

КОМПЬЮТЕРНЫЙ СИНТЕЗ ДВИЖЕНИЙ БИОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПО ЗРИТЕЛЬНОМУ ПРЕДСТАВЛЕНИЮ ОБУЧАЕМОГО О ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЕ СПОРТИВНОГО УПРАЖНЕНИЯ

Показана разработанная технология компьютерного синтеза движений биомеханических систем по зрительному представлению тренеров и спортсменов о пространственной форме изучаемого двигательного действия и его технической основе, что позволяет объективно оценить уровень сформированности зрительного представления обучаемого о рациональной кинематической структуре соревновательного упражнения.

Ключевые слова: двигательные представления; двигательное действие; биомеханическая система; модель; уравнения движения.

Освоение спортсменом нового для него упражнения начинается с формирования необходимых двигательных представлений (ДП). Как необходимый фактор обучения и как психологический феномен ДП давно привлекали внимание специалистов. Наиболее известны в этом плане работы А.Ц. Пуни [1], Е.П. Ильина [2], В.П. Озерова [3]. Но, следует отметить, что все они восходят к работам Л.С. Выготского, С.Л. Рубинштейна, А.Н. Леонтьева, П.Я. Гальперина, Н.Ф. Талызиной.

Рассмотрим некоторые основные положения взглядов на природу ДП Ю.К. Гавердовского [4].

В начале двигательного акта лежит система эфферентных сигналов, посылаемых из центральной нервной системы (ЦНС) к эффекторной системе, к мышечному аппарату. Эти сигналы формируются на основании ДП спортсмена (выработанных в совместной деятельности с тренером) в результате работы ЦНС. Исходя из психологической природы ДП, оно является продуктом психической деятельности человека, основанном на восприятии реальной действительности и представленном в ЦНС как психическое *отражение* реальности. Одной из форм отражения является представление.

Принято выделять категории общих (обобщенных) и частных (единичных) представлений. Обобщенные представления позволяют различать группы предметов, связанных типовыми свойствами, в то время как единичные – отдельные объекты с их конкретными признаками. Применительно к обучению в спорте наибольшее значение имеют единичные представления об изучаемом упражнении, которые позволяют не только узнавать его в массе аналогичных, но и характеризовать по отдельным показателям [4]. Как отмечает автор, это могут быть признаки как *содержания* (знания о структуре, технике двигательного действия – ДД), так и *формы* (чувственные образы, возникшие ранее при восприятии «чужого» и своего собственного, самостоятельного исполнения упражнения).

В качестве характеристики отражения (а следовательно, и ДП), чрезвычайно важной для процесса обучения, применяется *модальность* – существо оригинала по разным его свойствам. Модальность отражения и соответствующие ему представления могут иметь качественное и (или) количественное выражение. И, наконец, ещё одно свойство отражения – не вполне точное отражение объекта субъектом отражения, так как оно окрашено субъективным восприятием [3].

Модальные компоненты ДП делятся на два основных класса – объективные и субъективные. Объективные компоненты – биомеханические свойства упражнений (кинематические и динамические характеристики).

Субъективные компоненты ДП формируются под воздействием биомеханической информации о ДД и непосредственно в процессе выполнения изучаемого упражнения. Субъективные компоненты ДП связаны с процессом управления ДД на основе сенсорных коррекций.

Биомеханическая информация о ДД позволяет ученику не только получить специальные знания об упражнении, но также идеомоторные компоненты ДП. Эта информация (специальные знания) индивидуализированно воспринимается спортсменом от тренера при объяснениях, показах, наблюдениях и т.д. Она субъективна в сознании ученика, так же как и идеомоторные представления. Вот именно здесь и заключается проблема, так как абсолютно точное, адекватное отражение двигательного акта со всеми его свойствами в сознании человека невозможно. Именно в силу субъективного отражения реальной действительности необходим индивидуализированный подход к процессу формирования, уточнения и коррекции ДП спортсменов. Осуществляется этот процесс с помощью образа, модели и знания.

Субъективные и объективные компоненты ДП существуют в функциональном единстве. Единство выражается в следующем. Например, спортсмен не в состоянии оценить величину опорной реакции зрением, но может ощущать её благодаря кинестезису и тактильной чувствительности. В свою очередь зрением эффективно контролируется кинематика упражнения (движение звеньев тела относительно внешних ориентиров), но его динамика практически не воспринимается. Поэтому компоненты ДП существуют в характерных субъективно-объективных модальных парах. Основные из них (по [4]):

- программные эфферентные представления об управляющих двигательных действиях;
- кинестетические представления об изменениях позы и нагрузка на мышечно-суставной аппарат;
- тактильные представления о характере контакта со снарядом;
- зрительные представления о местоположении, вращении, перемещении тела, скоростях движения;
- вестибулярные представления о ритмике и силе контактного взаимодействия с опорой, соотношения ДД со звуковыми моделями движения;
- временные, темпо-ритмические представления о движении;
- смысловые (семантические) представления о технических, системно-структурных, параметрических свойствах движения.

Компоненты ДП различаются не только модальностями, но и источниками информации о ДД.

Первая из них – экзогенные ДП. Эта группа представлений формируется в результате опосредованного ознакомления спортсмена с упражнением посредством разбора кинограмм, наблюдения за другими исполнителями упражнений, просмотра видеозаписей, слушания объяснения тренера. Информация, полученная извне, является основой ДП спортсмена.

Вторая группа – эндогенные ДП, возникающие благодаря непосредственному выполнению учебных упражнений самим спортсменом. У спортсмена появляется возможность сформировать концептуальный образ двигательного действия на основе исполнительского комплекса представлений по всему модальному спектру, который необходим для выполнения упражнения. Только *самостоятельное* исполнение упражнения позволяет спортсмену получить столь важные для обучения кинестетические, тактильные или вестибулярные ощущения.

Двигательные представления, помимо таких свойств, как модальность и экзо-эндогенные признаки, обладают еще системностью и формой существования. Говоря о системном характере ДП, следует подчеркнуть принципиальную важность формирования именно системного образа ДД, который является результатом как предварительной работы над упражнением, так и всего процесса его изучения и совершенствования. С этим, в частности, связаны *скрытые* и *проявленные* ДП [4].

Суть в том, что о подлинном содержании представлений, возникающих в сознании спортсмена, можно лишь догадываться, так как трудно найти адекватные средства, доступные для оценки и коррекции формирующихся ДП.

Скрытые ДП существуют в форме понятий и образов, доступных лишь самому спортсмену. Он может иметь и воспроизводить внутренним зрением и слухом визуальные и временные характеристики ДП, применять идеомоторные формы тренировки ДД, соответствующих его представлению о нем. Но все эти компоненты ДП остаются в субъекте обучения, пока не найдут явное выражение в форме ДД, доступного для внешнего наблюдения, регистрации, контроля и коррекции [4].

Таким образом, *проявленные* ДП остаются проблемной категорией, поскольку в настоящее время не существует метода адекватного внешнего выражения субъективного ДП. Но в практике спортивной работы выделяют всё же три наиболее характерные формы *проявления* ДП: семантическую, квазимоторную и моторную. Исходя из цели работы, более подробно остановимся на семантической форме проявления ДП, которая связана с оценкой и самооценкой смысловых компонентов представлений, проверкой уровня понимания ДД с применением компьютерных технологий, с донесением до тренера своих визуальных представлений о форме, кинематике ДД, оценке сравнительного качества исполнения посредством математического моделирования на ЭВМ.

Формирование предварительных ДП предусматривает несколько этапов, относящихся к объективной биомеханической природе упражнений и представляющей собой технологию, не зависящую от субъекта обучения. Участники процесса обучения должны четко понимать биомеханическую сущность упражнения в виде: 1) формальной программы движения, например в виде кинематической картины; 2) необходимого уровня физической готовности к изучению упражнений, исходя из биомеханики ДД; 3) техники исполнения; 4) структуры движения.

На наш взгляд, смысловые (семантические) представления о технических, системно-структурных, параметрических свойствах движения в наиболее доступной форме могут быть реализованы в зрительном представлении о местоположении, вращении, перемещении тела и других его кинематических характеристиках. И, в частности, подобный подход оправдан при использовании компьютерных технологий создания зрительного образа ДД, который может быть использован в качестве критерия эффективности технических действий спортсмена. В практике учебно-тренировочного процесса тренер обычно указывает только на наиболее значимые, с его точки зрения, основные положения и позы спортсмена, затрагивающие и исходные, и конечные рабочие положения спортсмена в процессе выполнения двигательного действия на снаряде. Таким образом, целостная картина ДД дифференцируется на некоторые основные зрительные образы поз-положений спортсмена, разведенные по всей траектории биомеханической системы на достаточно большие временные интервалы. Но можно ли по этой мозаичной картине движения синтезировать его целостную картину? Возможна ли в этом случае оценка адекватности сформированной у спортсмена биомеханической структуры ДД с его реальным модельным исполнением?

Постановка проблемы в подобной форме и ее решение, несомненно, требуют использования, помимо педагогических и психологических методов исследования, также и других адекватных методов и методик, в частности привлечения биомеханического, механико-математического аппарата исследований, а также инструментария из теории управляемого тела.

Цель работы – разработать технологию компьютерного синтеза движений биомеханических систем по зрительному представлению тренеров и спортсменов о пространственной форме изучаемого двигательного действия и его технической основе.

Рабочая гипотеза состояла в том, что объективная оценка уровня сформированности зрительного представления обучаемого о рациональной кинематической структуре соревновательного упражнения может быть дана по результатам вычислительного эксперимента, в котором синтезируется траектория биомеханической системы.

Механико-математическая постановка задачи и ее формализация. Введем обозначения. Пусть j – номер изображения, где под изображением понимается кадр кинетограммы упражнения. Иначе говоря, j – номер кадра кинетограммы упражнения. Всего таких граничных поз-положений (кадров кинетограммы упражнения) будет S . Если считать, что при выполнении упражнения всегда имеет место исходное и конечное положения спортсмена, то S всегда будет не меньше 2 ($S \geq 2$), а $j = 1, 2, \dots, S$. Обозначим через t текущее время на интервале от T_j до T_{j+1} ($j = 1, 2, \dots, S-1$). Пусть H_j – длительность выполнения упражнения между граничными позами – определяется выражением $H_j = T_{j+1} - T_j$, где $j = 1, 2, \dots, S-1$.

Каждому кадру кинетограммы упражнения будут соответствовать обобщенные координаты биомеханической системы, записываемые в виде двумерного массива Q_{ji} , где j – номер кадра кинетограммы, i – номер звена биомеханической системы. В физическом плане Q_{ji} – угол наклона

i -го звена биомеханической системы к оси Ox декартовой системы координат Oxy , принимаемой за внешнюю систему отсчета. На рис. 1 показано несколько поз-положений спортсмена при выполнении опорной части гимнастического упражнения на перекладине «Перелет Ткачев» [5].

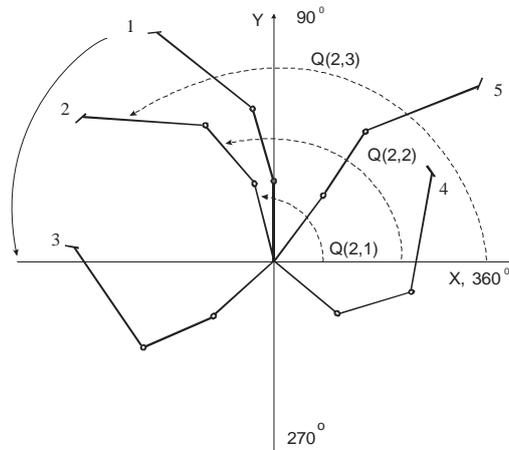


Рис. 1. Визуальное представление о технике упражнения «Перелет Ткачев» на перекладине

Траектория движения спортсмена состоит из нескольких участков и задана последовательностью обобщенных координат ($Q_{j,i}$) биомеханической системы, отнесенных к положениям 1, 2, 3, 4, 5 и соответствующим им моментам времени T_1, T_2, \dots, T_s , где $S = 5$. Здесь j – номер кадра упражнения, i – номер звена биомеханической системы и соответствующий ему номер обобщенной координаты. На рис. 1 углы наклона звеньев биомеханической системы к оси Ox (обобщенные координаты) показаны для второго кадра построенной кинетограммы.

Сформулируем задачу синтеза движения спортсмена по заданным значениям граничных поз-положений тела спортсмена на некоторых участках траектории биомеханической системы. Пусть известно начальное фазовое состояние биомеханической системы [$Q_{j,i}, \dot{Q}_{j,i}, \ddot{Q}_{j,i}$], заданное обобщенными координатами ($Q_{j,i}$), обобщенными скоростями ($\dot{Q}_{j,i}$), обобщенными ускорениями ($\ddot{Q}_{j,i}$) звеньев (i) тела спортсмена, в точках (j) разбиения траектории на отдельные участки. Требуется в течение времени H_j перевести биомеханическую систему в конечное фазовое состояние [$Q_{j+1,i}, \dot{Q}_{j+1,i}, \ddot{Q}_{j+1,i}$].

Традиционным способом решения поставленной задачи является поиск таких законов управления, чтобы выполнить наложенные на систему уравнений граничные условия на участках (T_j, T_{j+1}). Примем, что число конечных условий может быть меньше, больше или равно порядку системы дифференциальных уравнений, описывающих движение объекта. Так, например, на систему второго порядка (биомеханическая система) можно наложить одно условие – на конечное значение обобщенных координат, два условия – на конечную величину обобщенных скоростей и обобщенных координат, три условия – на конечные обобщенные ускорения, обобщенные скорости и обобщенные координаты.

В случае, если требуется, чтобы биомеханическая система к моменту времени T_{j+1} пришла в точку с координатами $Q_{j+1,i}$ и при этом значение обобщенных скоростей $\dot{Q}_{j+1,i}$ и обобщенных ускорений $\ddot{Q}_{j+1,i}$ для нас безразлично, будем считать, что имеем дело с задачей приведения. Заданное фазовое состояние биомеханической системы будем обозначать ($Q_{j+1,i}$). В отличие от задачи сближения здесь не требуется, чтобы к моменту времени T_{j+1} биомеханическая система кроме заданных обобщенных координат $Q_{j+1,i}$ обладала и заданными обобщенными скоростями $\dot{Q}_{j+1,i}$. Следовательно, задача приведения – задача с одним наложенным условием (на конечное значение обобщенных координат) к моменту времени T_{j+1} . В задаче же сближения дополнительно требуется в конечный момент времени (T_{j+1}) ограничить и обобщенные скорости биомеханической системы ($\dot{Q}_{j+1,i}$), что является значительно более сложной двигательной задачей, а также и более сложной инженерной задачей синтеза управления. В этом случае конечное фазовое состояние биомеханической системы будем записывать в виде ($Q_{j+1,i}, \dot{Q}_{j+1,i}$). И здесь уже на конечное фазовое состояние налагается два условия – по обобщенным координатам и обобщенным скоростям звеньев тела спортсмена. В работе [6] указывается, что задачу сближения можно классифицировать как разомкнутое по времени сближение, когда не задано время выполнения задачи сближения, и замкнутое по времени сближение, когда задано время процесса сближения.

В рассмотренной терминологии поставленная нами задача трактуется как задача приведения, относящаяся к задачам управления конечным фазовым состоянием биомеханической системы по обобщенным координатам.

Результаты исследования и их обсуждение. Компьютерная реализация сформулированной задачи требует построения математической модели синтеза движений биомеханических систем. Рассматриваемая нами модель относится к подклассу неразветвленной многозвенной биомеханической системы, и ее движение описывается системой дифференциальных уравнений второго порядка, представленных в данном случае в форме уравнений Лагранжа второго рода [7].

Уравнения движения. В развернутой записи формульные выражения уравнений целенаправленного движения неразветвленной трехзвенной модели биомеханической системы, представленные в форме уравнений Лагранжа второго рода, имеют вид [7]:

$$\begin{aligned} A_{11}\ddot{\varphi}_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_1) + A_{12}\ddot{\varphi}_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) + A_{13}\ddot{\varphi}_3 \cos(\varphi_3 - \varphi_1) - \\ - A_{11}\dot{\varphi}_1^2 \sin(\varphi_1 - \varphi_1) - A_{12}\dot{\varphi}_2^2 \sin(\varphi_2 - \varphi_1) - A_{13}\dot{\varphi}_3^2 \sin(\varphi_3 - \varphi_1) + \\ + Y_1 \cos \varphi_1 = M_1 - M_2; \\ A_{21}\ddot{\varphi}_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + A_{22}\ddot{\varphi}_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_2) + A_{23}\ddot{\varphi}_3 \cos(\varphi_3 - \varphi_2) - \\ - A_{21}\dot{\varphi}_1^2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2) - A_{22}\dot{\varphi}_2^2 \sin(\varphi_2 - \varphi_2) - A_{23}\dot{\varphi}_3^2 \sin(\varphi_3 - \varphi_2) + \\ + Y_2 \cos \varphi_2 = M_2 - M_3; \\ A_{31}\ddot{\varphi}_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_3) + A_{32}\ddot{\varphi}_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_3) + A_{33}\ddot{\varphi}_3 \cos(\varphi_3 - \varphi_3) - \\ - A_{31}\dot{\varphi}_1^2 \sin(\varphi_1 - \varphi_3) - A_{32}\dot{\varphi}_2^2 \sin(\varphi_2 - \varphi_3) - A_{33}\dot{\varphi}_3^2 \sin(\varphi_3 - \varphi_3) + \\ + Y_3 \cos \varphi_3 = M_3. \end{aligned} \quad (1)$$

В уравнениях движения (2) коэффициенты A_{ij} характеризуют масс-инерционный и кинематический компоненты отдельных звеньев биомеханической системы: массы (m_i), моменты инерции (J_i), длины (L_i) и положение центра масс (S_i) на продольной оси звена. Таким образом, в численных значениях динамических коэффициентов звеньев биомеханической системы (A_{ij}) учитываются антропометрические особенности сегментов и звеньев опорно-двигательного аппарата тела спортсменов. Коэффициенты A_{ij} для принятой трехзвенной модели биомеханической системы определяются из уравнений

$$\begin{aligned} A_{11} = J_1 + m_1 S_1^2 + L_1^2(m_2 + m_3); \\ A_{12} = L_1(m_2 S_2 + m_3 L_2); \\ A_{13} = m_3 S_3 L_1; A_{21} = A_{12}; \\ A_{22} = J_2 + m_2 S_2^2 + m_3 L_2^2; \\ A_{23} = m_3 S_3 L_2; A_{31} = A_{13}; \\ A_{32} = A_{23}; A_{33} = J_3 + m_3 S_3^2. \end{aligned} \quad (2)$$

Содержательный смысл коэффициентов Y_i , содержащихся в левой части уравнений, заключается в том, что они представляют собой выражения для определения обобщенных сил в уравнениях Лагранжа и в развернутой записи имеют вид

$$\begin{aligned} Y_1 = (P_1 S_1 + P_2 L_1 + P_3 L_1); \\ Y_2 = (P_2 S_2 + P_3 L_2); Y_3 = (P_3 S_3). \end{aligned} \quad (3)$$

Числовые значения величин M_i определяют величины моментов мышечных сил в суставах спортсмена, реализующих заданную (требуемую) программу движения. В нашем случае M_3 – момент мышечных сил в тазобедренных суставах, M_2 – момент мышечных сил в плечевых суставах, M_1 – момент силы трения.

Таким образом, в рассматриваемой трехзвенной биомеханической модели движения спортсмена за обобщенные координаты приняты углы наклона звеньев к оси Ox . Их количество соответствует количеству звеньев модели. При условии, что в качестве управляющих функций можно рассматривать управление на

кинематическом и динамическом уровнях [7], введем в уравнения движения рассматриваемой биомеханической системы управление на кинематическом уровне в форме изменения суставных углов по времени.

Управление – аналитическое представление. Так как программное управление будем формировать в форме изменения суставных углов по времени, то его можно представить в виде функциональной зависимости от разницы обобщенных координат по времени. Запишем общую структуру управляющих воздействий в виде

$$\begin{aligned} u_z = \varphi_{z+1} - \varphi_z; \\ \dot{u}_z = \dot{\varphi}_{z+1} - \dot{\varphi}_z; \quad \ddot{u}_z = \ddot{\varphi}_{z+1} - \ddot{\varphi}_z; \\ z=1, 2, 3, \dots, N-1, \end{aligned} \quad (4)$$

где запись u_z означает изменение разницы обобщенных координат $\varphi_{z+1} - \varphi_z$ по времени на всей траектории биомеханической системы.

Обобщенные координаты модели и их первая и вторая производные по времени определяются через неизвестное φ_1 и программные управления u_z :

$$\begin{aligned} \varphi_p = \varphi_1 + \sum_{z=1}^{p-1} u_z; \quad \dot{\varphi}_p = \dot{\varphi}_1 + \sum_{z=1}^{p-1} \dot{u}_z; \\ \ddot{\varphi}_p = \ddot{\varphi}_1 + \sum_{z=1}^{p-1} \ddot{u}_z, \quad p = 2, 3, \dots, N. \end{aligned} \quad (5)$$

Уравнения целенаправленного движения биомеханической системы получим, введя кинематические связи (5) в уравнения движения (1). Выполнив необходимые преобразования, имеем следующую запись для i -го уравнения системы:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^N A_{ij} \ddot{\varphi}_j \cos(\varphi_j - \varphi_i) + \sum_{z=j+1}^N A_{iz} \sum_{k=1}^{z-1} \ddot{u}_k \cos(\varphi_z - \varphi_i) - \\ - \sum_{j=1}^N A_{ij} (\dot{\varphi}_1 + \sum_{k=1}^{j-1} \dot{u}_k)^2 \sin(\varphi_j - \varphi_i) = \\ = M_i - M_{i+1} - Y_i \cos \varphi_i; \quad j = 1, \dots, N; \\ z = 2, \dots, N-1; \quad k = 1, \dots, N-1. \end{aligned} \quad (6)$$

Система уравнений (6) разрешима относительно $\ddot{\varphi}_1$ любым из способов, известных в теории матричных операций и линейных уравнений. Окончательное решение системы уравнений (6) имеет вид

$$\ddot{\varphi}_1 = \frac{M_1 - \sum_{i=1}^N [Y_i \cos \varphi_i + \sum_{j=2}^N A_{ij} \ddot{\varphi}_j \cos(\varphi_j - \varphi_i) - \sum_{k=1}^N A_{i,k} \dot{\varphi}_k^2 \sin(\varphi_k - \varphi_i)]}{\sum_{i=1}^N A_{i,1} \cos(\varphi_1 - \varphi_i)}. \quad (7)$$

Уравнения программного управления обеспечивают заданную конфигурацию биомеханической системы в моменты времени прохождения граничных положений (T_j) при любой длительности (H_j) перехода каждого из участков траектории биомеханической системы. Иначе говоря, в момент времени $t = H_j$, конфигурация биомеханической системы будет соответствовать позе спортсмена, заданной для этих точек дискретизации движения.

$$\begin{aligned} U_t = (U_{j,z+1} - U_{j,z}) + ((U_{j+1,z+1} - U_{j+1,z}) - (U_{j,z+1} - U_{j,z})) \times t; \\ \dot{U}_t = (\dot{U}_{j,z+1} - \dot{U}_{j,z}) + (((U_{j+1,z+1} - U_{j+1,z}) - (U_{j,z+1} - U_{j,z})) / H_j) \times t; \\ \ddot{U}_t = (\ddot{U}_{j,z+1} - \ddot{U}_{j,z}) + (((U_{j+1,z+1} - U_{j+1,z}) - (U_{j,z+1} - U_{j,z})) / (H_j \times H_j)) \times t. \end{aligned} \quad (8)$$

Поскольку время перемещения из исходного начального состояния в конечное (H_j) на любом из участков траектории не известно, то и использование уравнений (8) в качестве уравнений управления не представляется возможным. Для решения задачи приведе-

ния необходимо на первом этапе вычислений определить время перехода H_j (в первом приближении) из начального положения в конечное. Эта задача решается для каждого из участков траектории биомеханической системы. С этой целью мы использовали метод итераций, включающий следующую последовательность вычислительных операций:

1. *Моделирование движения тела спортсмена в виде движения физического маятника по критерию сходимости с одной из обобщенных координат биомеханической системы в конечном фазовом состоянии:*

– Итерационный процесс уточнения времени движения осуществляется последовательно для каждого из участков траектории. При этом в качестве начального фазового положения биомеханической системы рассматриваются обобщенные координаты j -го кадра кинетограммы, а в качестве конечного – $j+1$ -го кадра. Естественно, что в первом итерационном цикле $j = 1$. Затем последовательно j изменяется до $S-1$, обеспечивая решение задачи для всех участков траектории.

– Исходное и конечное положения физического маятника определяются по обобщенной координате звена z , в каждом j -м и $j+1$ -м номере кадра кинетограммы упражнения. Движение тела спортсмена в виде движения физического маятника – движение с отсутствием управляющих воздействий $U_t = 0$; $\dot{U}_t = 0$; $\ddot{U}_t = 0$ или движение с постоянным управлением, равным управлению в исходном положении (в точке j) – $U_t = (U_{j,z+1}) - (U_{j,z})$; $\dot{U}_t = 0$; $\ddot{U}_t = 0$. Первоначально z принимается равным 1 (первое звено), возможно изменение z до N (последнее звено – в рассматриваемом случае – 3).

– Шаг интегрирования (h) системы дифференциальных уравнений движения биомеханической системы задавался равным 0,001 с, что обеспечивает точность вычислений порядка h^3 . Процесс моделирования прекращается при достижении физическим маятником координат $j+1$ -го изображения по координате z . Время процесса моделирования присваивается переменной H_j и происходит возврат на j -е изображение.

2. *Моделирование движения тела спортсмена в виде движения физического маятника по критерию сходимости с угловой координатой общего центра масс биомеханической системы в конечном фазовом состоянии:*

– Итерационный процесс решения задачи приведения в соответствии с процедурой 1 не всегда сходится, и в этом случае программная система переходит на другой вариант первичного вычисления времени перехода, который опирается на процедуру 1, но в которой в качестве критерия принятия решения компьютером рассматриваются не обобщенные координаты движущегося объекта, а угловая координата общего центра масс биомеханической системы.

3. *Моделирование движения биомеханической системы с программным управлением:*

– В точке j изображения биомеханической системе присваиваются значения начального фазового состояния.

– С вычисленным в процедуре 1 значением H_j по уравнениям (8) вычисляется программное управление с его производными для каждого момента времени в блоке интегрирования.

– Процесс моделирования прекращается при достижении биомеханической системой координат $j+1$ -го изображения по координате z . Сравняются координаты моделируемой системы и координаты биомеханической системы для рассчитываемых изображений. Если расхождение превышает заданную погрешность вычислений, то время процесса моделирования присваивается переменной H_j и происходит возврат на j -е изображение (начало процедуры 2).

– Если расхождение не превышает заданную погрешность прихода биомеханической системы по обобщенным координатам в изображение j , то это означает достижение сходимости в итерационном процессе решения задачи приведения биомеханической системы в конечное фазовое состояние. Время процесса моделирования присваивается переменной H_j , j увеличивается на единицу и осуществляется переход на $j+1$ -е изображение (начало процедуры 1). В наших исследованиях погрешность вычислений по любой из обобщенных координат биомеханической системы задавалась равной $0,15^\circ$.

Для поставленной задачи исходное фазовое состояние биомеханической системы по обобщенным координатам в различных изображениях приведено в табл. 1. Размерность обобщенных координат – градусы.

Для приведенных в табл. 1 значений координат биомеханической системы ее визуальная форма представления имеет вид, изображенный на рис. 1, а технические характеристики вычислительного эксперимента приведены в табл. 2.

Синтез траектории биомеханической системы с заданными координатами изображений осуществился за 76 итерационных циклов. Вычислительные алгоритмы успешно реализовывались по процедурам 1 и 3. На 71-й итерации произошел переход на 2-ю процедуру вычислений, так как итерационный процесс не сходился и потребовался другой алгоритм вычислений.

Синтезированная в вычислительном эксперименте на ЭВМ траектория биомеханической системы, соответствующая условиям поставленной задачи приведения, показана на рис. 2.

Следовательно, вычислительный эксперимент показал возможность построения траектории биомеханической системы с заданными характеристиками движения по обобщенным координатам в конечный момент времени.

Таблица 1

Фазовое состояние биомеханической системы по кадрам изображений

№ изображения, j	Первое звено, $Q(j,1)$	Второе звено, $Q(j,2)$	Третье звено, $Q(j,3)$
1	90	106	141
2	104	130	176
3	223	204	124
4	320	377	439
5	414	417	382

Время (H_j) перевода биомеханической системы от начального фазового состояния до конечного по кадрам изображений и отклонение (E_j) вычисленных обобщенных координат от заданных

№ изображения, $j - j+1$	Время, H_j , с	Первое звено, E_1 , град	Второе звено, E_2 , град	Третье звено, E_3 , град	Кол-во итераций
1 – 2	0,1191	0,039	0,015	0,075	5
2 – 3	0,4368	0,007	0,019	0,091	6
3 – 4	0,2356	0,070	0,022	0,069	10
4 – 5	0,1119	0,023	0,001	0,045	55

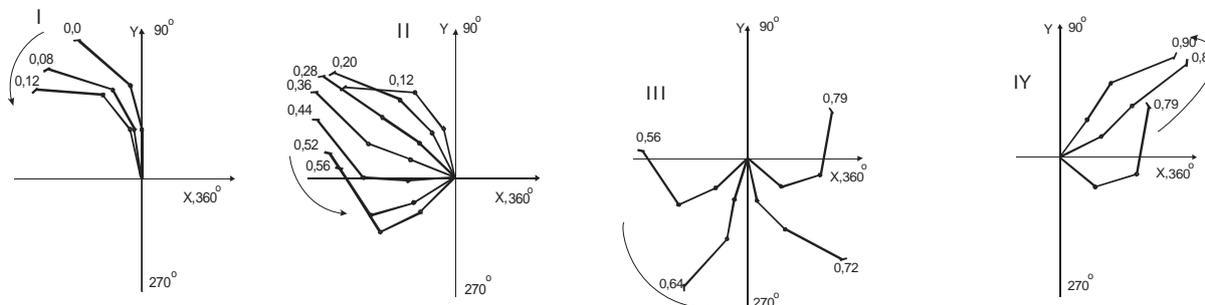


Рис. 2. Синтезированная в вычислительном эксперименте на ЭВМ траектория биомеханической системы, удовлетворяющая решению задачи приведения объекта в конечное заданное фазовое состояние

В заключение можно отметить, что задача формирования ДП не ограничивается только созданием некоего состояния предварительной готовности спортсмена к освоению нового упражнения. Состояние предварительной готовности – это плацдарм для дальнейшего углубленного обучения. Весь процесс обучения упражнению есть формирование и постоянное совершенствование ДП как основы, без которой в принципе невозможно ни освоение двигательного навыка, ни его дальнейшее применение. Будучи восприняты спортсменом, ДП становятся инструментом управления его двигательными действиями.

Объективная оценка уровня сформированности зрительного представления обучаемого о рациональной кинематической структуре соревновательного упражнения может быть дана по результатам вычислительного эксперимента, в котором синтезируется траектория биомеханической системы. Исходные данные в этом случае – обобщенные координаты биомеханической системы в маркерных точках упражнения, заданные обучаемым и воспроизведенные на экране ЭВМ.

В качестве маркерных точек синтезируемой траектории звеньев тела спортсмена целесообразно брать модельное изображение спортсмена в граничных позах

фазовой структуры упражнения или в точках экстремума сгибательно-разгибательных движений в суставах. Здесь важно отметить, что обучаемые не задают временные параметры перехода от одной граничной позы спортсмена к другой. Необходимые временные характеристики являются результатом вычислительного эксперимента. В процессе итерационных процедур ЭВМ формирует численные значения управляющих функций, переводящих биомеханическую систему из заданного начального фазового состояния в одной маркерной точке к требуемому конечному фазовому состоянию в следующей маркерной точке и синтезирует время перевода. Таким образом, рабочая гипотеза о возможности синтеза движений биомеханических систем в рамках решения задачи приведения объекта по заданным начальным и конечным фазовым координатам подтверждена результатами вычислительного эксперимента на ЭВМ.

Разработанная компьютерная программа имитационного моделирования движений спортсмена на ЭВМ в рамках решения задачи приведения реализована на алгоритмическом языке Visual Basic 6, прошла тестирование и внедрена в практику учебно-тренировочных занятий ДЮСШ № 3 г. Томска по спортивной гимнастике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пуни А.Ц. Очерки психологии спорта. М. : ФиС, 1959. 308 с.
2. Ильин Е.П. Психофизиология физического воспитания (Факторы, влияющие на эффективность спортивной деятельности) : учеб. пособие. М. : Просвещение, 1983. 223 с.
3. Озеров В.П. Психомоторные способности человека. Дубна : Феликс+, 2002. 320 с.
4. Гаввердовский Ю.К. Обучение спортивным упражнениям. Биомеханика. Методология. Дидактика. М. : Физкультура и спорт, 2007. 912 с.
5. Шерин В.С. Совершенствование методики обучения перелетовым упражнениям на перекладине на основе биомеханического анализа их техники : дис. ... канд. пед. наук. Сургут, 2007. 190 с.
6. Батенко А.П. Управление конечным состоянием движущихся объектов. М. : Сов. радио, 1977. 256 с.
7. Загревский В.И., Лавицук Д.А., Загревский О.И. Построение оптимальной техники спортивных упражнений в вычислительном эксперименте на ПЭВМ. Могилев : МГУ им. А.А. Кулешова, 2000. 190 с.

Статья представлена научной редакцией «Психология и педагогика» 15 июня 2011 г.