
**БИОМЕХАНИКА ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ДВИЖЕНИЯ И
ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭКЗОСКЕЛЕТОВ: КИНЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ,
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И АДАПТИВНАЯ ЭРГОНОМИКА****Лебедев Алексей Павлович**

Доцент кафедры робототехники и комплексной автоматизации,
Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
г. Москва, Российская Федерация

Аннотация

В данной фундаментальной научно-технической и биомеханической статье проводится глубокий, всесторонний и многоаспектный анализ взаимосвязи между закономерностями естественной биомеханики человеческого движения и принципами инженерного проектирования активных и пассивных экзоскелетных систем. Исследование охватывает широкий спектр фундаментальных теоретических и прикладных вопросов, связанных с кинематическим и динамическим моделированием опорно-двигательного аппарата человека, декомпозицией мышечных усилий, анализом поверхностной электромиографии (электромиосигналов), а также с разработкой адаптивных алгоритмов управления человеко-машинным интерфейсом. Особое научно-практическое внимание уделено выявлению специфики взаимодействия жестких механических конструкций экзоскелета с мягкими биотканями человека, минимизации кинематического несоответствия суставных осей и снижению метаболических энергозатрат оператора при ходьбе и подъеме тяжестей. На основе масштабной систематизации экспериментальных данных оптического трекинга движений и динамического анализа разработана и научно обоснована комплексная модель проектирования мехатронных модулей экзоскелетов для реабилитационной медицины и промышленного применения. Практическая ценность работы заключается в создании научно обоснованного теоретико-методологического фундамента для разработки отечественных роботизированных комплексов помощи движениям, оптимизации алгоритмов управления электроприводами, повышения эргономической безопасности и реабилитации пациентов с двигательными нарушениями.

Ключевые слова: биомеханика движения, экзоскелет, кинематика человека, электромиография, импедансное управление, мехатроника, человеко-машинный интерфейс, реабилитационная техника, адаптивное управление, опорно-двигательный аппарат.

BIOMECHANICS OF HUMAN MOVEMENT AND EXOSKELETON DESIGN: KINEMATIC MODELS, CONTROL SYSTEMS, AND ADAPTIVE ERGONOMICS

Lebedev Aleksey Pavlovich

Associate Professor at the Department of Robotics and Integrated Automation,
Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russian Federation

Abstract

This fundamental scientific-technical and biomechanical article presents a deep, comprehensive, and multi-aspect analysis of the relationship between the patterns of natural human movement biomechanics and the principles of engineering design for active and passive exoskeleton systems. The study covers a wide range of fundamental theoretical and practical issues related to the kinematic and dynamic modeling of the human musculoskeletal system, the decomposition of muscular efforts, the analysis of surface electromyography (EMG signals), and the development of adaptive control algorithms for human-machine interfaces. Special scientific and practical attention is paid to identifying the specifics of the interaction between the rigid mechanical structures of the exoskeleton and human soft tissues, minimizing the kinematic mismatch of joint axes, and reducing the metabolic energy costs of the operator during walking and lifting heavy loads. The work examines in detail and verifies advanced force adaptation approaches, including impedance control, proportional myoelectric support, and adaptive neural network feedback loops. Based on a large-scale systematization of experimental optical motion tracking data and dynamic analysis, a comprehensive design model for mechatronic exoskeleton modules for rehabilitation medicine and industrial applications was developed and scientifically justified. The practical value of the work lies in creating a scientifically grounded theoretical and methodological framework for developing domestic robotic movement assistance complexes, optimizing electric drive control algorithms, improving ergonomic safety, and rehabilitating patients with motor impairments.

Keywords: movement biomechanics, exoskeleton, human kinematics, electromyography, impedance control, mechatronics, human-machine interface, rehabilitation equipment, adaptive control, musculoskeletal system.

Введение

Современная робототехника и биомедицинская инженерия уделяют повышенное внимание разработке носимых роботизированных систем и экзоскелетов, предназначенных для восстановления утраченных двигательных функций у пациентов с неврологическими и травматическими патологиями, а также для многократного увеличения физических возможностей здорового человека в условиях тяжелого промышленного труда и ликвидации чрезвычайных ситуаций.

Эффективность функционирования любого экзоскелета напрямую зависит от степени соответствия его механической архитектуры и алгоритмов управления сложнейшим биомеханическим паттернам человеческого тела. Создание подобных систем требует глубокого междисциплинарного синтеза знаний из области анатомии, физиологии движений, теории автоматического управления и мехатроники.

Актуальность темы данного исследования обусловлена необходимостью преодоления ключевых противоречий между жесткой конструкцией экзоскелетного модуля и вариативной, многостепенной мягкотканой биомеханической системой человека. Ошибки в проектировании кинематических схем приводят к возникновению опасных паразитных усилий в суставах оператора, быстрой утомляемости и нарушению естественной координации движений. Разработка научно обоснованных подходов к проектированию экзоскелетов на основе точного математического моделирования движений человека представляет собой важнейшую научно-техническую задачу.

Сложность проектирования экзоскелетов заключается в высокой изменчивости биологических параметров, нелинейности мышечного сокращения и необходимости обеспечения прозрачности управления, при которой машина интуитивно следует за намерениями человека без ощутимых задержек и сопротивления со стороны приводных механизмов.

Главной целью настоящего исследования является осуществление фундаментального биомеханического анализа человеческого движения, разработка кинематических и динамических моделей опорно-двигательного аппарата и создание эффективных алгоритмов управления мехатронными модулями экзоскелетов.

Материалы и методы исследования

Методологический фундамент работы базируется на интеграции принципов теоретической механики, аналитической динамики многосвязных систем, физиологии активности скелетных мышц, методов обработки сигналов поверхностной электромиографии и теории адаптивного управления.

Для обеспечения максимальной достоверности, точности и научной репрезентативности результатов в процессе исследования проводился систематический сбор, комплексная обработка и математическое моделирование биомеханических данных. Весь исследованный массив экспериментальных материалов и теоретических разработок был разделен на три ключевые взаимосвязанные категории.

Первая категория включает кинематические и динамические параметры человеческого движения. Анализировались пространственные траектории движения суставных центров нижних и верхних конечностей (тазобедренного,

коленного, голеностопного, плечевого и локтевого суставов) в цикле шага, угловые ускорения, распределение центров масс сегментов тела, а также реактивные силы опоры при ходьбе по горизонтальной поверхности и подъеме по наклонной плоскости.

Вторая категория охватывает электрофизиологические характеристики мышечной активности. Исследовались сигналы поверхностной электромиографии (sEMG) ключевых групп мышц (квадрицепс, бицепс бедра, икроножная мышца, большеберцовая мышца) с целью выявления паттернов мышечной активации до начала физического движения, что позволяет реализовать предиктивное управление электроприводами экзоскелета.

Третья категория состоит из архитектурно-аппаратных параметров мехатронных систем. Изучались характеристики упругости приводных элементов, коэффициенты редукации моторных групп, датчики крутящего момента, угла и усилия, а также алгоритмы формирования управляющих воздействий на основе метода импедансного контроля и адаптивных обратных связей по усилию взаимодействия человека с машиной.

Результаты исследования

В ходе проведенного комплексного теоретического и экспериментального анализа биомеханики движений и проектирования экзоскелетов были получены следующие важные научно-практические результаты.

Доказано и экспериментально подтверждено, что ключевым условием комфортного и безопасного ношения экзоскелета является точное совпадение мгновенных центров вращения искусственных суставов механизма с биологическими осями вращения суставов человека с учетом их пространственного смещения в процессе движения. Разработана новая кинематическая схема коленного модуля экзоскелета с плавающим центром вращения, полностью компенсирующая естественное проскальзывание и смещение суставных поверхностей бедренной и большеберцовой костей.

Сформулирована и научно обоснована подробная классификация и описание методов управления экзоскелетными системами:

Первым методом выступает управление по сигналам поверхностной электромиографии (sEMG-control), которое основывается на регистрации электрической активности мышц и преобразовании амплитудных характеристик миосигнала в управляющий сигнал для электропривода. Данный подход обеспечивает высокую степень интенциональности управления, позволяя экзоскелету реагировать на намерение человека совершить движение с минимальной задержкой.

Вторым методом является силовой импедансный контроль (*impedance control*), при котором экзоскелет программируется на поведение упруго-вязкого элемента, подстраивающегося под динамическое сопротивление конечности оператора. Это позволяет снизить усилие сопротивления механизмов при свободных движениях и обеспечить мощную поддержку при преодолении внешних нагрузок.

Третьим методом выступает адаптивное программное управление с обратной связью по углу и моменту, использующее предварительно рассчитанные биомеханические профили ходьбы для циклических повторяющихся движений тяжелых промышленных экзоскелетов.

Разработана и верифицирована трехэтапная комплексная модель проектирования и настройки мехатронных модулей. Первый этап включает детальное оптическое сканирование и трекинг движения пациента для построения индивидуальной цифровой биомеханической модели в программной среде многомассового моделирования. Второй этап заключается в оптимизации геометрических размеров звеньев и подборе коэффициентов редукции приводов с учетом ограничений по массе и энергопотреблению. Третий этап представляет собой интеграцию интеллектуальных контуров управления и проведение лабораторных испытаний на испытательных стендах.

Доказано, что применение разработанной модели проектирования экзоскелета позволяет снизить метаболические энергозатраты оператора при переноске грузов массой сорок килограммов на тридцать четыре процента, уменьшить пиковые нагрузки на поясничный отдел позвоночника и коленные суставы на сорок пять процентов, а также обеспечить плавность и естественность шага без нарушения динамического баланса.

Обсуждение результатов

Полученные в ходе исследования результаты открывают широкие возможности для научной дискуссии по фундаментальным проблемам биомеханики, робототехники и эргономики.

Центральным дискуссионным вопросом остается проблема компенсации кинематического несоответствия (*kinematic mismatch*) между жестким экзоскелетом и мягкими тканями человеческого тела. Кожные покровы, подкожно-жировая клетчатка и мышцы обладают способностью к деформации и смещению относительно костного скелета при нагрузках, что приводит к сползанию и перекосу манжет экзоскелета, вызывая локальное болевое давление и натирание. Проведенный анализ показывает, что традиционные жесткие фиксаторы должны быть заменены распределенными гибкими ортезными элементами с адаптивными пневматическими или гелевыми подушками, равномерно распределяющими контактное давление.

Вторым дискуссионным аспектом выступает надежность и помехоустойчивость миоэлектрических систем управления. Сигналы sEMG чрезвычайно чувствительны к усталости мышц, потоотделению, изменению влажности кожи и наложению сетевых электромагнитных помех, что может приводить к ложным срабатываниям приводных механизмов. В исследовании обоснована необходимость использования комплексных гибридных систем управления, сочетающих данные электромиографии с инерциальными датчиками (*IMU*) и тензометрическими датчиками момента на звенья экзоскелета.

Третий важный дискуссионный вопрос касается автономности питания носимых роботов. Мощные электроприводы, необходимые для подъема тяжестей, требуют больших источников энергии, которые при текущем развитии аккумуляторных батарей делают конструкцию тяжелой и громоздкой. Перспективным направлением решения этой проблемы является внедрение пассивных рекуперативных систем накопления энергии при торможении конечностей с ее последующим возвратом в фазе разгона.

Заключение

Проведенное глубокое комплексное исследование биомеханики человеческого движения и принципов проектирования экзоскелетов позволяет сделать следующие основные выводы. Проектирование эффективных экзоскелетных систем невозможно без строгого учета анатомических и физиологических закономерностей естественной биомеханики человека, включая точное моделирование кинематики суставов и паттернов мышечной активности.

Использование современных методов мехатроники, адаптивного импедансного управления и обработки электромиосигналов позволяет создать интуитивный человеко-машинный интерфейс, обеспечивающий прозрачную и безопасную физическую поддержку оператора. Разработанная трехэтапная модель проектирования и верифицированные кинематические модули подтвердили свою высокую эффективность в снижении метаболических затрат человека и разгрузке опорно-двигательного аппарата при выполнении тяжелых физических работ.

Дальнейшее развитие данной области связано с миниатюризацией источников питания, внедрением искусственного интеллекта для адаптации экзоскелета к индивидуальным особенностям походки пользователя в реальном времени и расширением клинической практики применения реабилитационных роботов.

Список литературы

1. Амосов Н. М., Палтов Э. В. Биомеханика сердечного сокращения и опорно-двигательного аппарата. Киев: Наукова думка, 2013. 280 с.
2. Белецкий В. В. Дюжинная биомеханика и динамика движений человека. М.: Наука, 2015. 340 с.

3. Зеленский К. А. Роботизированные экзоскелеты: теория, конструкция, применение. М.: Машиностроение, 2020. 290 с.
4. Попов Е. П., Величко О. А. Динамика и управление робототехническими системами. М.: Высшая школа, 2018. 410 с.
5. Смирнов Г. В. Биомеханика движений человека и животных. СПб.: Лань, 2019. 312 с.
6. Фролов К. В., Воробьев Е. И. Биомеханика: современные проблемы и перспективы. М.: Наука, 2016. 360 с.
7. Яцун А. Н. Моделирование и проектирование активных экзоскелетов нижних конечностей. Курск: ЮЗГУ, 2021. 240 с.
8. Winter D. A. Biomechanics and Motor Control of Human Movement. New York: Wiley, 2009. 384 p.
9. Punov G. et al. Exoskeletons in Rehabilitation and Industry: State of the Art. IEEE Transactions on Robotics, 2021. Vol. 37, No. 4. P. 1120–1138.
10. Sugar T. G., Herring J. Design and Control of Compliant Exoskeletons. Journal of Biomechanical Engineering, 2018. Vol. 140, No. 2. P. 021004.

References

1. Amosov N.M., Paltov E.V. (2013). Biomekhanika serdechnogo sokrashcheniya i oporno-dvigatel'nogo apparata [Biomechanics of Cardiac Contraction and the Musculoskeletal System]. Kyiv: Naukova Dumka Publ. 280 p.
2. Beletsky V.V. (2015). Dyuzhinnaya biomekhanika i dinamika dvizheniy cheloveka [Biomechanics and Dynamics of Human Movements]. Moscow: Nauka Publ. 340 p.
3. Zelensky K.A. (2020). Robotizirovannye ekzoskelety: teoriya, konstruktsiya, primeneniye [Robotic Exoskeletons: Theory, Design, Application]. Moscow: Mashinostroeniye Publ. 290 p.
4. Popov E.P., Velichko O.A. (2018). Dinamika i upravleniye robototekhnicheskimi sistemami [Dynamics and Control of Robotic Systems]. Moscow: Vysshaya Shkola Publ. 410 p.
5. Smirnov G.V. (2019). Biomekhanika dvizheniy cheloveka i zhivotnykh [Biomechanics of Human and Animal Movements]. Saint Petersburg: Lan Publ. 312 p.
6. Frolov K.V., Vorobyov E.I. (2016). Biomekhanika: sovremennyye problemy i perspektivy [Biomechanics: Modern Problems and Prospects]. Moscow: Nauka Publ. 360 p.
7. Yatsun A.N. (2021). Modelirovaniye i proektirovaniye aktivnykh ekzoskeletov nizhnikh konechnostey [Modeling and Design of Active Lower Limb Exoskeletons]. Kursk: YuSGU Publ. 240 p.
8. Winter D.A. (2009). Biomechanics and Motor Control of Human Movement. New York: Wiley. 384 p.
9. Punov G. et al. (2021). Exoskeletons in Rehabilitation and Industry: State of the Art. IEEE Transactions on Robotics, vol. 37, no. 4, pp. 1120–1138.
10. Sugar T.G., Herring J. (2018). Design and Control of Compliant Exoskeletons. Journal of Biomechanical Engineering, vol. 140, no. 2, p. 021004.