

Моделирование двигательного аппарата спортсмена

07, июль 2014

Соя Д. М., Жук Д. М.

УДК: 004.942:612

Россия, МГТУ им. Баумана

dm.soya@live.com

zhuk@bmstu.ru

Введение

На сегодня спорт высших достижений — это единственная модель деятельности, при которой у выдающихся рекордсменов функционирование почти всех систем организма может проявляться в зоне абсолютных физических и практических пределов здорового человека. Цель спорта высших достижений — это достижение максимально возможных спортивных результатов или побед на крупнейших спортивных соревнованиях. Большой интерес с точки зрения спорта высоких достижений представляет моделирование двигательного аппарата спортсмена с помощью ЭВМ. Несмотря на то, что работы [19, 20, 21, 22] в этой области существуют, в целом достижения в области компьютерного моделирования движений в спорте пока скромны. Причины этого явления достаточно очевидны: специалисты в спорте не достаточно широко владеют навыками компьютерного моделирования и специальными знаниями, а инженеры не обладают достаточными знаниями о проблемах в спорте.

Широкими возможностями для моделирования опорно-двигательного аппарата человека обладают системы автоматизированного проектирования (САПР), предназначенные для анализа механических систем.

Целью данной работы является обзор основных типов моделей и способов их получения, обзор нескольких специализированных САПР, а также демонстрация возможностей одной из систем на примере.

1. Общие сведения о моделировании локомоторного аппарата человека.

Типы моделей

Успешное выступление спортсмена на соревнованиях по большинству видов спорта в значительной степени определяется рядом факторов. Первая группа факторов связана с состоянием и функционированием нервной системы спортсмена:

1. Эмоциональное состояние;

2. Качество управления ресурсами организма;
3. Уровень тактического и стратегического мышления.

Вторая группа факторов связана с физическим состоянием организма спортсмена:

1. Общее физическое развитие (в первую очередь – мышечно-скелетной системы), определяющее базовый потенциал спортсмена;
2. Физическое развитие групп мышц, специально ориентированных на заданный вид спорта.

Третья группа факторов связана с наиболее эффективной организацией движений спортсмена на всех этапах состязания:

1. Выделение этапов состязания, требующих различной техники движения спортсмена;
2. Определение наиболее эффективной техники движения для каждого этапа;
3. Освоение спортсменом наиболее эффективной техники движения для каждого этапа состязания.

Первая и вторая группа факторов определяются как природными особенностями конкретного спортсмена, так и приобретенными в результате правильно организованного тренировочного процесса. Третья группа факторов полностью определяется правильно организованным тренировочным процессом и особенностями организма конкретного спортсмена. Важную роль в правильной организации выборе методов тренировочного процесса для конкретного спортсмена играют различные методы моделирования на компьютерах, которые позволяют значительно сократить время создания индивидуального тренировочного процесса для конкретного спортсмена, существенно повысить его эффективность и оптимизировать тренировочный процесс с учетом особенностей конкретного состязания и конкретного спортсмена.

Разработка математических моделей для нервной системы спортсмена сопряжено с большими проблемами, так как она, с одной стороны, исследована недостаточно глубоко для построения достоверной модели спортсмена, а с другой она является чрезвычайно сложным объектом, что не позволяет построить требуемую модель при современном уровне знаний и развития компьютерных технологий.

Создание же математических моделей для локомоций спортсмена без учета управления ими нервной системы вполне возможно, поскольку они базируются на биомеханической модели локомоторного аппарата человека. Разработка математических моделей спортивных движений, упражнений, спортивных игр и единоборств, а затем исследование этих моделей на компьютере позволяет выявить пути повышения спортивных достижений и оптимизации процесса спортивной тренировки

С практической точки зрения первостепенную важность для спортивных тренировок имеют следующие четыре характеристики: величина перегрузки, аккомодация (приспособление конкретного органа или организма в целом к изменению внешних условий), специфичность и индивидуализация. Организм будет становиться сильнее только в том случае, если величина нагрузки будет выше некоторой пороговой, то есть должна возник-

нуть просчитанная перегрузка организма. Таким образом, тренировочные нагрузки целесообразно время от времени, (циклично и поэтапно) видоизменять, сначала закладывая очередную базу под определенный вид нагрузок, а затем увеличивая степень физических нагрузок. В то же время, вследствие специфичности тренировочной адаптации, используемые в тренировках упражнения должны быть как можно ближе к основной спортивной дисциплине, что в конечном итоге непосредственно влияет на координацию движений и мышечную память спортсмена.

Все люди отличаются друг от друга по своим физическим и физиологическим качествам. Поэтому тренировать их надо по-разному. Особенно это касается выдающихся атлетов. Если средний человек может прогрессировать на каких-то усредненных и общих методиках, то чемпиону нужны свои методики. Им тоже нужно подыскивать свои способы для инициирования тренировочной адаптации. В качестве обобщения можно сказать, что общая теория тренировки, это упрощенная для решения практических задач модель.

Перечисленные характеристики часто оказываются взаимно конфликтующими. Например, требования специфичности и аккомодации приводят к одному из основных конфликтов в тренировке атлетов экстра-класса: тренировочные программы должны быть в одно и то же время варьирующимися, во избежание аккомодации, и стабильными, для выполнения требования специфичности. Таким образом, при разработке тренировочных методик для спортсменов экстра-класса необходимо решение задачи оптимизации тренировочного процесса с учетом персональных особенностей организма спортсмена. Для решения подобных задач необходимо наличие математических моделей, связывающих параметры тела, параметры движений, особенности индивидуального тренировочного процесса и спортивные достижения спортсмена.

Работы по изучению движения человека начались достаточно давно и к одним из первых можно отнести исследования Аристотеля, Леонардо Да Винчи и др. [1]. В первой половине, и особенно в середине прошлого века интерес к аналогичным исследованиям снова оживился. При этом в СССР эти работы в основном были посвящены спортивным и медицинским аспектам (работы Бернштейна и его учеников), а в США и Западной Европе – обеспечению безопасности водителя и пассажиров транспортных средств и эргономике человеко-машинных систем (проводились военными лабораториями и ведомствами). С самого начала исследований одной из главных проблем всех математических моделей была необходимость получения точных размеров и масс-инерционных параметров всех анатомических сегментов тела человека при различных уровнях детализации интересующих сегментов. Локомоторный аппарат человека состоит из трех систем:

- скелета, состоящего из костей (около 207 из них 85 – парных), суставов (187) и связок, обеспечивающих жесткость тела человека и противодействие силе тяжести [2];
- мышечной системы, состоящей из мышц (около 640 (639 – 850)) и сухожилий, выполняющих функцию движителей [2];

- нервной системы, обеспечивающей управление мышечным сокращением и контроль за ним.

Создание же математических моделей для моделирования движений спортсмена, как уже было сказано выше, вполне возможно без учета управления ими нервной системы поскольку опирается на механику движений. Поэтому первые работы по созданию моделей человека в основном были посвящены определению параметров сегментов человеческого тела. В современных условиях для моделирования движений тела человека используются различные модели в зависимости их назначения и решаемых задач, которые можно свести к моделям четырех типов или их комбинациям:

1. Антропометрические модели, которые используются для получения параметров анатомических сегментов тела человека с помощью различных методик измерения и различных баз данных параметров человеческого тела [3,4];
2. Антропографические модели, в которых процесс исследования физических упражнений осуществляется на основе фиксации техники движения спортсмена с использованием фотографии, киносъемки или видеозаписи (имитационное моделирование), с последующим выявлением различных биомеханических характеристик [5];
3. Эмпирические модели, использующие подход «черного ящика», в которых на основе результатов проведенных исследований формируется система уравнений или таблица коэффициентов, позволяющие определять некоторые параметры движения для конкретного вида спорта по физическим параметрам спортсмена [6,7];
4. Биомеханические модели на основе использования законов классической механики и ее варианты, представляемые в виде системы обыкновенных алгебро-дифференциальных уравнений и реализуемые в специальных программах [8].

Модели первого типа в основном предназначались для исследований в области эргономики человекомашинных систем и безопасности водителей и пассажиров сложной транспортной техники. Работы в этой области начались с изучения параметров и особенностей человеческого тела, были разработаны различные средства и методики измерения параметров тела в зависимости от пола, возраста, национальности, веса, роста и др. Исследования в США и западных странах финансировались военными ведомствами и проводились в их интересах. В результате были разработаны модели человеческого тела, базирующиеся на результатах измерений, которые использовались как математические модели и как физические модели (для краш-тестов автомобилей). Примером последних может служить семейство физических моделей - Hybrid III манекенов, используемых при испытаниях автомобилей. Одним из основных результатов работ над антропометрическими моделями является создание различных антропометрических баз данных, содержащих средние значения параметров анатомических сегментов человеческого тела, и методик определения на их основе параметров тела конкретного человека. Наиболее известными

являются следующие базы данных: GeBOD (Generator of Body Data) [4], PeopleSize Anthropometric Database [11], US Army - Natick Anthropometric Database, объединяющая несколько баз данных [9], антропометрические стандарты NASA [10] и др.

Модели второго типа являются наиболее распространенными в тренерской практике и широко используются при оценке движений спортсменов. Эти модели предназначены для исследования движения тела человека, определяемого в западной литературе термином Motion analysis. Анализ движений (Motion analysis) обычно включает определение параметров движения тела в пространстве (кинематика) и сил, вызывающих это движение (кинетика). Кинематика движения тела человека может быть зафиксирована, используя различные технические средства и методы:

1. Серийная съемка фотографий (Chronophotography) – один из основных методов для регистрации движения. В прошлом для фиксации различных этапов движения на единственной фотографии использовался стробоскопический источник света с фиксированной частотой [12].
2. Киносъемка или видеозапись отдельными камерами или группой камер на фиксированном расстоянии от двигающегося человека могут использоваться для определения углов вращения в суставах и скоростей движения анатомических сегментов. Современное программное обеспечение значительно упрощает процесс анализа движений и позволяет проводить анализ и в 3D, а не только в 2D.
3. Системы с пассивными маркерами, использующие отражающие маркеры (обычно в форме шара), позволяют выполнять очень точное измерение движений, используя группу камер (обычно пять - десять) одновременно. Камеры излучают сигналы в инфракрасном диапазоне и воспринимают сигналы, отраженные от маркеров, размещенных на теле человека. На основе угла сдвига фазы и временной задержки отраженного сигнала маркера возможно определение положения маркера в пространстве и его перемещения. Эти системы также используются при трюковых съемках кинофильмов. [13]
4. Системы с активными маркерами подобны системам с пассивными маркерами, но используют "активные" маркеры. Эти маркеры запускаются поступающим сигналом в инфракрасном диапазоне и отвечают, излучая соответствующий собственный сигнал. Этот сигнал затем используется для определения положения маркера в пространстве и его перемещения. Преимущество этих систем над предыдущими состоит в том, что каждый маркер работает на собственной частоте и его однозначная идентификация достаточно проста в отличие от пассивных маркеров. Это означает, что нет необходимости в сложной постобработке положения маркера, однако могут возникать проблемы с маркерами, находящимися вне поля зрения. [13]
5. Магнитные следящие системы в отличие от трех предыдущих систем, основанных на фиксации оптических изображений, используют магнитные поля.

Вместо маркеров они содержат магнитно-чувствительные сенсоры, каждый из которых в реальном времени генерирует 6DOF данные обо всех степенях свободы (три координаты и три угла). [13]

6. Системы без маркеров позволяют получать информацию о движениях тела человека на основе анализа его геометрических особенностей и особенностей надетого костюма. В настоящее время эти системы находятся на стадии научных исследований и не находят широкого применения.

Однако эти модели специализируются на конкретные спортивные дисциплины и даже на отдельные виды движений и не позволяют исследовать реальные усилия в мышцах, моменты в суставах и силы реакции тела на внешние воздействия и опорные реакции. Кроме того, данные модели представляют собой плоские растровые изображения, что сильно затрудняет их использование в 3D. Хотя принципиально решение этой задачи возможно как путем векторизации и переходом к 3D моделям, так и путем использования воксельного представления тела спортсмена.

Эмпирические модели обычно используются для решения простых частных задач исследования конкретных движений и не позволяют создавать сложные тренировочные методики, необходимые для практической подготовки спортсменов.

Наибольший потенциал с точки зрения создания сложного тренировочного процесса, особенно для спорта высших достижений, имеют модели четвертого типа.

Антропоморфную модель человека обычно представляют моделями в основе которых лежат кости и суставы или кости, суставы и мышечная система. Прежде чем моделировать систему такой сложности, необходимо определить цель моделирования и, исходя из нее, выбрать модель. Структура модели предполагает задание числа звеньев, тип суставов, количество и вид движителей. Полная модель тела человека состоит из костей позвоночника и черепа, верхних и нижних конечностей и включает в себя более 80 твердых тел(костей) и обладает 250 степеней свободы [14]. Создать математический алгоритм такой комплексной и "необозримой", в смысле размерности, задачи достаточно трудно. В настоящее время из моделей тела человека наиболее полными являются: 16-17-звенные модели с 40-44 степенями свободы, разработанные в работах [15- 18].

Для расширения возможностей имитационного моделирования кинематики и динамики движений человека, описанного выше, целесообразно при решении поставленных задач использовать математические модели и методы, применяемые в современных программных системах моделирования разнородных сложных технических систем на сосредоточенном уровне во временной области, которые широко используются при проектировании сложных механических устройств в современном машиностроении и приборостроении. Подобные системы разрабатывались в нашей стране и за рубежом и доказали свою эффективность при выполнении многих проектов от автомобилей и морских судов до высокоточных миниатюрных роботов. К наиболее популярным можно отнести следующие программы: ADAMS (MSC, США), ПА-9 (МВТУ) и др.

В подобных системах на основе математических моделей элементов механизмов и связей между ними, а также текстового или графического описания структуры механизма автоматически генерируется математическая модель исследуемого механизма в виде системы алгебро-дифференциальных уравнений, интегрирование которой во временной области в соответствии с заданием на расчет позволяет получить временные зависимости всех переменных (перемещений, скоростей, ускорений, сил, моментов и т.п.) представляющих интерес для исследователя. Современные системы позволяют работать с 3D моделями механизмов и анимировать результаты моделирования.

Для расширения возможностей подобных систем на биомеханику человека разрабатываются специальные подсистемы, где в качестве элементов исследуемого объекта используются сегменты человеческого тела с их массами, центрами масс, моментами инерции, суставы, мышцы и сухожилия, исходные параметры которых берутся из антропометрических баз данных [4, 9-11] и уточняются в зависимости от параметров конкретного спортсмена.

2. Обзор существующих система моделирования

2.1. MSC.visualNastran 4D

MSC.visualNastran 4D представляет собой новый инструмент конструирования на базе системы Windows. Это приложение позволяет приводить 3D-сборки в движение, осуществлять анимацию результирующих напряжений. Оно дает возможность инженерам-механикам оценивать эффективность работы подвижных элементов сборки. Благодаря этому приложению проектные организации смогут сократить процесс проектирования и затраты благодаря широким возможностям преобразования проектов, проведения предварительного анализа давления и использования систем контроля в одной комплексной среде. Новая версия MSC.visualNastran 4D поддерживает работу практически со всеми CAD-системами благодаря своей ассоциативности с Autodesk Inventor и Mechanical Desktop, Pro/ENGINEER, Solid Works и Solid Edge.

2.2. OpenSim

OpenSim - открытая программная система, что позволяет пользователям разрабатывать модели скелетно-мышечных структур и осуществлять моделирование динамики движений человека. Программное обеспечение обеспечивает платформу, на которой биомеханическое сообщество может формировать библиотеку моделей, пригодных для обмена, тестирования, анализа и улучшения посредством многостороннего сотрудничества. Основное программное обеспечение написано в C++ ANSI, а графический интерфейс пользователя написан в Java.

OpenSim технология позволяет выполнять анализ, разработку моделей контактов различных биологических и механических объектов, мышц, заказных управляющих устройств и т. п. Эти дополнения к программе могут быть доступны без необходимости изменения или компиляции исходного текста. Пользователи могут анализировать существ-

вующие модели и результаты моделирования, разрабатывать новые модели и симуляции с помощью графического интерфейса пользователя.

2.3. SIMM

SIMM (программное обеспечение для интерактивного мускульно-скелетного моделирования) представляет собой мощный набор инструментов, которые облегчают моделирование, анимацию и 3D анализа опорных систем. В SIMM, опорная модель состоит из представлений костей, мышц, связок и других структур. Мышцы охватывают суставы и прикладывают силы, создавая моменты около суставов.

2.4. SIMI

SIMI включает в себя ряд программных продуктов, предназначенных для исследования различных видов движения спортсмена. Основным модулем является Simi Motion.

При анализе движений для спортивных состязаний Simi Motion характеризуется широкими возможностями и модульной структурой. Это позволяет настраивать систему для удовлетворения требований пользователя. Каждое движение атлета может быть зафиксировано и проанализировано до мельчайших подробностей. Например, может быть выполнен анализ кинематики и динамики скелетно-мышечной системы.

В частности, возможности панорамирования, поворота и масштабирования в процессе получения МОСАР данных расширяет область применения программы. Большой опыт и сотрудничество с ведущими спортивными учеными во всем мире гарантируют широкие возможности программы.

Большое разнообразие модулей анализа доступных для выполнения различных исследований таких как, например, ЭМГ, сканирование ступни, вычисление центра тяжести и т.д. Обширные возможности анализа, предлагаемые Simi Motion, позволяют выполнять детальный анализ спортивных методик, а так же движений спортсмена и их фундаментальных физических принципов.

Simi Motion 2D/3D используется в олимпийских учебных центрах и в элитных учебных центрах во всем мире и успешно применялась при подготовке и реализации различных больших спортивных событий.

2.5. LifeModeler/MSC ADAMS

Сегодня на рынке ведущее место в имитационном моделировании биомеханических объектов занимает программа LifeModeler, использующая некоторые программные модули широко известной системы MSC ADAMS, которая является фактически стандартом в области моделирования динамики сложных механических объектов.

Модуль ADAMS/View предназначен для создания, тестирования и оптимизации работы моделей механизмов и конструкций, состоящих из абсолютно твердых тел и их соединений (шарниров, нитей, пружин и т.д.).

Создание модели подразумевает описание всех ее характеристик: геометрических размеров, физических свойств, способов соединения подвижных и неподвижных частей,

задание действующих сил и моментов, начального положения элементов модели и их скоростей.

Этап тестирования модели включает в себя моделирование поведения частей модели под действием приложенных сил и заданных движений и выявление критических параметров, наиболее сильно влияющих на эффективность работы модели в целом.

Оптимизация модели заключается в определении таких значений критических параметров модели, при которых ее работа будет наиболее эффективной.

3. Моделирование тренировочного процесса с использованием эллиптического тренажера в среде LifeModeler

Возможность LifeModeler моделировать человеко-механические системы позволяет исследовать различные проблемы, связанные с взаимодействием биологических и механических компонентов таких систем.

Этот простой пример отражает влияние движения шагом в гору, моделируемого моментом сопротивления эллиптического (шагающего) тренажера, на значения силы мышц и хронометраж процесса ходьбы. Результаты моделирования могут быть полезны для исследований, связанных с реакцией тела человека на тренировочный или реабилитационный процесс ходьбы с переменной нагрузкой.

Метод решения обратной - прямой задачи динамики используется в данном примере для того, чтобы в начале "обучить" мышцы развивать силы, необходимые для использования человеком эллиптического (шагающего) тренажера.

Значения сил, создаваемых различными мышцами, выводятся на печать и на графики посредством масштабируемых векторов сил.

Созданная в данном примере модель отличается следующими особенностями:

- полная система мышц тела человека;
- решение обратной - прямой задачи динамики;
- анимация масштабируемых векторов сил мышц;
- комплексная модель человеко-механической системы.

3.1. Импорт модели человека и создание мягких тканей

На этом шаге для создания модели человеческого тела используется SLF файл из библиотеки моделей, содержащий антропометрические размеры, параметры суставов, параметры осанки и параметры зафиксированных движений (MOCAP данные). Используя параметры, содержащиеся в SLF файле, создаются сегменты тела.

Этот файл содержит информацию об имени субъекта, поле, возрасте, росте и весе. LifeModeler использует эту информацию для получения параметров сегментов тела, а масс-инерционные параметры сегментов выбираются из внутренней антропометрической базы данных.

Пассивные суставы создаются для решения обратной задачи динамики в процессе моделирования. Для этой модели пассивные суставы будут созданы для моделирования

обратной задачи динамики. Пассивные суставы состоят из трехосевого шарнира (3 DOF), который включает угловые ограничители вращения, моменты жесткости и демпфирования. Этот тип сустава используется прежде всего, чтобы стабилизировать тело в процессе моделирования обратной задачи динамики. Параметры включены в SLF файл.

Следующим шагом в процессе получения модели должно быть создание мягких тканей (мышц). LifeModeler автоматически создает набор основных групп мышц тела человека. Модели мышц содержат регистрирующие или обучаемые элементы. Регистрирующие элементы - простые коллекторы данных, которые записывают хронологию сокращения мышцы в период активности, когда модель движется, используя внешние приводы, такие как агенты движения. Обучаемые элементы могут быть или PID замкнутыми силовыми приводами, или разомкнутыми силовыми приводами, управляемыми кривой привода, приводящими в движение скелет модели. Параметры мышц такие, как физиологическая площадь поперечного сечения (pCSA) и максимальное напряжение мышечной ткани, используются для определения максимального потенциала силы специфической мышцы. LifeModeler содержит базу данных, содержащую значения pCSA для каждой мышцы, которые масштабируются соответственно входным параметрам тела (рост, вес, пол и возраст). Кроме того, значение силы мышцы может масштабироваться от 0 % до 200 % для изменения вклада каждой специфической мышцы. Созданная модель человека с мышцами представлена на рис. 1.

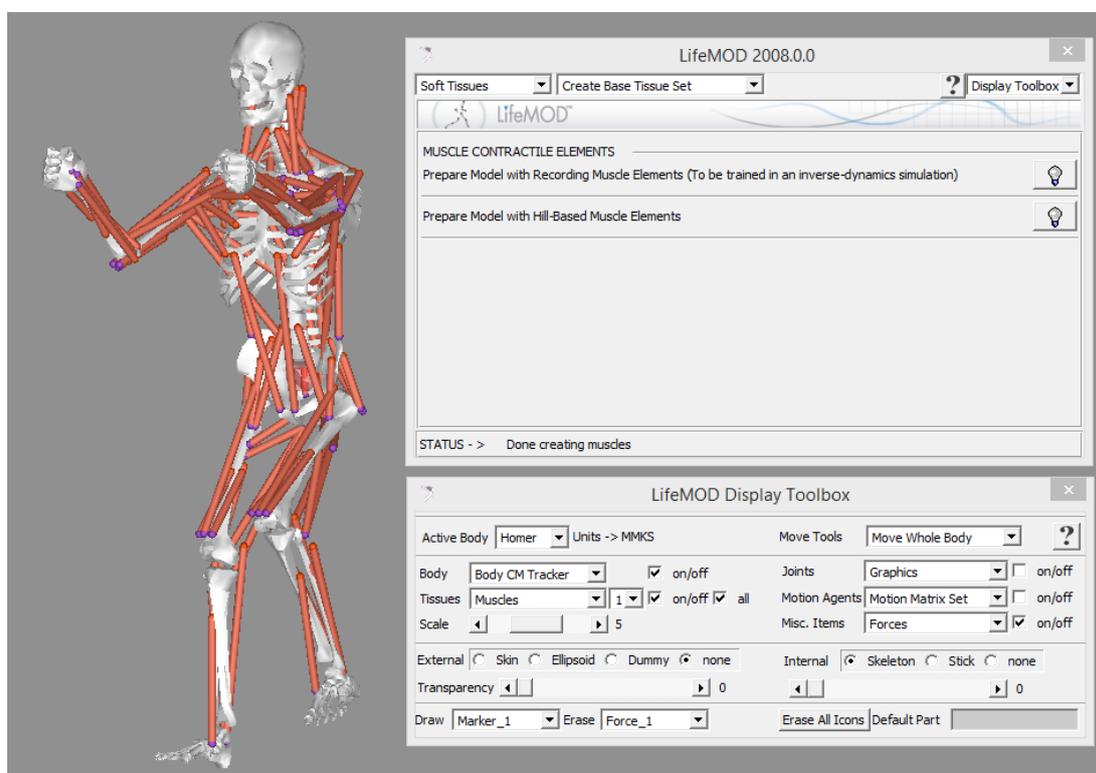


Рис. 1. Общий вид модели человека и элементов интерфейса программы.

3.2. Объединение с моделью эллиптического (шагающего) тренажера

Модель тренажера была создана заранее и уже содержится в библиотеке моделей LifeMOD. Модель состоит из шести деталей: ручки, шаговые платформы, диск и рама. Для соединения всех частей механизма используются простые шарниры вращения. К диску добавлен момент с линейной зависимостью. Модель человека связывается с моделью тренажера с помощью гибких переходных элементов (bushing) ADAMS (рис. 2).

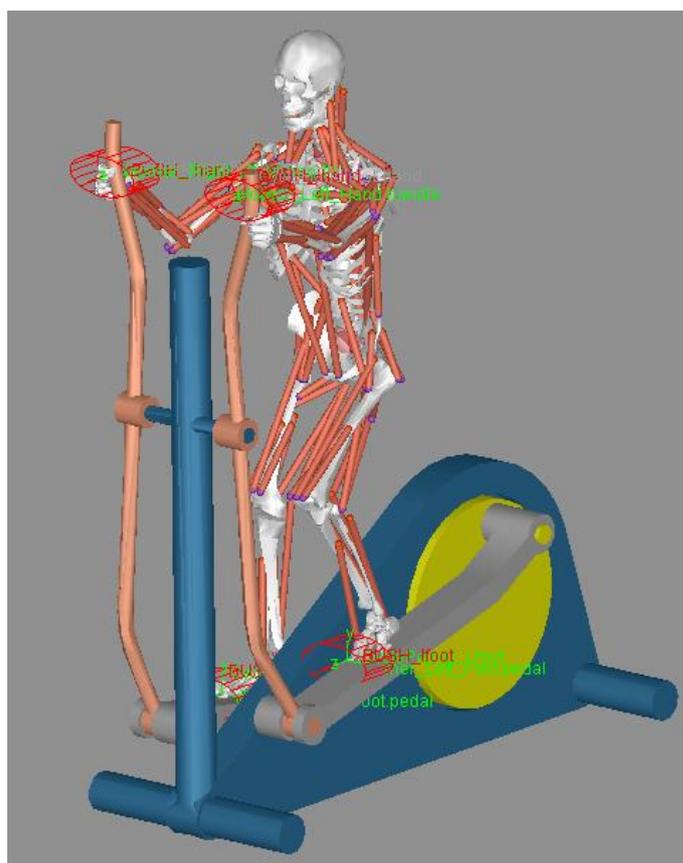


Рис. 2. Полная человеко-механическая система.

3.3. Добавление агентов движения в модель

В фазе моделирования обратной задачи динамики, тренажер будет фактически генерировать движение, а модель человека будет реагировать на активность тренажера. Агенты движения, добавленные в области таза и головы (рис. 3), в течение этой фазы используются для стабилизации модели в процессе обратного моделирования. Они будут зафиксированы в пространстве и подключены к модели через пружины с малыми значениями жесткости и демпфирования.

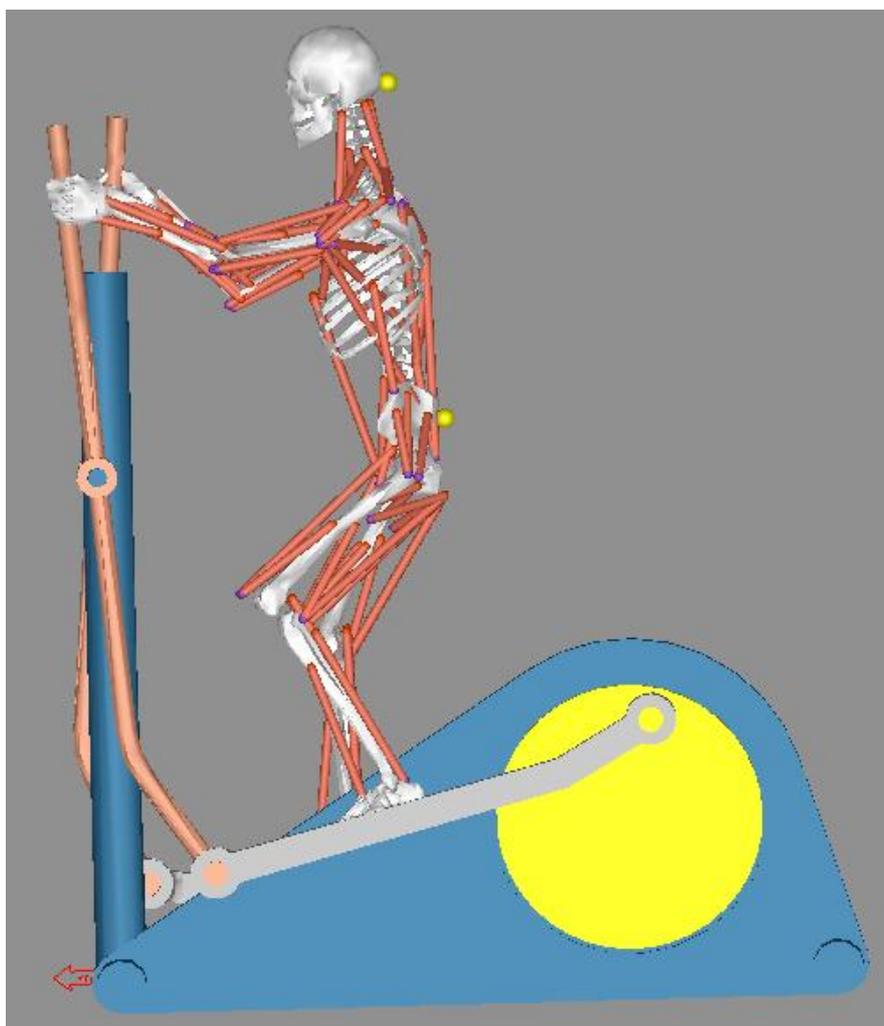


Рис. 3. Создание агентов движения.

3.4. Моделирование обратной задачи динамики

Чтобы обеспечить качественное моделирование как для обратной задачи динамики, так и для моделирования прямой задачи динамики, очень рекомендуется, чтобы было выполнено моделирование состояния равновесия, чтобы уравновесить силы в модели. MSC Adams позволяет производить анализ, результатом которого является нахождение состояния равновесия системы.

При наличии модели человека в требуемой позиции, модели связанной с эллиптическим (шагающим) тренажером и установленных агентов движения, может быть выполнено моделирование обратной задачи динамики. В этой фазе, тренажер будет фактически управлять моделью. Это моделирование выполняется для записи хронологии сокращения мышц при ходьбе (рис. 4). При моделировании прямой задачи динамики, которое будет выполнено позже, хронология сокращения мышц используется в элементах сокращения в мышцах для создания сил, позволяющих модели воспроизводить движение.

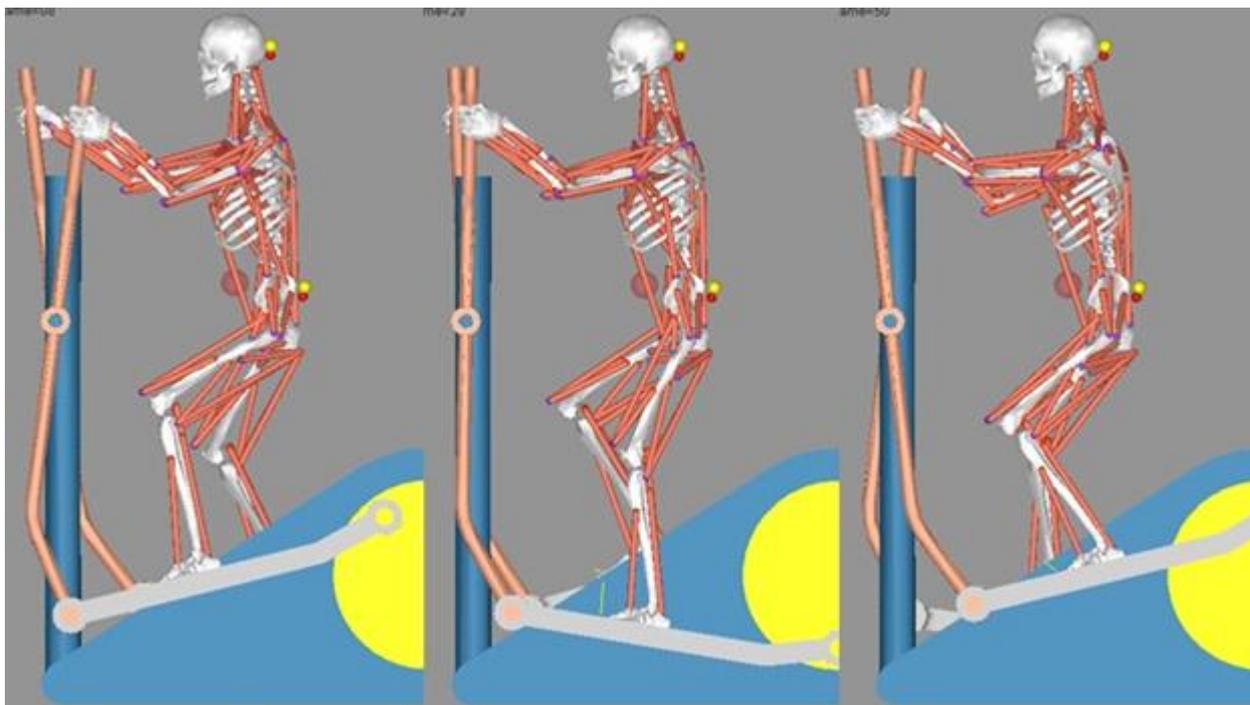


Рис. 4. Последовательные кадры анимации из моделирования обратной задачи динамики.

3.5. Моделирование прямой задачи динамики

Хронология сокращения мышц, записанная при моделировании обратной задачи динамики, теперь используется в линейной PD-Servo формулировке для генерации сил при обновлении хронологии движения. В результате этого процесса деактивируются агенты движения и модифицируются функции мышц.

Агенты движения удалены из модели и в качестве их замены устанавливается "Агент-трекер". Агент-трекер - агент движения, расположенный в центре области таза, обеспечивает силовую стабилизацию при моделировании прямой задачи динамики. В процессе моделирования обратной задачи динамики записываются позиция и ориентация базиса агент-трекера (при этом в процессе моделирования обратной задачи динамики не генерируется каких-либо сил). Информация о положении и ориентации агент-трекера (рис. 5) затем может использоваться для управления агент-трекером при моделировании прямой задачи динамики. Обычно "освобождаются" некоторые степени свободы, чтобы допустить требуемое динамическое взаимодействие. Для этого примера движение в направлении нормали к поверхности пола определяется как свободное, чтобы допустить правильное определение реакции между ногами и педалями с учетом силы тяготения.

В этом примере агент-трекер учитывает тот факт, что верхняя часть тела исключается из модели. Его присутствие компенсирует усилия рук и верхней части тела, передаваемые через туловище.

При отключенном приводе колеса и наличии момента сопротивления на колесе, модель человека готова управлять эллиптическим (шагающим) тренажером, используя силу мышц.

Красный цвет мышц при симуляции (рис. 6) указывает на их активное состояние.



Рис. 5. Панель создания агента-трекера.

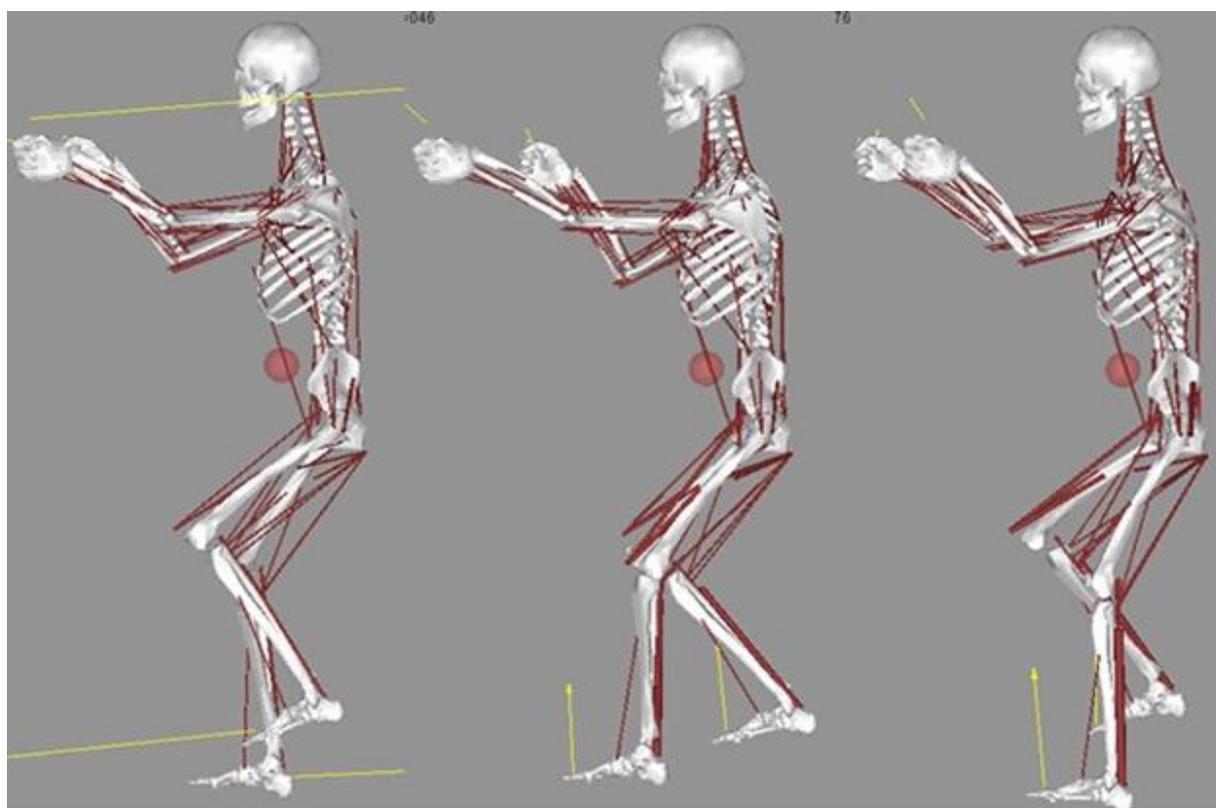


Рис. 6. Кадры анимации моделирования прямой задачи динамики (изображение тренажера выключено для ясности).

3.6. Выполнение параметрического анализа и обзор результатов

LifeModeler решает проблему избыточных мышц в механике тела человека, допуская равный вклад для каждой мышцы, участвующей в движении сустава. Этот вклад создается максимальным выходом силы каждой мышцы и может в дальнейшем быть изменен пользователем. В этом разделе пользователь будет уменьшать вклады трех мышц, чтобы исследовать эффекты влияния перераспределения нагрузки на другие мышцы.

Результаты моделирования показывают, что уменьшение силы разгибателя колена на правой ноге, должно компенсироваться увеличением силы разгибателя бедра на левой ноге (рис. 7).

Body	Homer	Component	Muscles	Name	Type	Stiffness	Damping	Preload	FreeLength	Tone	Proportions	Integral Ga	Differential	pCSA
1	Homer_RecFem_Rtiss_1	closedSmpl	0.4448221	1.7512683	4.55E-002	0.0	2.0	1.0E+007	1.0E+006	1.0E+004	2748.52781			
2	Homer_SemTen_Rtiss_1	closedSmpl	0.4448221	1.7512683	4.55E-002	0.0	2.0	1.0E+007	1.0E+006	1.0E+004	767.983041			
3	Homer_VastMed_Rtiss_1	closedSmpl	0.4448221	1.7512683	4.55E-002	0.0	0.25	1.0E+007	1.0E+006	1.0E+004	3826.81531			
4	Homer_BicFem1_Rtiss_1	closedSmpl	0.4448221	1.7512683	4.55E-002	0.0	2.0	1.0E+007	1.0E+006	1.0E+004	838.395131			
5	Homer_Iliac_Rtiss_1	closedSmpl	0.4448221	1.7512683	4.55E-002	0.0	2.0	1.0E+007	1.0E+006	1.0E+004	1487.66011			
6	Homer_GlutMax1_Rtiss_1	closedSmpl	0.4448221	1.7512683	4.55E-002	0.0	2.0	1.0E+007	1.0E+006	1.0E+004	1788.95831			
7	Homer_Gast1_Rtiss_1	closedSmpl	0.4448221	1.7512683	4.55E-002	0.0	2.0	1.0E+007	1.0E+006	1.0E+004	3419.89851			
8	Homer_TibAnt_Rtiss_1	closedSmpl	0.4448221	1.7512683	4.55E-002	0.0	2.0	1.0E+007	1.0E+006	1.0E+004	1670.24031			
9	Homer_Soleus_Rtiss_1	closedSmpl	0.4448221	1.7512683	4.55E-002	0.0	2.0	1.0E+007	1.0E+006	1.0E+004	9716.86841			
10	Homer_GlutMed1_Rtiss_1	closedSmpl	0.4448221	1.7512683	4.55E-002	0.0	2.0	1.0E+007	1.0E+006	1.0E+004	1767.67131			
11	Homer_GlutMed2_Rtiss_1	closedSmpl	0.4448221	1.7512683	4.55E-002	0.0	2.0	1.0E+007	1.0E+006	1.0E+004	1374.67321			
12	Homer_GlutMax2_Rtiss_1	closedSmpl	0.4448221	1.7512683	4.55E-002	0.0	2.0	1.0E+007	1.0E+006	1.0E+004	1788.95831			
13	Homer_AddMag_Rtiss_1	closedSmpl	0.4448221	1.7512683	4.55E-002	0.0	2.0	1.0E+007	1.0E+006	1.0E+004	1391.04811			
14	Homer_PsoasMaj_Rtiss_1	closedSmpl	0.4448221	1.7512683	4.55E-002	0.0	2.0	1.0E+007	1.0E+006	1.0E+004	1132.32441			
15	Homer_VasLat_Rtiss_1	closedSmpl	0.4448221	1.7512683	4.55E-002	0.0	0.25	1.0E+007	1.0E+006	1.0E+004	5632.96731			
16	Homer_BicFem2_Rtiss_1	closedSmpl	0.4448221	1.7512683	4.55E-002	0.0	2.0	1.0E+007	1.0E+006	1.0E+004	2358.80531			
17	Homer_Gast2_Rtiss_1	closedSmpl	0.4448221	1.7512683	4.55E-002	0.0	2.0	1.0E+007	1.0E+006	1.0E+004	1629.30331			
18	Homer_RecFem_Ltiss_1	closedSmpl	0.4448221	1.7512683	4.55E-002	0.0	2.0	1.0E+007	1.0E+006	1.0E+004	2748.52781			
19	Homer_SemTen_Ltiss_1	closedSmpl	0.4448221	1.7512683	4.55E-002	0.0	2.0	1.0E+007	1.0E+006	1.0E+004	767.983041			
20	Homer_VastMed_Ltiss_1	closedSmpl	0.4448221	1.7512683	4.55E-002	0.0	2.0	1.0E+007	1.0E+006	1.0E+004	3826.81531			
21	Homer_BicFem1_Ltiss_1	closedSmpl	0.4448221	1.7512683	4.55E-002	0.0	2.0	1.0E+007	1.0E+006	1.0E+004	838.395131			
22	Homer_Iliac_Ltiss_1	closedSmpl	0.4448221	1.7512683	4.55E-002	0.0	2.0	1.0E+007	1.0E+006	1.0E+004	1487.66011			
23	Homer_GlutMax1_Ltiss_1	closedSmpl	0.4448221	1.7512683	4.55E-002	0.0	2.0	1.0E+007	1.0E+006	1.0E+004	1788.95831			
24	Homer_Gast1_Ltiss_1	closedSmpl	0.4448221	1.7512683	4.55E-002	0.0	2.0	1.0E+007	1.0E+006	1.0E+004	3419.89851			
25	Homer TibAnt Ltiss 1	closedSmpl	0.4448221	1.7512683	4.55E-002	0.0	2.0	1.0E+007	1.0E+006	1.0E+004	1670.24031			

Рис. 7. Панель свойств мышц правой ноги, используемая для уменьшения вклада мышц Vastus Medialis и Vastus Lateralis до 25%.

После завершения моделирования модель может быть анимирована и могут проанализированы результаты моделирования. По итогам моделирования прямой задачи динамики могут быть представлены различные результаты, включая:

- Все истории изменения мышечных сил;
- Все истории изменения мышечных сокращений;
- Контактные силы между руками и тренажером;
- Контактные силы между ногами и тренажером.

На рис. 8-11 показаны результаты анализа для разных объектов и мышц.

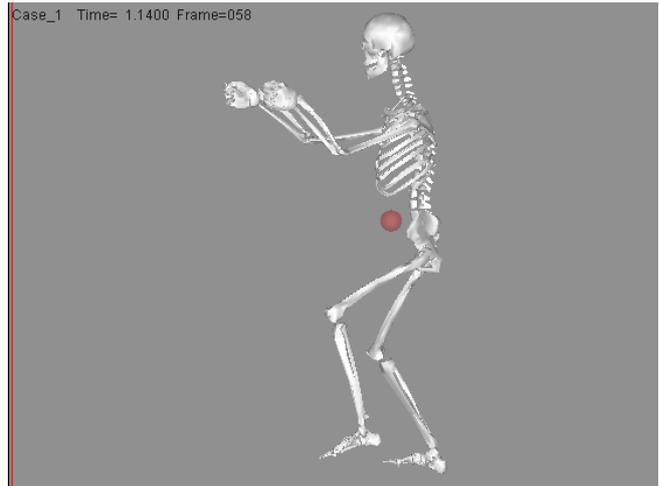
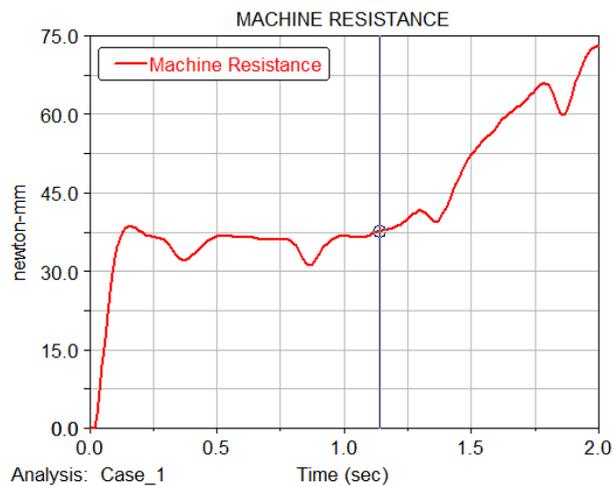
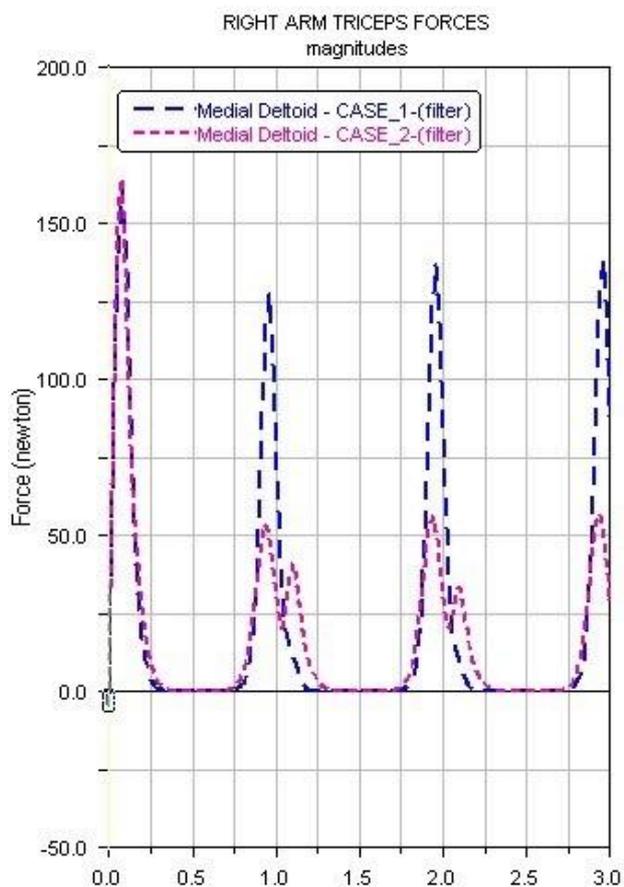
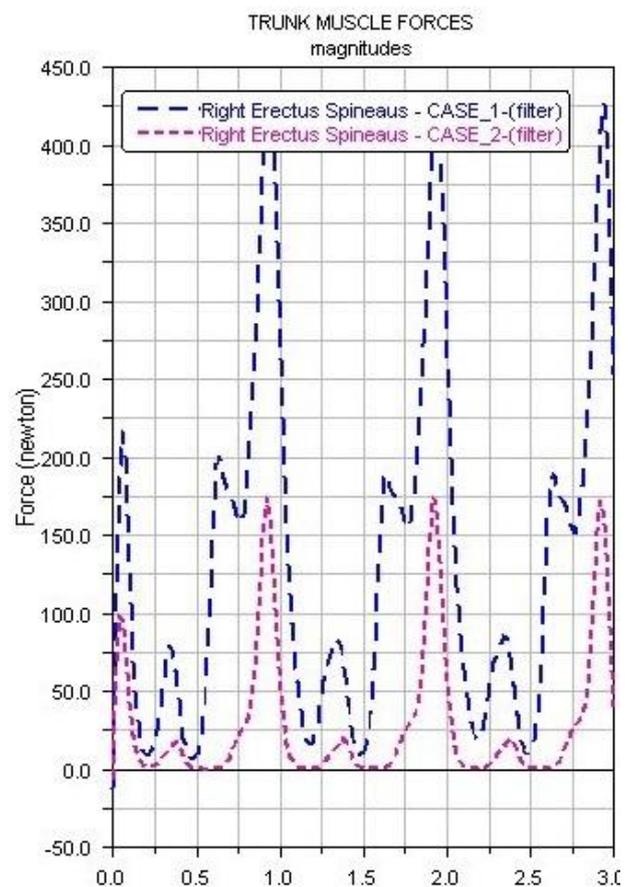


Рис. 8. Параллельное представление анимации и графика сопротивления механизма.



а



б

Рис. 9. **а**) Силы трицепса правой руки до изменения параметров мышц (крупный пунктир) и после. (мелкий пунктир). **б**) Силы разгибающей мышцы спины до изменения (крупный пунктир) и после (мелкий пунктир).

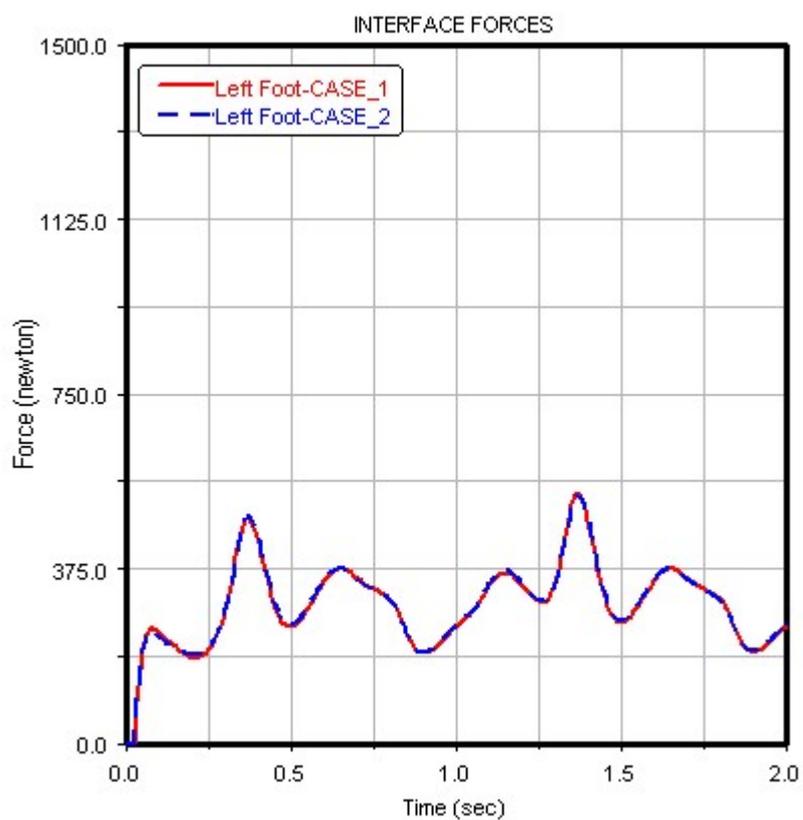


Рис. 10. Сила взаимодействия левой ноги и тренажера для обоих случаев.

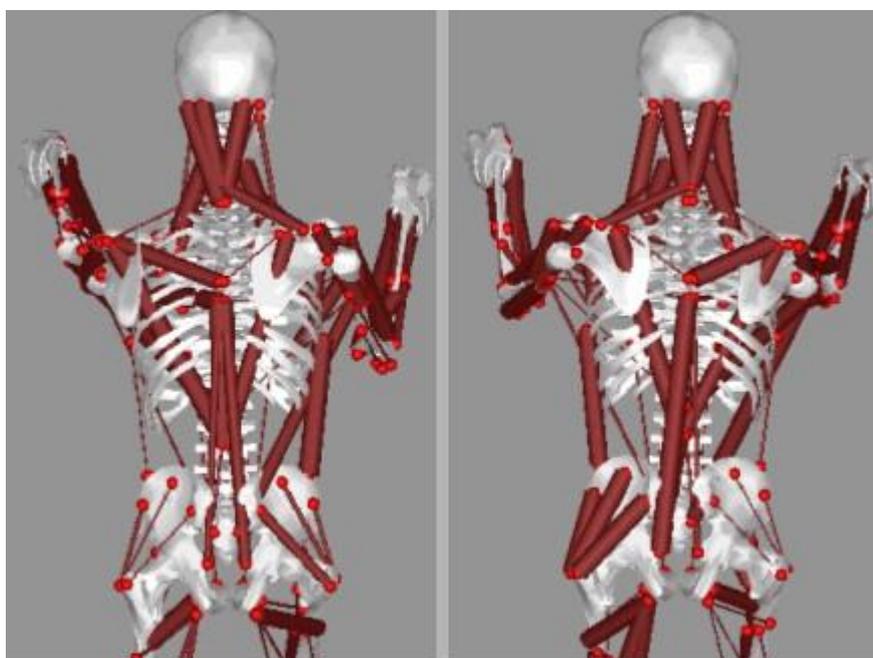


Рис. 11. Кадры анимации, отображающие масштабирование графического представления мышц в зависимости от развиваемой силы.

Как видно из результатов моделирования, изменение нескольких параметров работы мышц приводит к изменению ряда других параметров, происходит автоматическая ком-

пенсация, необходимая для сохранения неизменной силы взаимодействия стопы человека с тренажером.

Заключение

Данная работа продемонстрировала, что использование современных средств САПР, например, MSC ADAMS/LifeModeler значительно упрощает задачу моделирования двигательного аппарата человека, если целью моделирования не является моделирование нервной системы. Одним из основных преимуществ использования подобных систем для моделирования движений спортсменов является то, что подобные системы специально создавались для работы с механическими системами, таким образом моделирование спортивных снарядов и тренажеров любой сложности не представляет серьезной проблемы. С другой стороны, достаточная сложность и точность модели локомоторного аппарата, а также возможность создать модель, построенную по индивидуальным меркам, позволяет производить моделирование для каждого спортсмена отдельно. Это открывает широкие возможности для моделирования человеко-машинных систем как в спорте, так и в других областях, где встают задачи моделирования взаимодействия человека с различными механизмами. К таким областям можно отнести, в первую очередь, реабилитационную медицину, а также исследования в области аэрокосмических технологий, в оборонной промышленности, при решении задач, связанных с моделированием движений человека и силовых воздействий на организм.

Широкое применение подобных систем может дать серьезный толчок к повышению показателей спортсменов, увеличению шансов выздоровления пациентов и ускорению их реабилитации, а также позволит лучше понять процессы, происходящие в организме человека.

К некоторым недостаткам подобной методики следует отнести, во-первых, тот факт, что многие программные продукты являются довольно дорогостоящими, а во-вторых, работа с подобными системами требует специальных навыков и понимания работы механических систем.

Список литературы

1. Н.М. Schepers. «Ambulatory Assessment of Human Body Kinematics and Kinetics.», ISBN: 978-90-365-2844-3, Gildeprint Drukkerijen BV, Enschede, The Netherlands, 2009.
2. <http://www.polezen.ru/interes/anatomy.php> Интересные факты. Человек в цифрах: занимательная анатомия.
3. Committee on Human Factors, National Research Council. (1988). Ergonomic Models of Anthropometry, Human Biomechanics and Operator-Equipment Interfaces: Proceedings of a Workshop. 116p.
4. Cheng, H., Obergefell, L.A., and Rizer, A.L., “Generator of Body Data (GEBOD) Manual,” AL/CF-TR- 1994-005 1, Wright-Patterson Air Force Base OH, March 1994

5. Park Y. et al. (2009). A Comparison of Accuracy and Stroke Characteristics Between Two Putting Grip Techniques. *Proc ISBS Conference 2009*: 70-73
6. Hahn D. (2008). Force-Length Properties of Leg Extension and Their Implications for Strength Diagnostics. *Proc ISBS Conference 2008*: 120-123
7. Edwards W.B. et al. (2008). The Influence of Effective Mass on Impact Force and Acceleration. *Proc ISBS Conference 2008*: 116-119
8. Witte K. et al. (2008). Application of The BRG.LIFEMOD for Simulations of Step-Movements and Kicks and Estimation of Joint Stress. *Proc ISBS Conference 2008*: 104-107
9. Gordon C. C. US Army Anthropometric Survey Database: Downsizing, Demographic Change, and Validity of the 1988 Data in 1996. – ARMY NATICK RESEARCH DEVELOPMENT AND ENGINEERING CENTER MA, 1996. – №. NATICK/TR-97/003.
10. <http://msis.jsc.nasa.gov/Volume1.htm>
11. http://www.openerg.com/psz/anthropometry_data.html
12. MacDonnell K. Eadweard Muybridge: The man who invented the moving picture. – Weidenfeld and Nicolson, 1972.
13. Moeslund T. B., Granum E. A survey of computer vision-based human motion capture //Computer Vision and Image Understanding. – 2001. – Т. 81. – №. 3. – pp. 231-268.
14. Lumb J.R. Computer simulation of biological systems. - Molecular and Cellular Biochemistry, 1987, Vol. 73, p. 91-98.
15. Алешинский С.Ю. Результаты решения основной задачи биодинамики. - В кн.: Совершенствование управления системой подготовки спортсменов высшей квалификации. Биодинамика спортивной техники / Под ред. В.М. Зациорского. - М.: ГЦОЛИФК, 1978, с. 87-117.
16. Dunfield D.L., Read J.F. Determination of reaction rates by using cubic spline interpolation // The Journal of Chemical Physics, 1972, Vol. 57, N 5, p. 2178-2183.
17. Вукобратович М. Шагающие роботы и антропоморфные механизмы. - М.: Мир, 1976. - 541 с.
18. Вукобратович М., Стокич Д. Управление манипуляционными роботами: теория и приложения. - М.: Наука, 1985. - 384 с.
19. Кашуба В. А., Литвиненко Ю. В., Данильченко В. А. Моделирование движений в спортивной тренировке //Физическое воспитание студентов. – 2010. – Т. 4. – С. 40-44.
20. Загrevский О. И. Построение техники гимнастических упражнений на основе математического моделирования на ЭВМ //Дисс.... докт. пед. наук. Томск. – 2000.
21. Гамалий В. В. Моделирование техники двигательных действий в спорте (на примере ходьбы). – 2005.
22. Загrevский В. И., Лавшук Д. А., Загrevский О. И. Технология поиска оптимальной техники гимнастических упражнений в имитационном математическом моделировании движений человека //Теория и практика физической культуры. – 2007. – №. 3. – С. 68-71.