

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПОЗЫ И БИОМЕХАНИЧЕСКИЙ КОМПЬЮТЕРНЫЙ СИНТЕЗ ФИЗИЧЕСКИХ УПРАЖНЕНИЙ

В статье рассматривается перспективное направление исследования биомеханико-педагогических закономерностей формирования двигательных действий, связанное с механико-математическим моделированием физического упражнения. Предложен алгоритм компьютерного моделирования движений человека на основе оригинального способа определения и цифровой записи пространственной позы человека, отличающегося использованием в качестве исходных данных реальных характеристик его суставных движений. Указанный алгоритм реализуется специальной компьютерной программой, использующей математическую модель, включающую одиннадцать звеньев и имитирующую выполнение физического упражнения. Осуществление биомеханического компьютерного синтеза на основе предложенного алгоритма и программы позволяет устанавливать роль движений в суставах в достижении цели двигательного действия и выявлять важнейшие составляющие его внутренней структуры, такие как элементы осанки и управляющие движения, являющиеся объектом педагогического воздействия при освоении исполнения упражнения и развитии специфических двигательных качеств.

Ключевые слова: физическое упражнение, поза, биомеханический анализ и синтез, многозвенная модель, элементы осанки, управляющие движения.

Постановка проблемы. Проблема освоения и совершенствования исполнения физического упражнения, а также развития необходимых для его осуществления специальных двигательных качеств – силы, гибкости, скорости, на наш взгляд, в значительной мере обусловлена особенностями традиционного понимания биомеханических закономерностей формирования двигательных действий и недостаточного их использования в педагогических процессах, связанных с обучением и развитием двигательных качеств.

Здесь имеются два основных аспекта. Первый связан с множеством одновременно выполняемых суставных движений, присутствующих в образцовом исполнении. Так, если учитывать возможности аналитического определения позы [1], то даже при плоском движении в процессе обучения возникает необходимость копирования одновременно около 20 суставных движений. Отсутствие научно обоснованной информации о режиме работы мышц в ходе суставных движений (преодолевающий или уступающий режим), о степени влияния тех или иных движений на результат физического упражнения приводит к слепому копированию всех видимых составляющих физического упражнения, что очевидно, представляется весьма сложной задачей.

Другой проблемой является принципиальное различие систем отсчета, относительно которых воспринимается изучаемое двигательное действие во время его демонстрации и при попытках самостоятельного воспроизведения. В первом случае движение наблюдается в системе отсчета, которую можно в первом приближении считать инерциальной. Это – поверхность беговой дорожки, стены спортивного зала и т. д. При попытках же самостоятельного воспроизведения просмотренного физического упражнения обучающийся не видит себя со стороны и чаще всего системой отсчета для него является его собственное тело. Эта система не является инерциальной и движения относительно нее воспринимаются совершенно не так, как при наблюдении со стороны.

В результате освоение действия ведется традиционным методом «проб и ошибок», что, как показывают многочисленные работы в данной области [2–6], не всегда является эффективным методом.

Любое двигательное действие, связанное с перемещением тела как целого в пространстве, можно представить как следствие целенаправленных изменений позы, включающих такие составляющие двигательного действия, как элементы осанки и управляющие движения в суставах [7]. Это же можно отметить и для упражнений, связанных с развитием физических качеств и в частности в отношении специальных физических упражнений, связанных с развитием специфических силовых способностей. Важно также отметить, что без установления функции суставов, без определения специфики работы мышечных групп, без установления главных и вспомогательных управляющих движений тренировка

сводится к выполнению соревновательных движений в отягощенных условиях. Такая обстановка существенно изменяет специфику работы суставов и часто не соответствует режиму, имеющему место при реальном исполнении физического упражнения. При выполнении таких движений проблематично обеспечить принцип динамического соответствия, установленный в качестве основы построения специальных упражнений [9].

Таким образом, чтобы успешно обучать физическому упражнению и совершенствовать его исполнение, необходимо установить не только как именно изменяется поза человека, но и определить роль каждого суставного действия в достижении цели двигательного действия. Возможность определения позы человека позволяет продвигаться по пути установления роли суставных движений при выполнении конкретного двигательного действия, выявления основных его составляющих – элементов осанки и управляющих движений, выделяя из них главные и второстепенные. Такие вопросы позволяет решать система биомеханического компьютерного синтеза физических упражнений.

Цель работы. В статье излагаются материалы исследования, связанного с построением алгоритма и программированием процесса биомеханического компьютерного синтеза физического упражнения.

Задачи работы

1. Построить алгоритм биомеханического компьютерного синтеза физического упражнения на основе использования информации о закономерностях изменения позы во время его выполнения.

2. Разработать компьютерную программу синтеза физического упражнения для исследования движений спортсмена, находящегося в контакте с твердой опорой.

3. Показать перспективу дальнейшего развития технологии цифровой регистрации позы человека, как основы аналитического исследования закономерностей выполнения физических упражнений.

Изложение основного материала исследования. На начальном этапе развития данного подхода определение роли суставных движений требовало определенного искусства, заключающегося в обобщении движения относительно простых материальных объектов, например, материальных точек, имитирующих звенья тела человека [7]. С развитием компьютерных технологий такие вопросы могут быть решены в рамках более сложных механико-математических моделей, в которых тело человека имитируется многозвенной системой с масс-инерционными характеристиками, соответствующими данным тела человека – исполнителя физического упражнения [9].

Разработанная нами система биомеханического компьютерного синтеза физического упражнения состоит из следующих основных этапов:

- фиксация двигательного действия с помощью скоростной видеоаппаратуры;
- разбиение его на фазы и определение цели каждой из фаз (в большинстве двигательных действий это программа места и программа ориентации);
- определение и формализация закона изменения позы при его выполнении;
- введение полученного закона в уравнения, выражающие закон движения модели;
- компьютерное исследование поведения модели при введении различных вариаций в параметры суставных движений.

Первые два из перечисленных этапов биомеханического компьютерного синтеза физического упражнения не имеют прямого отношения к тематике развиваемого направления, поэтому относительно их ограничимся замечаниями общего характера. Так, фиксация двигательного действия может быть осуществлена любой записывающей аппаратурой с подходящей разрешающей способностью и частотой съемки, адекватной времени выполняемого движения. В частности, в ходе специальных исследований нами была использована камера марки Casio EX-F1 [10] с частотой съемки 300–1200 кадров в секунду.

Естественно, имеются профессиональные камеры для исследования спортивных движений, а также целые комплексы, включающие не только высокоскоростную видеозапись, но и специальные маркеры, фиксирующие положение ключевых точек тела в пространстве. Информация обрабатывается в автоматическом или полуавтоматическом режиме с использованием современных компьютерных технологий [11; 12].

Основной задачей биомеханического компьютерного синтеза двигательных действий, на наш взгляд, является понимание закономерностей исполнения двигательного действия как совокупности составляющих его внутренней структуры – элементов осанки и управляющих движений в суставах. Поэтому здесь важна не столько точность получения необходимых характеристик реального движения, сколько возможность последующего построения физического упражнения в виде модели на основе использования объективных законов механики.

В результате биомеханического компьютерного синтеза двигательного действия обеспечиваются две возможности. Это – формальное (компьютерное) построение движения, сходного по своей структуре с изучаемым физическим упражнением, и исследование путем варьирования параметров суставных движений, начальных условий, а также параметров, относящихся непосредственно к характеристикам звеньев используемой модели. Следует отметить также, что масс-инерционные характеристики тела конкретного исполнителя в настоящее время представляют собой усредненные значения, уже

предполагающие определенную неточность. Поэтому в ходе биомеханического компьютерного синтеза в нашем понимании некоторые неточности видеофиксации в конечном итоге не представляются существенной принципиальной проблемой.

Таким образом, обработка изображения в ходе развиваемого подхода может быть также произведена как простыми, так и более продвинутыми в технологическом отношении методами. Здесь важно участие педагога-специалиста по исследуемому упражнению. С его помощью устанавливаются границы фаз и цели каждой из них. Аналогичные задачи уже решаются, а результаты используются, например, в учебном процессе по биомеханике – предмете, преподаваемом в Белорусском государственном университете физической культуры [14].

В результате реализации первых трех из приведенных выше этапов у исследователя появляется информация о фазах двигательного действия, их целях и о законе изменения позы в каждой из них. Дальнейшее исследование должно быть связано с выяснением роли суставных движений в ходе компьютерного синтеза фаз двигательного действия.

Формализация закона изменения позы осуществляется на основании информации о времени суставного движения и амплитуде его выполнения строится матрица переменной позы, параметры которой являются средствами воздействия на движение модели. Здесь может быть использовано модифицированное гармоническое приближение закона изменения суставного угла с течением времени:

$$\varphi_{ijk} = (\varphi_{ijk}^k + \varphi_{ijk}^h) / 2 - (\varphi_{ijk}^k + \varphi_{ijk}^h) \cos(\pi t / \tau_{ijk}) / 2, \quad (1)$$

где φ_{ijk} – суставной угол; φ_{ijk}^k – конечное значение суставного угла; φ_{ijk}^h – начальное значение суставного угла; τ_{ijk} – время выполнения суставного движения.

Такое выражение для зависимости суставных углов от времени соответствует плавному нарастанию и плавному убыванию их угловых скоростей. Индексы в приведенном выражении слева направо обозначают номер биокинематической цепи, сустав на этой цепи и тип суставного движения. В результате такого представления все интересующие исследователя суставные углы представляются в виде матрицы, каждая ячейка которой представляет собой значение конкретного суставного угла в виде функции времени. Для осуществления последующих этапов исследования необходимо подставить данные об изменении позы в уравнения движения модели тела человека для исследуемой ситуации.

В ходе моделирования тело человека можно представить в виде многосвязной рычажно-шарнирной системы, состоящей из пяти биокинематических цепей, звенья которых предполагаются твердыми цилиндрами, а суставы – идеальные сферические шарниры (рисунок 1), допускающие выполнение трех основных суставных движений – циркумдукций, сгибательно-разгибательных и ротаций.

Закон движения такой модели может быть представлен в виде системы из двух векторных уравнений, выражающих законы динамики для поступательного и вращательного движений тела человека.

$$\vec{r}_c'' = \sum \vec{F}_{внеш} \quad (2),$$

$$\vec{L}'' = \sum \vec{M}_{внеш} \quad (3),$$

где \vec{r}_c – радиус-вектор ОЦМ тела; $\vec{F}_{внеш}$ – внешние силы; \vec{L} – момент импульса относительно ОЦМ; $\vec{M}_{внеш}$ – внешние моменты сил.

В случае безопорного состояния, имеющего место при выполнении двигательных действий во время фазы полета при отсутствии учета сопротивления воздуха, что часто бывает оправданным при выполнении упражнений из арсенала спортивной гимнастики или акробатики, к внешним силам относится сила тяжести. Она определяет траекторию ОЦМ. В такой ситуации указанная сила не образует момента относительно ОЦМ, в результате чего момент импульса остается величиной постоянной (выполняется закон сохранения момента импульса).

В рассматриваемых условиях, при наличии первоначального момента импульса, изменения позы приводят к изменению угловой скорости вращения тела как целого относительно ОЦМ прямо пропорционально изменению момента инерции. При отсутствии первоначального момента импульса возможны только компенсационные движения. Например, если какая-нибудь часть тела, например руки, начала вращаться в одном направлении, тело как целое поворачивается в противоположном, обеспечивая равенство нулю суммарного момента импульса [14].

Таким образом, изменения позы в безопорном состоянии приводят к достаточно очевидным результатам, и для проведения более глубоких исследований нет необходимости.

Наибольший интерес представляет биомеханический компьютерный синтез упражнений, выполняемых в контакте с твердой опорой. Его задача – выяснить роль суставных движений в достижении цели двигательного действия с выделением главных и вспомогательных, а также с определением элементов осанки.

Если представить, что контакт с опорой имеет небольшую область, т. е. может считаться точечным, то момент сил реакции опоры относительно осей, проходящих через точку контакта, может считаться пренебрежимо малым. В результате остается только одна внешняя сила, которая образует момент относительно точки контакта с опорой – это сила тяжести.

Закон движения для такой ситуации представляется одним уравнением, которое описывает вращательное движение относительно точки контакта с опорой в форме момента импульса. Данное векторное выражение распадается на систему из трех уравнений по осям координат. В качестве независимых переменных здесь фигурируют три угла Эйлера, образованные опорным звеном и осями неподвижной системы отсчета. В остальном конфигурация модели (поза) определяется суставными углами, которые задаются действием мышц исполнителя, т. е. являются управляемыми параметрами. Остальные характеристики модели – массы звеньев, положение их центров масс на оси звена, моменты инерции, длины звеньев, время выполнения суставных движений также задаваемы и могут варьироваться.

Если для большей наглядности рассмотреть случай плоского движения, например, отталкивания при выполнении прыжка в длину с разбега, закон движения будет представляться следующим уравнением:

$$L'_z = \sum_{i=1}^{i=N} (m_i (x_i y''_i - x''_i y_i) + J_i \omega'_i) = M_{тяж} \quad (4)$$

где L'_z – момент количества движения модели тела относительно точки контакта с опорой, $m_i, x_i, y_i, y''_i, x''_i, J_i, \omega'_i, M_{тяж}$ – соответственно параметры звена с номером i : масса, x_i и y_i координаты центра масс, x''_i и y''_i компоненты ускорения центра масс, момент инерции относительно центра масс, угловое ускорение, момент силы тяжести относительно оси, проходящей через точку контакта с опорой.

Если учесть, что начало каждого звена модели совпадает с концом предыдущего звена, модель можно представить в виде совокупности биокинематических цепей с двумя разветвлениями, одно из которых находится на уровне тазобедренных суставов, а второе – на уровне плечевых. В данной ситуации радиус-вектор \vec{r}_i центра масс звена с номером i может быть представлен в виде суммы векторов, представляющих звенья тела от точки контакта с опорой до рассматриваемого звена и вектора \vec{s}_i , проведенного из конца звена в его центр масс (рисунок 1):

$$\vec{r}_i = \sum_{j=1}^i \vec{r}_j + \vec{s}_i \quad (5)$$

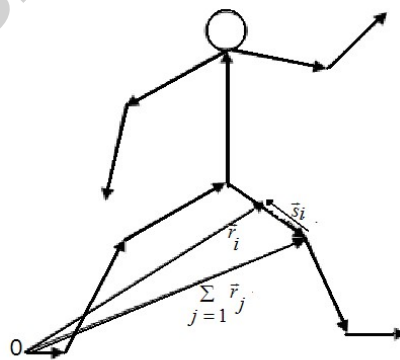


Рис. 1. Плоский вариант модели тела человека для компьютерного синтеза

Для используемой системы координат горизонтальная и вертикальная координаты выражаются через алгебраическую сумму проекций соответствующих векторов. Так, координаты центра масс звена с номером i могут быть представлены в виде:

$$X_i = \sum_{j=1}^{j=i} l_j \cos \varphi_j - s_j \cos \varphi_j, \quad (6)$$

$$Y_i = \sum_{j=1}^{j=i} l_j \sin \varphi_j - s_j \sin \varphi_j.$$

Следует также учесть, что угол пространственной ориентации звена φ_i i определяется углом, образованным первым звеном с осью системы отсчета и суммой суставных углов звеньев, расположенных по цепи ближе к началу системы координат:

$$\varphi_i = \varphi_1 + \sum_{j=1}^{j=i} \alpha_j. \quad (7)$$

Линейные скорости и ускорения ЦМ звеньев, угловые скорости и ускорения звеньев определяются дифференцированием по времени выражений (6 и 7).

Правая часть уравнения движения модели (4) содержит момент силы тяжести, который определяется произведением величины силы тяжести на ее плечо относительно выбранного начала координат. Указанным плечом является горизонтальная координата ОЦМ. Она зависит от координат ЦМ звеньев, а те, в свою очередь, зависят от их длин и углов их ориентации в пространстве, которые определяются суставными углами и единственным углом между осью системы отсчета и опорным звеном.

В результате, если задать закон изменения позы (суставных углов), уравнение движения будет обладать одной независимой переменной – углом, образованным опорным звеном и осью системы отсчета. Данное дифференциальное уравнение имеет единственное решение, которое полностью определяет то, как будет двигаться модель при различных начальных условиях, которые представляют собой угол, образованный опорным звеном и осью системы отсчета, а также угловую скорость изменения этого угла в начальный момент времени.

Таким образом, количество задаваемых переменных в модели биомеханического синтеза составляют: массы и моменты инерции звеньев (22 объекта), длины звеньев и расстояния от начала звена до его центра масс (22), время выполнения суставных движений (10), начальное и конечное положение в суставе (20), начальные условия (2) и одна независимая переменная. Всего в ходе исследования при использовании рассматриваемой модели могут варьироваться 76 параметров.

При расчете координат центров масс звеньев использовано последовательное перечисление звеньев тела как векторов. В связи с этим для эффективного функционирования модели нами была построена специальная матрица, позволяющая учесть разветвления цепей. Она имеет вид:

$$\Delta(i, k) = \{1 - [\delta(i, 7) + \delta(i, 8) + \delta(i, 9) + \delta(i, 10) + \delta(i, 11)] [\delta(k, 4) + \delta(k, 5) + \delta(k, 6)]\} \{1 - [\delta(i, 10) + \delta(i, 11)] [\delta(k, 8) + \delta(k, 9)]\} \quad (8),$$

где $\delta(i, k)$ символ Кронекера.

Данная матрица в явном виде выглядит следующим образом:

$$\Delta(i, k) = \begin{bmatrix} 111111111111 \\ 111111111111 \\ 111111111111 \\ 111111111111 \\ 111111111111 \\ 111111111111 \\ 111111111111 \\ 111000111111 \\ 111000111111 \\ 111000111111 \\ 111000100111 \\ 111000100111 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Использование приведенной матрицы позволяет определять углы пространственной ориентации путем последовательного суммирования угла пространственной ориентации опорного звена и суставных углов с исключением повторного учета цепей в точках разветвления. В результате использования матрицы формула (7) преобразуется к виду:

$$\varphi_i = \varphi_1 + \sum_{k=1}^{k=i} \alpha_j \Delta(i, k). \quad (10)$$

Дифференцирование данного выражения дает возможность определить угловые скорости и ускорения при изменении углов пространственной ориентации звеньев модели. Аналогично дифференцирование выражений (6) позволяет представить через углы пространственной ориентации звеньев скорости и ускорения центров масс звеньев, фигурирующих в законе движения модели.

В результате, если задать указанные выше исходные данные, начальные условия и закон изменения позы (суставных углов), в уравнении движения остается одна независимая переменная – угол, образованный опорным звеном и осью системы отсчета. Данное дифференциальное уравнение имеет единственное решение, которое полностью определяет то, как будет двигаться модель при различных начальных условиях, представляющих собой угол, образованный опорным звеном и осью системы отсчета, а также угловую скорость изменения этого угла в начальный момент времени. Конкретное решение указанного дифференциального уравнения может быть осуществлено численным интегрированием, например, с использованием процедуры Рунге – Кутты [15].

Подстановка исходных данных, а также экспериментально полученных параметров реального физического упражнения, позволяет получить синтезированное двигательное действие, которое может быть изменено варьированием любых параметров, входящих в уравнение движения модели. Здесь появляется возможность исследования влияния суставных движений и антропометрических данных на особенности достижения цели двигательного действия, определять возможности педагогического воздействия при освоении упражнения и совершенствования техники его исполнения.

Практическая реализация биомеханического синтеза двигательного действия для рассматриваемого плоскостного варианта физического упражнения с учетом рассмотренных особенностей была осуществлена в результате построения специальной программы на языке Visual Basic.

Окно ввода и вывода данных показано на рисунке 2.

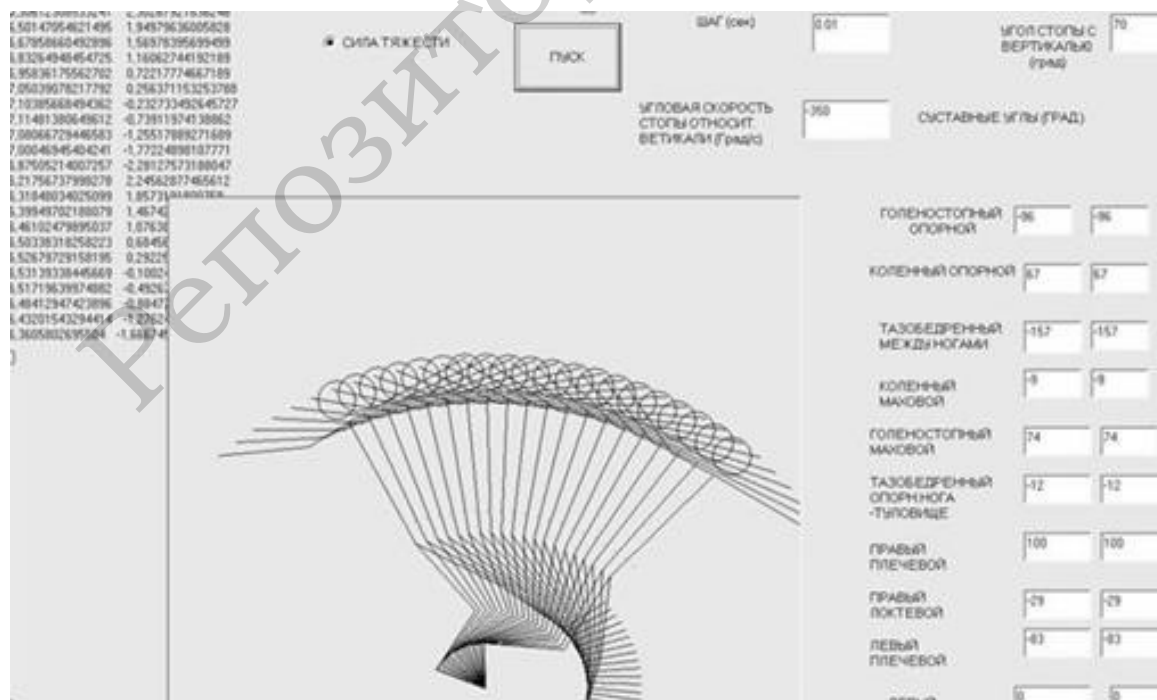


Рис. 2. Окно ввода-вывода информации в программе биомеханического компьютерного синтеза

В левой части рисунка данные моделирования (в представленном случае – скорость ОЦМ), в центре – контурграмма синтезируемого двигательного действия, а в правой части – шаг решения, начальные условия и параметры суставных движений.

В процессе использования построенной методики могут проводиться различные исследования. В частности, при введении изменений в параметры суставных движений может быть определена роль последних в достижении цели двигательного действия, выявлены основные составляющие физического упражнения – элементы осанки и управляющие движения, определено влияние антропометрических характеристик тела исполнителя, начального положения и скорости, влияния силы тяжести и многие другие задачи.

При осуществлении биомеханического синтеза пространственной структуры физического упражнения принципиальные изменения, связанные с переходом к трем измерениям, отсутствуют, поскольку любое пространственное движение можно разложить по осям координат, используя основное уравнение (4).

Выводы и дальнейшие перспективы исследования

1. Одним из важных аспектов освоения сложных двигательных действий в физической культуре и спорте является необходимость научно обоснованных данных о роли суставных движений, определяющих динамику позы в достижении цели физического упражнения.

2. Возможности аналитического определения и цифровой записи позы человека являются основой для исследования закономерностей ее динамики и выявления основных составляющих двигательных действий – как элементов осанки и управляющих движений в суставах.

3. Выяснение роли суставных движений в достижении цели физического упражнения, выявление основных составляющих внутренней его биомеханической структуры возможно на основе представленной методики биомеханического компьютерного синтеза.

4. Исследования, проводимые на основе компьютерного биомеханического компьютерного синтеза физического упражнения, представляют значительную перспективу в отношении установления основных составляющих двигательных действий и оценки их как объектов педагогического воздействия в ходе обучения и совершенствования исполнения двигательных действий.

Использованные источники

1. Сотский Н. Б. Биомеханика : учебник для студентов специальности «спортивно-педагогическая деятельность» / Н. Б. Сотский. – Минск : БГУФК, 2005. – С. 59–60.
2. Боген М. М. Обучение двигательным действиям / М. М. Боген. – М. : Физкультура и спорт, 1985. – 192 с.
3. Иссурин В. Б. Биомеханика гребли на байдарках и каноэ / В. Б. Иссурин. – М. : Физкультура и спорт, 1986. – 112 с.
4. Коренберг В. Б. Основы качественного биомеханического анализа / В. Б. Коренберг. – М. : ФиС, 1979. – 208 с.
5. Payton C. Biomechanical Evaluation of Movement in Sport and Exercise: The British Association of Sport and Exercise Sciences Guide / C. Payton. – Cornwall, UK : TJ International Ltd., Padstow, 2008. – 218 p.
6. Курьсь В. Н. Биомеханика. Познание телесно-двигательного упражнения : учеб. пособие / В. Н. Курьсь. – М. : Советский спорт. – 2013. – 368 с.
7. Назаров В. Т. Движения спортсмена / В. Т. Назаров. – Минск : Полымя, 1984. – 176 с.
8. Верхошанский Ю. В. Основы специальной физической подготовки спортсменов / Ю. В. Верхошанский. – М. : Физкультура и спорт, 1988. – 330 с.
9. Сотский Н. Б. О методике расчета мышечного компонента суставного момента силы при выполнении спортивных движений на примере фазы отталкивания прыжка в длину / Н. Б. Сотский, Е. В. Короткевич // Мир спорта. – 2012. – № 3. – С. 21–26.
10. Крупский Д. Обзоры фототехники [Электронный ресурс] / Д. Крупский. – 2015. – Режим доступа : <http://www.kroupski.ru/photo/casio-exilim-pro-ex-f1.htm>
11. Ariel Performance Analysis System (APAS) [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа : <http://www1.arielnet.com/main/adw-04.html>.
12. Seyfarth A. Optimum take-off techniques and muscle design for long jump / A. Seyfarth, R. Blickhan, J. L. Van Leeuwen // The Journal of Experimental Biology. – 2000. – Vol. 203. – P. 741–750.
13. Сотский Н. Б. Практикум по биомеханике : практикум / Н. Б. Сотский, В. Ю. Екимов, В. К. Пономаренко. – Минск : БГУФК, 2014. – 108 с.
14. Коренберг В. Б. Основы качественного биомеханического анализа / В. Б. Коренберг. – М. : ФиС, 1979. – 208 с.
15. Бахвалов Н. С. Численные методы : учеб. пособие / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. – М. : Наука ; Гл. ред. физ.-мат. лит.-ры, 1987. – С. 83–153.

Sotsky N.

ANALYTICAL DESCRIPTION OF THE POSTURE AND BIOMECHANICAL COMPUTER SYNTHESIS OF PHYSICAL EXERCISES

The article is devoted to the promising line of research of biomechanical and pedagogical regularities of the formation of motor actions related to the mechanical and mathematical modeling of physical exercises. The approach presented is a further development of the methodology of biomechanical analysis and synthesis of human motor actions, based on the works of Professor V. T. Nazarov. The article proposes an algorithm for computer modeling of human movements based on the original method of determining and digital recording of the spatial posture of a person, characterized by the use of the real characteristics of joint movements, obtained from the analysis of video recording of motor actions as the initial data. Among the characteristics above, the approach uses the amplitude and time of performance of these motions, which determine the harmonic functions of changing the joint angles in time. This algorithm is implemented by specialized computer software that uses a mathematical model that includes eleven links and imitates the performance of physical exercises. The implementation of biomechanical computer synthesis on the basis of the proposed algorithm and software makes it possible to establish the role of movements at joints in achieving the goal of a motor action and to reveal the most important components of its internal structure, such as posture elements and control movements that are the object of pedagogical impact when mastering exercise performance and developing specific motor qualities. In the course of motor action modeling, it is possible to analyze not only the dependence of performance on the parameters of joint movements, but also the influence of mass-inertial characteristics, initial positions, the presence or absence of the action of gravity. The total number of variables defined in the synthesis software, whose influence on the motor action performance can be investigated, reaches 76.

Key words: *physical exercise, posture, biomechanical analysis and synthesis, multi-link model, posture elements, control movements.*

Стаття надійшла до редакції 12.09.2018 р.