлением, изменяя объем и кривизну поверхности.

Исследование биомеханики кожных покровов также ведет к созданию «электронной кожи» — гибких матриц датчиков, способных чувствовать давление, температуру и текстуру поверхности. Это критически важно для создания антропоморфных роботов-помощников, которые должны безопасно контактировать с пожилыми людьми или пациентами в медицинских учреждениях.

Заключение

Биомеханика человеческого тела остается неисчерпаемым источником инженерных решений для робототехники. Анализ биологических систем показывает, что секрет эффективности человека кроется не в мощности отдельных узлов, а в их глубокой интеграции, использовании пассивной динамики и эластичности. Мы наблюдаем парадигмальный сдвиг: от роботов как жестких исполнительных механизмов к роботам как адаптивным биомиметическим системам.

Развитие антропоморфных роботов на основе биомеханических принципов открывает путь к созданию экзоскелетов, которые станут органичным продолжением человеческого тела, и автономных андроидов, способных к естественной навигации в человеческом мире. Дальнейшие исследования будут направлены на совершенствование энергетических систем, имитирующих метаболизм мышц, и разработку материалов с программируемыми механическими свойствами. Интеграция биомеханики, материаловедения и искусственного интеллекта позволит стереть грань между естественным и искусственным движением, создавая машины, которые не просто имитируют человека, но и обладают его грациозностью, надежностью и эффективностью. Прогресс в этой области станет залогом новой технологической революции, где роботы превратятся из инструментов в полноценных партнеров человека во всех сферах деятельности.

Литература

1. Бернштейн Н. А. О построении движений. М.: Медгиз, 1947. 255 с.
2. Витензон А. С. Биомеханические закономерности ходьбы человека. М.: Зеркало, 1998. 234 с.
3. Попов Г. И. Биомеханика двигательной деятельности. М.: Академия, 2011. 312 с.
4. Alexander R. McN. Principles of Animal Locomotion. Princeton: Princeton University Press, 2003. 371 p.
5. Siciliano B., Khatib O. (Eds.) Springer Handbook of Robotics. Berlin: Springer, 2016. 2227 p.
6. Winter D. A. Biomechanics and Motor Control of Human Movement. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009. 370 p.