

**Корепанова Татьяна Олеговна,**  
к.ф.-м.н, доцент,  
Пермский военный институт войск  
национальной гвардии РФ  
Korepanova Tatyana Olegovna,  
Ph.D., Associate Professor,  
Perm Military Institute of the National  
Guard of the Russian Federation

**Матарас Артем Александрович,**  
Пермский военный институт войск  
национальной гвардии РФ  
Mataras Artem Aleksandrovich,  
Perm Military Institute of the National  
Guard of the Russian Federation

**Лондарев Алексей Александрович,**  
Пермский военный институт войск  
национальной гвардии РФ  
Londarev Alexey Aleksandrovich,  
Perm Military Institute of the National  
Guard of the Russian Federation

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА  
И ЖИВОТНЫХ С ПОМОЩЬЮ БИОМЕХАНИКИ  
MODELING HUMAN AND ANIMAL  
MOVEMENT USING BIOMECHANICS**

**Аннотация.** В работе представлен комплексный анализ текущего состояния и перспектив развития биомеханического моделирования локомоций. Подробно охарактеризованы современные методы регистрации исходных данных (оптическая регистрация движений, динамометрия, электромиография), описаны принципы репрезентации опорно-двигательного аппарата в виде системы твердых тел. Систематизированы ключевые направления практического приложения моделей: в спортивной науке, клинической практике и реабилитологии, а также в робототехнике.

**Abstract.** This paper presents a comprehensive analysis of the current state and development prospects of biomechanical modeling of locomotion. It characterizes current methods for recording initial data and describes the principles of representing the musculoskeletal system as a system of rigid bodies. Key areas of practical application of these models are systematized: in sports science, clinical practice, rehabilitation, and robotics.

**Ключевые слова:** Опорно-двигательный аппарат, звено, кинематическая цепь, система твердых тел, динамика.

**Keywords:** Musculoskeletal system, link, kinematik chain, solid body system, dynamics.

Исследование закономерностей перемещения живых существ относится к числу фундаментальных научных проблем, интерес к которым прослеживается еще в работах античных мыслителей и мыслителей эпохи Возрождения. Тем не менее, на протяжении



длительного исторического периода анализ моторной активности базировался преимущественно на субъективных визуальных впечатлениях. Переломным моментом стало внедрение в научный обиход вычислительной техники и высокоточных методов регистрации, что ознаменовало переход от качественного описания к количественному анализу параметров движения.

В настоящее время биомеханика рассматривается как междисциплинарное направление, интегрирующее концептуальные подходы механики, физиологии и инженерных наук. Центральным методологическим приемом здесь выступает моделирование, которое предоставляет возможность не только наблюдать внешнюю картину локомоций, но и определять внутренние механические характеристики опорно-двигательного аппарата [1]. В фокусе внимания исследователей оказываются такие величины, как линейные и угловые скорости перемещения сегментов, развиваемые ускорения, мышечные усилия и суставные моменты, а также энергетическая стоимость движений. Значимость биомеханического моделирования для современной науки и практики трудно переоценить. В спортивной сфере оно служит инструментом тонкой настройки двигательных навыков, позволяя атлетам реализовывать свой потенциал с минимизацией травматических рисков [2]. В медицинской отрасли происходит пересмотр подходов к реабилитации пациентов с патологиями опорно-двигательной системы и проектированию высокофункциональных протезов. Параллельно с этим принципы организации биологических движений все активнее заимствуются робототехникой при создании антропоморфных механизмов, адаптированных к передвижению.

В рамках биомеханического подхода локомоторный акт трактуется как результат сложного взаимодействия костных рычагов, мышечных тяг, связочного аппарата и регулирующих влияний нервной системы. Для трансформации этой сложной системы в формат, пригодный для математической обработки, используется процедура дискретизации – мысленного разделения континуума на отдельные составляющие. Тело при этом репрезентируется в виде кинематической цепи, образованной совокупностью жестких звеньев [3]. Каждое такое звено (например, голень, плечо, таз) наделяется инерционными характеристиками – массой, координатами центра масс и тензором инерции, значения которых могут заимствоваться из нормативных таблиц или определяться индивидуально по данным трехмерного сканирования. Сочленения между звеньями, соответствующие анатомическим суставам, интерпретируются как кинематические пары, обладающие заданным числом степеней свободы. Так, коленный сустав в большинстве прикладных моделей аппроксимируется шарниром с одной степенью свободы, обеспечивающим сгибание и разгибание, тогда как тазобедренный сустав описывается более сложной моделью с тремя степенями свободы, допускающей разнонаправленные вращения. Подобная сегментация создает основу для вычисления относительного перемещения частей тела. Фундаментальная предпосылка биомеханики заключается в том, что любое перемещение в пространстве детерминировано действием сил. Совокупность сил, воздействующих на организм, традиционно разделяют на два класса. К внутренним силам относят усилия, генерируемые структурами самого организма. Доминирующую роль здесь играют мышечные тяги. Сокращаясь, мышечные волокна развивают напряжение, которое передается через сухожилия к костям, создавая вращающие моменты в суставах. Моделирование мышечной активности сопряжено со значительными сложностями, поскольку одна и та же мышца способна функционировать в различных режимах, а идентичный двигательный результат может достигаться вариативными паттернами мышечной активации. Внешние силы представляют собой воздействия на организм со стороны окружающей среды. К числу таковых относятся: гравитационная сила, приложенная к каждому сегменту тела и обуславливающая появление



нагрузок; реакция опоры – сила противодействия, возникающая при контакте стопы с поверхностью и обеспечивающая возможность отталкивания; силы сопротивления среды (воздушной или водной); внешнее отягощение (например, вес спортивного снаряда). Ключевая задача вычислительных процедур заключается в разделении вклада указанных сил и выяснении того, каким образом внутренние мышечные усилия преодолевают действие внешних факторов, реализуя движение с фиксируемыми кинематическими параметрами.

Достоверность и прогностическая ценность модели непосредственно определяются качеством эмпирических данных, на которых она строится. Оснащение современных биомеханических лабораторий включает комплекс аппаратных средств, обеспечивающих регистрацию движений с высокой разрешающей способностью.

Базовым инструментом кинематического анализа служат системы видеofиксации, известные также как motion capture. Типичная конфигурация включает несколько (до 12 и более) синхронизированных высокоскоростных камер. Различают два основных типа таких систем – маркерные и безмаркерные. При использовании маркерных систем на теле испытуемого фиксируются светоотражающие метки в соответствии с принятой анатомической схемой. Камеры, оснащенные кольцевыми светодиодами, регистрируют координаты маркеров с частотой до 1000 кадров в секунду и субмиллиметровой точностью. Программное обеспечение реконструирует по этим данным трехмерную скелетную модель в динамике, автоматически вычисляя траектории, скорости и ускорения. Высокоскоростная съемка, даже в отсутствие маркерной системы, позволяет фиксировать быстропротекающие фазы движения (ударное взаимодействие, фазу полета), остающиеся недоступными для визуального анализа.

Для перехода от кинематики к динамике, то есть к анализу причин возникновения движения, необходимо располагать информацией о силах взаимодействия с опорной поверхностью. С этой целью используются динамографические платформы, интегрированные в конструкцию пола или беговой дорожки. Данные устройства регистрируют три компонента вектора силы реакции опоры и координаты точки его приложения. Информация с платформ является критически важной при решении обратной задачи динамики, направленной на определение результирующих суставных моментов.

Если кинематика и динамометрия отвечают на вопросы «что происходит?» и «с какой силой?», то электромиография позволяет выяснить, за счет активности каких именно мышц реализуется двигательный паттерн. Поверхностные или внутримышечные (игольчатые) электроды улавливают биоэлектрические потенциалы мышечной ткани. Анализ электромиографического сигнала дает возможность идентифицировать моменты активации и расслабления мышцы, оценить степень ее вовлеченности и диагностировать развитие утомления. Эти данные широко применяются для верификации моделей: если вычислительная модель предсказывает активность определенной мышечной группы в конкретной фазе цикла, это должно подтверждаться характерными изменениями электромиографического сигнала. Миниатюризация сенсоров открыла возможности для проведения исследований вне лабораторных условий. Инерциальные модули, объединяющие акселерометры, гироскопы и магнитометры, могут размещаться непосредственно на теле испытуемого. Они регистрируют линейные ускорения и угловые скорости звеньев. Путем интегрирования этих данных с использованием алгоритмов слияния сенсоров можно восстанавливать пространственную ориентацию сегментов и траектории их перемещения в условиях реальной двигательной активности.

Данные, получаемые в ходе инструментальной регистрации, и построенные на их основе вычислительные модели находят применение в различных областях. Внедрение биомеханического подхода в спорт изменило методы технической подготовки. В медицине



биомеханический анализ становится стандартным компонентом диагностики и контроля эффективности лечения двигательных нарушений. Эволюция создала высокоэффективные механизмы локомоции, принципы функционирования которых стремятся воспроизвести в робототехнических системах.

*Список литературы:*

1. Ромакина Н.А., Федонников А.С., Киреев С. И. Использование методов биомеханики в оценке состояния и коррекции патологии опорно-двигательной системы // Саратовский научно-медицинский журнал. – 2015. –Т.11. –№ 3. – С. 310-316.
2. Левшенко А.В., Батулин А.Е. Современные технологии биомеханического анализа в спорте высших достижений // Ученые записки университета им. П.Ф. Лесгафта. – 2019. –№ 7(163). – С. 165-170.
3. Зациорский В.М., Арунин А.С., Селуянов В.Н. Биомеханика двигательного аппарата человека // М.: Физкультура и спорт. – 1981. – 143 с.

