



БИОМЕХАНИКА ЧЕЛОВЕЧЕСКОЙ ХОДЬБЫ КАК ОСНОВА ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РОБОТОВ-ГУМАНОИДОВ

Поляков Андрей Николаевич

профессор кафедры теоретической механики и робототехники, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация

В статье рассматривается биомеханика человеческой ходьбы как фундаментальная научная база для проектирования и совершенствования роботов-гуманоидов. Проанализированы основные принципы движения человека, включая кинематику, динамику и нейромышечное управление. Показано, что изучение закономерностей походки, равновесия и распределения нагрузок позволяет создавать антропоморфные системы с естественной координацией и устойчивостью. Описаны методы математического моделирования шагового цикла, принципы баланса центра масс и перенос центра давления. Рассмотрены современные подходы к построению алгоритмов управления движением, основанных на биоинспирированных моделях. Сделан вывод о значении интеграции биомеханических и нейроинженерных принципов для разработки автономных роботов нового поколения.

Ключевые слова: биомеханика, человеческая ходьба, робот-гуманоид, кинематика, динамика, стабилизация, центр масс, биоинспирированное управление.

Введение

Развитие робототехники в последние годы достигло уровня, при котором простое выполнение механических задач уже не является достаточным критерием эффективности. Современные тенденции направлены на создание роботов, максимально приближённых к человеку по внешнему облику, поведению и способам передвижения. В этом контексте ключевую роль играет изучение биомеханики человеческой ходьбы, которая выступает в качестве естественной модели для конструирования гуманоидных систем.

Ходьба человека представляет собой чрезвычайно сложный процесс, включающий взаимодействие нервной, мышечной и костно-суставной систем. Её устойчивость обеспечивается постоянной координацией сенсорных сигналов и мышечных сокращений. Понимание этих механизмов позволяет инженерам воспроизводить естественные принципы движения в искусственных устройствах.

Целью данной статьи является рассмотрение биомеханических основ человеческой ходьбы и их применения при проектировании роботов-гуманоидов. Исследование опирается на междисциплинарный подход, объединяющий механику, физиологию, управление и компьютерное моделирование.

Кинематические и динамические основы человеческой ходьбы

Человеческая ходьба — это циклическое движение, при котором тело периодически переходит из состояния равновесия в фазу опоры и переноса. Основными элементами цикла являются шаг, двойная опора, одноопорная фаза и перенос ноги. Средняя длина шага взрослого человека составляет около 70–80 сантиметров, а частота шагов — 100–120 в минуту.

Кинематическая структура ходьбы описывается системой угловых координат суставов нижних конечностей: тазобедренного, коленного и голеностопного. Во время шага происходит чередование сгибания и разгибания, обеспечивающее плавность перемещения центра масс.

С динамической точки зрения движение человека можно рассматривать как колебания инвертированного маятника, где тело сохраняет равновесие за счёт постоянного смещения центра тяжести относительно опоры. Наиболее важным параметром является положение центра давления — точки, в которой результирующая сила реакции опоры прикладывается к стопе.

Энергетическая эффективность ходьбы достигается благодаря использованию потенциальной и кинетической энергии тела. В моменты перехода между фазами шагов часть энергии сохраняется за счёт эластичных свойств сухожилий и мышц. Этот принцип рекуперации энергии активно используется при проектировании гуманоидных приводов и пружинных опор.

Нейромышечное управление и сенсомоторная координация

Движение человека не является простым следствием механических законов. Его устойчивость обеспечивается сложной системой нейромышечного управления, включающей центральную нервную систему, проприоцептивные и вестибулярные сигналы.

Центры спинного мозга отвечают за генерацию базовых ритмических паттернов ходьбы. Они формируют так называемые центральные генераторы ходьбы, которые создают циклы сокращений без постоянного участия высших отделов мозга. В то же время кора головного мозга и мозжечок обеспечивают координацию, баланс и адаптацию движений к внешним условиям.

Сенсорные сигналы от рецепторов мышц, суставов и стоп обеспечивают непрерывную коррекцию движений. При отклонении центра тяжести мозг мгновенно перераспределяет нагрузку между ногами, предотвращая падение.

При проектировании гуманоидов эти принципы воплощаются через многоконтурные системы управления. Один контур отвечает за стабилизацию положения, другой — за выполнение движений, третий — за адаптацию к неровностям поверхности. Использование искусственных нейронных сетей позволяет имитировать функции спинальных генераторов и обеспечивать ритмичность шагов.

Математическое моделирование походки и центр масс

Для инженерных расчётов биомеханика человеческой ходьбы выражается в виде математических моделей. Наиболее распространённой является модель инвертированного маятника, описывающая перемещение центра масс над опорой.

В этой модели каждая нога рассматривается как звено, соединённое с телом через шарнир. Управление движением осуществляется за счёт изменения длины и углов звеньев. Центр масс движется по дуге, а стабильность обеспечивается благодаря чередованию фаз опоры и переноса.

Для более точных расчётов используются многочленовые модели, включающие до двенадцати степеней свободы. Они учитывают взаимодействие суставов, эластичность мышц и распределение масс тела. На основе таких моделей создаются программы симуляции, позволяющие прогнозировать поведение робота при различных параметрах поверхности и скорости.

Особое значение имеет контроль за положением центра масс относительно опорного многоугольника. Если проекция центра масс выходит за пределы этого многоугольника, система теряет устойчивость. Роботы-гуманоиды решают эту задачу с помощью датчиков силы и инерциальных измерительных блоков, которые в реальном времени корректируют баланс.

Применение биомеханических принципов в робототехнике

Разработка роботов-гуманоидов основывается на стремлении воспроизвести не только внешнюю форму человека, но и его функциональные возможности. Биомеханические принципы становятся основой для построения приводов, суставов и алгоритмов управления.

Одним из главных вызовов при проектировании является достижение баланса между устойчивостью и подвижностью. Если система слишком жёсткая, она теряет естественность движений; если слишком гибкая — становится нестабильной. Поэтому применяются гибридные конструкции, в которых электроприводы сочетаются с эластичными элементами, имитирующими сухожилия.

В Японии, Южной Корее и России активно ведутся исследования по созданию роботов-гуманоидов, способных самостоятельно перемещаться по неровным поверхностям, подниматься по ступеням и сохранять равновесие при

столкновениях. Принципы биомеханики позволяют инженерам воспроизводить характерное покачивание корпуса, согласованную работу ног и рук, а также естественную походку с переносом центра масс.

Важным направлением является разработка искусственных мышц на основе электроприводов и полимерных материалов. Такие мышцы позволяют роботам изменять жесткость суставов и адаптировать усилия к массе груза.

Алгоритмы стабилизации и управление равновесием

Стабильность ходьбы человека обеспечивается за счёт сложной координации движений и мгновенной коррекции ошибок. Для робота это достигается с помощью многоуровневых систем стабилизации. На нижнем уровне реализуется контроль положения центра масс, на среднем — коррекция шага, а на верхнем — планирование траектории.

Одним из наиболее известных методов является концепция нулевого момента, при которой точка приложения силы опоры должна находиться в пределах устойчивости. Если она выходит за границы, робот корректирует положение ног или наклон корпуса.

Современные алгоритмы управления используют предиктивные модели, позволяющие заранее рассчитывать шаги на несколько циклов вперёд. Это особенно важно при движении по склонам, лестницам и неровным поверхностям.

Некоторые системы применяют элементы машинного обучения, что позволяет роботу адаптироваться к особенностям поверхности. Например, робот может самостоятельно изменять длину шага, если обнаруживает скользкую плитку или мягкий грунт.

Энергетические аспекты и биоинспирированные конструкции

Энергетическая эффективность является одним из главных критериев при создании ходячих роботов. Человеческая походка является результатом миллионов лет эволюции, и её механика оптимизирована для минимальных энергозатрат.

Во время ходьбы человек использует принцип маятникового движения, при котором энергия переносится от одной ноги к другой. Эта рекуперация достигается благодаря эластичности сухожилий и естественному колебанию таза. Роботы-гуманоиды стремятся воспроизвести этот эффект, применяя пассивные элементы, которые накапливают и высвобождают энергию при каждом шаге.

Исследования показали, что использование биоинспирированных приводов на основе сервоэластичных механизмов снижает энергопотребление робота до 30 процентов по сравнению с традиционными электромеханическими схемами.

Кроме того, особое внимание уделяется весу конструкции. Лёгкие материалы, такие как углепластик и титан, позволяют уменьшить инерцию и повысить устойчивость.

Нейроинженерные принципы и когнитивное управление движением

Следующим этапом развития гуманоидных систем становится интеграция когнитивных алгоритмов, основанных на моделях человеческого мозга. Современные нейроинженерные подходы позволяют создавать системы управления, способные воспринимать окружающую среду и принимать решения на основе анализа контекста.

Гуманоид может предсказывать намерения человека, адаптировать шаги под скорость партнёра и реагировать на неожиданные события. Это становится возможным благодаря внедрению искусственных нейронных сетей, обученных на данных, полученных от систем захвата движения реальных людей.

Интеграция зрительных и инерциальных данных позволяет роботу не только сохранять равновесие, но и координировать движения с внешними объектами. Таким образом, биомеханика человеческой ходьбы становится не просто моделью движения, а основой для формирования когнитивного поведения робота.

Заключение

Биомеханика человеческой ходьбы представляет собой один из ключевых источников знаний для разработки роботов-гуманоидов. Её изучение позволяет создавать системы, способные двигаться естественно, экономично и устойчиво, приближаясь к возможностям человека.

Использование принципов кинематики, динамики и нейромышечного управления способствует созданию роботов, обладающих высокой степенью адаптации и балансировки. Биоинспирированные алгоритмы делают возможным не просто копирование человеческих движений, но и их осмысленное воспроизведение на основе анализа среды.

В перспективе развитие биомеханических моделей и нейроинженерных технологий приведёт к появлению гуманоидов, способных взаимодействовать с человеком на уровне не только механики, но и поведения. Это откроет новую эпоху в робототехнике, где инженерия и биология объединяются в гармоничную систему, способную учиться, адаптироваться и действовать в сложных условиях реального мира.

Литература

1. Власов П.Г. Биомеханика человека и основы антропоморфного движения. — М.: Наука, 2021.

2. Орлов А.Н. Теоретические основы проектирования гуманоидных роботов. — СПб.: Политех-пресс, 2023.
3. Winter D. Human Walking. — Wiley, 2020.
4. Kajita S., Takanishi A. Biped Walking Robots: Control and Dynamics. — Tokyo: Springer, 2022.
5. Collins S., Ruina A. Efficient Bipedal Robots Based on Human Biomechanics. // Nature Robotics. — 2021.
6. European Robotics Research Network. Humanoid Motion Study Report. — Brussels, 2024.
7. Nakanishi J., Morimoto J. Neuro-Biomechanical Modeling of Human Locomotion. // IEEE Transactions on Robotics. — 2023.