

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНО-КООРДИНИРОВАННОГО ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННОГО ДВИЖЕНИЯ СПОРТСМЕНА: ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ РЕШЕНИЯ

М.А. Киркор, А.Е. Покатилов, А.М. Гальмак, Ю.В. Воронович

Могилевский государственный университет продовольствия

MODELING OF COMPLEX-COORDINATED PURPOSEFUL MOVEMENT OF AN ATHLETE: PROBLEMS AND SOLUTIONS

M.A. Kirkor, A.E. Pokatilov, A.M. Gal'mak, Y.V. Voronovich

Mogilev State University of Food Technologies

Проанализированы современные методы биомеханического анализа сложно-координированных движений спортсмена, включающие натуральный эксперимент и разработку механо-математических моделей целенаправленного движения. Показано, что одним из самых сложных и трудоемких этапов исследования является получение траекторных положений тела спортсмена при выполнении упражнения. Изучены особенности применения для этих целей технологии «захвата движения» на основе «компьютерного зрения». Показаны особенности разработки механо-математических моделей движения с учетом способа получения координат биомеханической системы (БМС). Предложен способ получения пространственных координат: с помощью видеосъемки камерами числом от 1 до 3 и более; с математическим моделированием движения в сферических и декартовых координатах.

Ключевые слова: биомеханический анализ, биомеханическая система, компьютерное зрение, кватернионы, локомоции, моделирование, пространственное движение, сферическая система координат.

Modern methods of biomechanical analysis of complex coordinated movements of an athlete are analyzed, including a full-scale experiment and the development of mechanical and mathematical models of purposeful movement. It is shown that one of the most difficult and time-consuming stages of the study is to obtain the trajectory positions of the athlete's body when performing the exercise. The features of using "motion capture" technology based on "computer vision" for these purposes are studied. The features of the development of mechanical and mathematical models of motion are shown, taking into account the method of obtaining the coordinates of the biomechanical system (BMS). Another method for obtaining spatial coordinates is proposed: using video shooting with cameras from 1 to 3 or more, with mathematical modeling of motion in spherical and Cartesian coordinates.

Keywords: biomechanical analysis, biomechanical system, computer vision, quaternions, locomotion, modeling, spatial motion, spherical coordinate system.

Введение

Любое исследование локомоций в области биомеханики спорта начинается с проведения натурального эксперимента, то есть с определения координат биомеханической системы во время выполнения спортивного упражнения [1], [2]. При этом необходимо отметить, что движение человека исследуется не только в рамках биомеханики, оно также является предметом изучения в других областях человеческой деятельности, например, в индустрии развлечений, в робототехнике и пр. В индустрии развлечений, например, в кинематографе, в производстве компьютерных игр, при создании мультипликационных фильмов и т. д., получили широкое развитие технологии «захвата движения». Они основаны на различных видах съемки, в том числе и видеосъемки. Общим для этих областей и для биомеханики является то, что предмет исследований у них один и тот же – человек, движение его опорно-двигательного аппарата, в том числе его локомоции [3], [4]. Общими являются и методы исследования, которые при биомеханическом

анализе спортивных упражнений должны учитывать специфику биомеханики и развиваться с учетом целей и задач данного научного направления.

Предварительно проведенные исследования показали перспективность использования такой технологии «захвата движения» как «компьютерное зрение» [5]. Данная технология относится к безмаркерным и обеспечивает получение координат человеческого тела за счет анализа видеозображения с помощью специальных компьютерных программ в автоматическом режиме, что, во-первых, значительно снижает трудоемкость расшифровки данных видеосъемки, и, во-вторых, позволяет на порядки усложнить решаемые в биомеханике задачи, а также ставить новые, ранее недоступные при использовании общепринятых на сегодняшний день методов и методик.

Отметим также, что при исследовании пространственного движения с использованием любых методов возникают общие задачи, как, например, показано на рисунках 0.1, а) – з). Здесь представлен прямой удар в среднюю часть

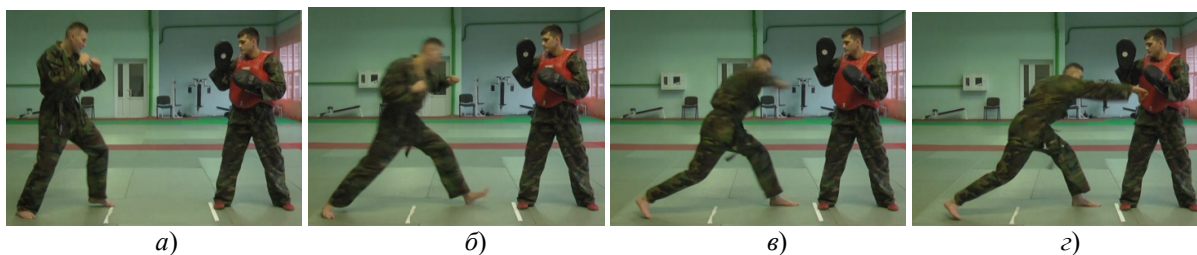


Рисунок 0.1 – Прямой удар рукой в среднюю часть туловища

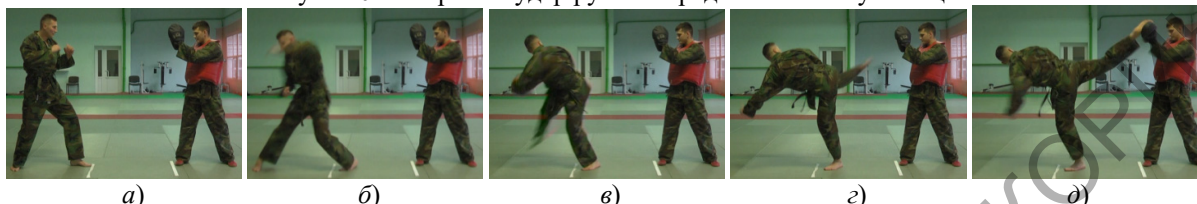


Рисунок 0.2 – Круговой удар ногой с разворота в область головы

туловища [6]. Анализ рисунков показывает, что, во-первых, движение такого сложного технического действия является пространственным, а, во-вторых, во время выполнения приема число опорных и контактных точек биомеханической системы (БМС) является переменным. Это принципиальный момент, так как с изменением числа и вида контактов спортсмена по рисункам 0.1, а) – z) меняются и сами механо-математические модели, и методы биомеханического анализа.

Например, на рисунке 0.1, а) спортсмен имеет 2 точки опоры. При переходе к рисунку 0.1, б) в какой-то момент спортсмен имеет 1 опорную точку, а на рисунке 0.1, z) уже 3. В общем случае в опоре возникает до 6 неизвестных реакций, а значит для всей БМС всего 18, и система становится статически неопределимой.

Изменение числа опорных точек, а также пространственный характер движения БМС хорошо виден на рисунках 0.2, а) – д), на которых показан круговой удар ногой с разворота в область головы.

Биомеханический анализ показанных спортсменами упражнений требует специальных видов съемки, например, с помощью технологии «компьютерного зрения», разработки алгоритмов расчета БМС и соответствующих математических моделей движения.

Также отметим, что исследование пространственных локомоций БМС возможно и с помощью обычной видеозаписи большим числом видеокамер с их синхронизацией во время съемок. В этом случае, кроме общих проблем пространственного движения сложных систем, каковой является опорно-двигательный аппарат человека, возникают проблемы разработки механо-математических моделей движения биомеханической системы и выбора системы координат, в которой будет описываться движение. Здесь инструментальные средства и методы создания математических моделей связаны между собой и взаимозависимы. При этом надо учитывать, что

даже при съемке большим числом камер часто не учитывают пространственный характер движения звеньев БМС, а значит и значительное искажение их размеров.

1 Исследование пространственного движения биомеханических систем с использованием технологии «захвата движения»

В настоящее время в биомеханическом анализе для получения координат звеньев биомеханической системы используют различные технологии «захвата движения», в основном маркерные. Безмаркерные имеют преимущество перед первыми – они не требуют специальных помещений, одежды и оборудования, для их осуществления необходимы лишь специализированные компьютерные программы [3]. На рисунках 1.1, а) – в) представлен пример использования безмаркерной технологии «захвата движения» в виде «компьютерного зрения». На рисунке 1.1, а) показан кадр видеосъемки, записанной программой iPi Recorder, на рисунке 1.1, б) представлен тот же кадр движения человека, обработанный в автоматическом режиме программой iPi Moscar Studio. Результатом является получение координат звеньев БМС в графическом и текстовом виде в формате BVH. Дальнейшие расчеты выполняются с помощью кватернионов [7]. На рисунке 1.1, в) выделен скелет БМС, который представляет собой его кинематическую модель.

Модель, применяемая в «компьютерном зрении» максимально приближает уравнения движения к реальному пространственному движению БМС. При этом возникают определенные проблемы на кинематическом и динамическом уровнях. Рассмотрим этот момент подробнее.

На рисунках 1.2 показан удар ногой в корпус, а на рисунке 1.3 – прямой удар рукой в среднюю часть туловища. В момент удара по рисунку 1.2 в опорной и ударной ногах возникают по 6 реакций – 3 силы X_1, Y_1, Z_1 , и 3 момента M_{X1}, M_{Y1}, M_{Z1} в опорной ноге; а также 3 силы $X_2,$

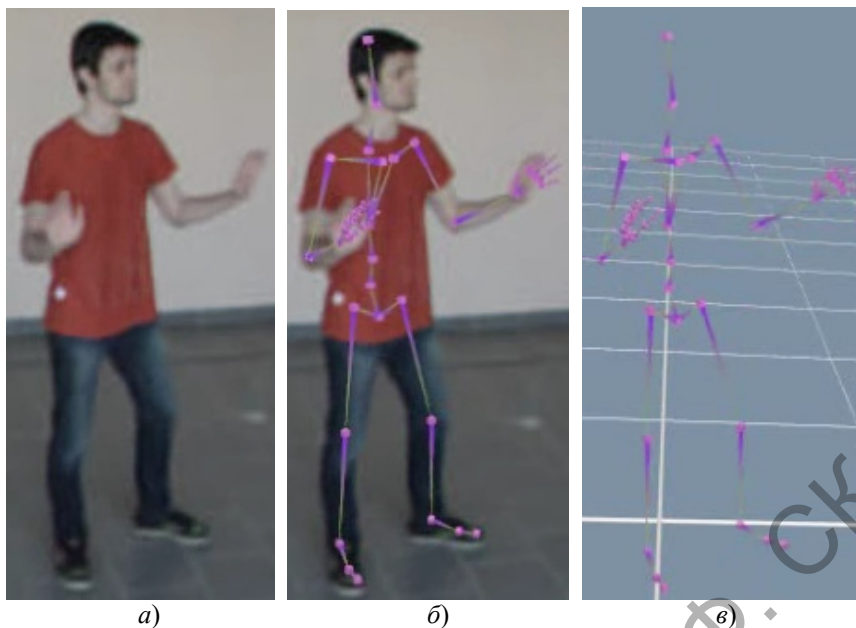


Рисунок 1.1 – Пример использования технологии «компьютерного зрения»: а) видеокادر из программы iPi Recorder; б) расшифрованный видеокادر из программы iPi Mocap Studio; в) модель БМС



Рисунок 1.2 – Удар ногой в корпус



Рисунок 1.3 – Прямой удар рукой в среднюю часть туловища

Y_2, Z_2 , и 3 момента M_{X2}, M_{Y2}, M_{Z2} в ноге ударной. Общее число неизвестных равняется 12. Анализ силовой схемы необходимо сочетать с анализом реальной техники удара. Последний позволяет считать равными нулю реакции $M_{X1}, M_{Y1}, Z_2, M_{X2}, M_{Y2}, M_{Z2}$. Таким образом, имеем 6 неизвестных реакций, и биомеханическая система является статически определимой.

На рисунке 1.3 в случае прямого удара рукой в конечной фазе имеем реакции $X_1, Y_1, Z_1, M_{X1}, M_{Y1}, M_{Z1}$ в одной опорной ноге, и $X_2, Y_2, Z_2, M_{X2}, M_{Y2}, M_{Z2}$ – во второй. Также в контакте при ударе в общем случае имеем неизвестные реакции $X_3, Y_3, Z_3, M_{X3}, M_{Y3}, M_{Z3}$. Всего 18 неизвестных реакций, и БМС является 12 раз статически неопределимой. Но анализ технического дейст-

вия по рисунку 1.3 позволяет в ряде случаев минимизировать число неизвестных до 9. Принимаем равными нулю реакции $M_{X1}, M_{Y1}, M_{X2}, M_{Y2}, M_{Z2}, Z_3, M_{X3}, M_{Y3}, M_{Z3}$. Система становится 3 раза статически неопределимой.

Таким образом, можно констатировать, что пространственные расчетные схемы силового анализа являются чрезвычайно динамичными, переходя многократно из состояния статической определимости в состояние статической неопределимости и обратно. Это требует разработки методов расчета статической неопределимости системы, которая на самом деле статической не является. Методы механики расчета статически неопределимых систем исходят из нулевых перемещений опорных точек системы и в прямом

виде для анализа биомеханических систем не подходят.

На рисунке 1.4 показана кинематическая модель БМС, с обозначением всех звеньев, а на рисунке 1.5 использование такой модели в исследовании пространственного движения. В данном случае на рисунке показан круговой удар ногой в момент контакта в области головы. Кинематическая модель БМС совмещена с изображением спортсмена.

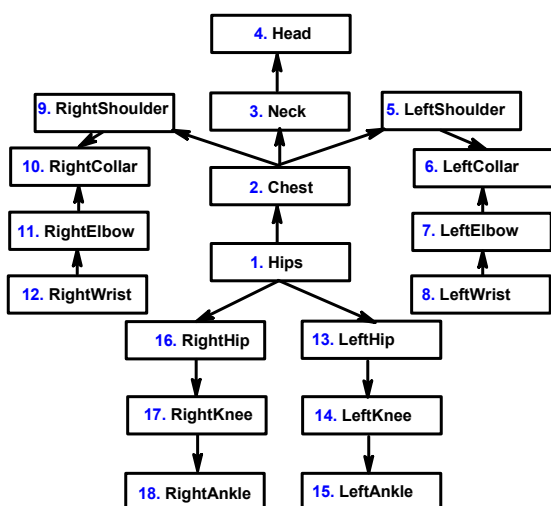


Рисунок 1.4 – Кинематическая модель БМС в «компьютерном зрении»



Рисунок 1.5 – Круговой удар ногой в момент контакта в области головы

По сути дела, на рисунках 1.4 и 1.5 модель БМС представляет собой графическое дерево, а с точки зрения математики является графом. Биомеханический анализ требует определенного порядка обхода узлов графа с учетом анатомии человека, техники спортивного упражнения и конкретной задачи анализа. Исследования показывают, что для этого необходимо математическую модель разбить на 7 структурных единиц (блоков). Для примера запишем уравнение для суставной реакции в виде функциональной связи по рисунку 1.4:

$$F_i = f_1 + f_2 + \sum_{j=3}^{N_z} f_j + \sum_{j=5}^{N_p^a} f_j + \sum_{j=9}^{N_p^{np}} f_j + \sum_{j=13}^{N_n^a} f_j + \sum_{j=16}^{N_n^{np}} f_j \quad (1.1)$$

где F_i – уравнение, описывающее биомеханическое состояние i -го звена; f_1 – уравнение, описывающее биомеханическое состояние 1-го звена (бедро); f_2 – уравнение, описывающее биомеханическое состояние 2-го звена (туловище);

$\sum_{j=3}^{N_z} f_j$ – уравнение, описывающее биомеханическое состояние звеньев 3 и 4 (голова);

$\sum_{j=5}^{N_p^a} f_j$ – уравнение, описывающее состояние звеньев 5–8 (левая рука);

$\sum_{j=9}^{N_p^{np}} f_j$ – уравнение, описывающее состояние звеньев 9–12 (правая рука);

$\sum_{j=13}^{N_n^a} f_j$ – уравнение, описывающее состояние звеньев 13–15 (левая нога);

$\sum_{j=16}^{N_n^{np}} f_j$ – уравнение, описывающее состояние звеньев 16–18 (правая нога).

Структура рекуррентных уравнений в динамике по выражению (1.1) включает в себя 7 блоков, которые между собой не пересекаются, а являются продолжением друг друга, совместно составляя опорно-двигательный аппарат спортсмена. В случае расчета динамических характеристик конкретного звена или сустава, из выражения (1.1) исключаются функции, не влияющие на исследуемый элемент, например, при силовом анализе БМС, а число звеньев соответствующей структуры N_z (голова), N_p^a (левая рука), N_p^{np} (правая рука), N_n^a (левая нога), N_n^{np} (правая нога) при необходимости уменьшается до номера изучаемого элемента.

При биомеханическом анализе динамической структуры упражнения, функциональная связь по выражению (1.1) может несколько изменяться в зависимости от вида динамических характеристик. Например, в математических моделях моментов управляющих сил мышечной системы число блоков может быть уменьшено, но принцип их сочетания остается прежним и диктуется задачей динамики, которая решается в конкретном исследовании.

Следующим важным моментом является выбор способа представления движения БМС, которое является сложным, то есть включающим переносное и относительное движения. Так в робототехнике движение роботов и манипуляторов делится на глобальное, региональное и локальное [8]–[10]. Данная классификация подходит и для задач биомеханики, так как локомоции в биомеханике и являются аналогом региональных

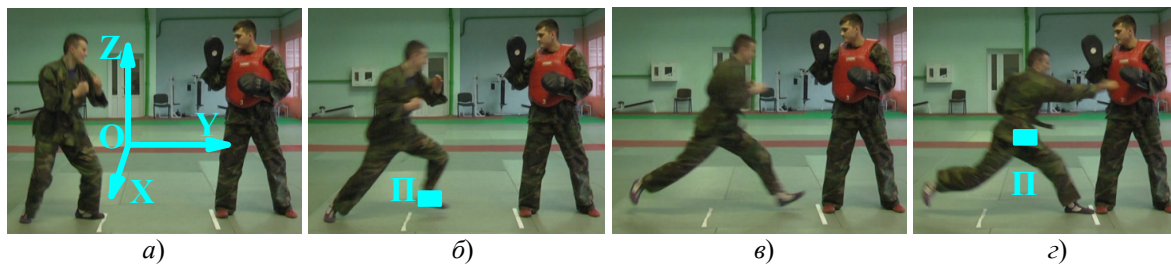


Рисунок 1.6 – Видеозапись прямого удара рукой в среднюю часть туловища с использованием короткого подшага

движений в робототехнике – это движение конечностей.

Другой подход заключается в представлении движения БМС как сложного. Выбирается полюс, который связан с БМС и перемещается относительно неподвижной (абсолютной) системы координат. Движение же звеньев рассматривается в несколько этапов: как движение относительно проксимального (родительского) сустава; а движение родительских суставов как сумма движений относительно полюса.

На рисунках 1.6, а) – г) показано перемещение спортсмена в абсолютной системе координат OXYZ (рисунок 1.6, а). На рисунке 1.6, б) в качестве примера показан полюс П в области стопы, на рисунке 1.6, в) – в тазобедренной области.

Разные способы выбора полюса в одном упражнении показаны только в качестве иллюстрации, так как вариант выбора в каждом конкретном случае должен быть только один. Математические модели движения разрабатываются исходя из принятой системы координат и классификации движения.

2 Моделирование пространственного движения биомеханических систем в сферической системе координат

В теории и практике биомеханического анализа движения в спорте для исследования сложно-координированных упражнений видеосъемку выполняют как минимум несколькими видеокамерами. При этом возникает несколько проблем. Это, во-первых, выбор координатной системы, связанной с методикой видеосъемки, с помощью которой необходимо просто, быстро и понятно описать пространственное движение БМС математически. По этим критериям подходит сферическая система координат [11]. Во-вторых, необходимо разработать методику такой съемки, так как в натурном эксперименте возможны ситуации, когда определенные звенья исчезают из поля зрения видеокамер.

На рисунке 2.1 показана схема видеосъемки спортивного упражнения из тяжелой атлетики 3-я камера, и там же дана система координат [12], [13].

На рисунке 2.2 представлена схема сочетаний зон видимости при съемке несколькими камерами. Здесь бедро спортсмена закрыто туловищем для камеры № 1, но попадает в зону видимости для видеокамеры № 3.

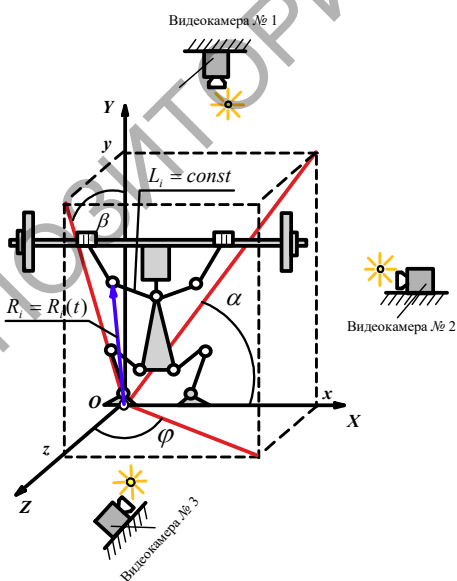


Рисунок 2.1 – Схема пространственной видеосъемки упражнения

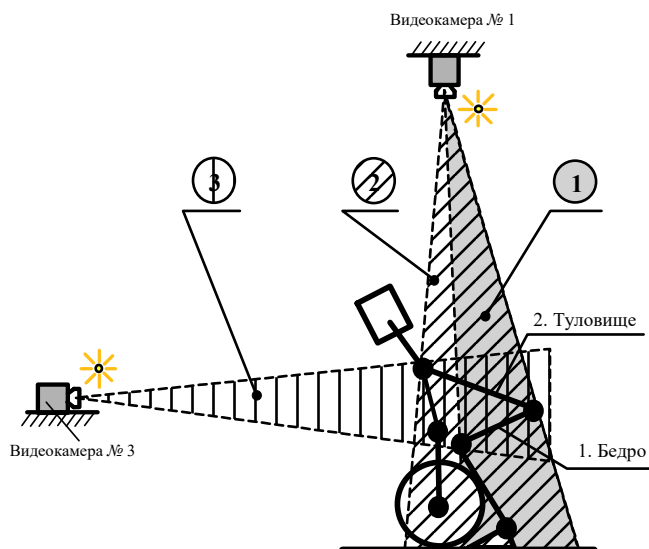


Рисунок 2.2 – Сочетание зон видимости звеньев с разных камер



Рисунок 2.3 – Рывок. Вес штанги 140 кг

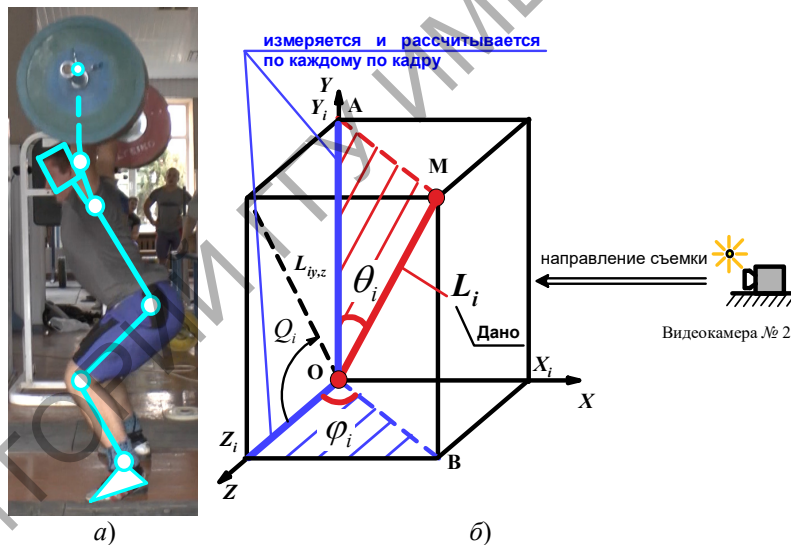


Рисунок 2.4 – Положения звеньев БМС в пространстве в проекции на сагитальную плоскость: а) кадр видеосъемки; б) пространственные координаты звена

На рисунках 2.3, а) – д) показано выполнение рывка штанги весом 140 кг [14]–[17]. Анализ рисунков 2.1–2.3 показывает, что наиболее информативна видеокамера № 2. На рисунке 2.4, а) показан кадр такой видеосъемки совмещенной с моделью БМС. А на рисунке 2.4, б) представлена схема координатных систем: декартовой прямоугольной и сферической при съемке камерой № 2.

Измерив на кадре проекции Y_i , Z_i каждого звена на продольную Y и сагитальную Z оси и имея действительные размеры звена L_i , легко рассчитать фронтальную координату X_i , и углы

сферической системы координат: наклона – θ , и азимута – φ . На основе рисунка 2.4 б) запишем уравнения для расчета координат и проекций

$$\theta_i = \arccos \frac{Y_i}{L_i}, \quad (2.1)$$

$$MA = OB = \sqrt{L_i^2 - Y_i^2}, \quad (2.2)$$

$$\varphi_i = \arccos \frac{Z_i}{OB} = \arccos \frac{Z_i}{\sqrt{L_i^2 - Y_i^2}}, \quad (2.3)$$

$$X_i = OB \sin \varphi_i = \sqrt{L_i^2 - Y_i^2} \sin \varphi_i. \quad (2.4)$$

Таким образом, выражения (2.1)–(2.4) позволяют получить пространственные декартовы и сферические координаты из результатов расшифровки кадров только одной (боковой) видеокамеры № 2.

При расчете необходимо действительные размеры звеньев перевести в масштаб кадра, или наоборот, проекции с кадра пересчитать в реальный масштаб размеров звеньев БМС.

Дополнительно найдем угол Q_i , так как именно он принимается за обобщенную координату при видеосъемке одной камерой № 2 в случае представления кинематической модели БМС как плоской в проекции на сагиттальную плоскость

$$Q_i = \arctg \frac{Y_i}{Z_i}. \quad (2.5)$$

В формуле (2.5) нет необходимости учитывать масштаб проекций.

Отметим, что применительно к задачам биомеханического анализа БМС имеем следующую функциональную связь в уравнениях движения для сферических координат отдельного звена

$$L_i = const, \quad (2.6)$$

$$\theta_i = \theta_i(t), \quad (2.7)$$

$$\varphi_i = \varphi_i(t). \quad (2.8)$$

Таким образом, в рамках исследуемой задачи целенаправленного движения БМС и принятой для этого кинематической модели опорно-двигательного аппарата спортсмена, обобщенными координатами звена относительно проксимального сустава являются угол наклонения θ и азимутальный угол φ .

В случае рассмотрения сферических координат в абсолютной (неподвижной) координатной системе имеем 3 обобщенные координаты для любой i -ой точки: R_i , θ_{R_i} , φ_{R_i} . Тогда по рисунку 2.4, б) имеем

$$R_i = R_i(t), \quad (2.9)$$

$$\theta_{R_i} = \theta_{R_i}(t), \quad (2.10)$$

$$\varphi_{R_i} = \varphi_{R_i}(t). \quad (2.11)$$

Точкой i может быть сустав, центр масс i -го звена и пр.

На основе уравнений (2.1)–(2.11) разрабатываются механо-математические модели движения биомеханической системы, исходя из принятой классификации движения БМС в целом и отдельно по звеньям. Наиболее удобно движение БМС показывать как сложное: с движением полюса и отдельно вращением звеньев в проксимальных суставах.

Заключение

Сложно-координированные движения в биомеханике спорта включают в себя движения всех частей биомеханической системы, при этом наиболее общим и сложным случаем является

пространственное движение человека. При этом получение траекторных положений спортсмена во время выполнения упражнения или иного технического действия является одним из важнейших и трудоемких этапов биомеханического анализа целенаправленного движения спортсмена. На современном этапе развития инструментальных средств исследования и методов моделирования движения перспективными являются две методики моделирования локомоций биомеханической системы: на основе технологии «захвата движения» с использованием «компьютерного зрения» и моделирование движения в сферической системе координат.

Проведенные нами исследования и апробация «компьютерного зрения» для биомеханического анализа пространственных локомоций человека позволили решить следующие задачи в биомеханическом анализе пространственного движения:

- увеличить число степеней свободы используемой кинематической модели биомеханической системы, приблизив ее движение к движению реального опорно-двигательного аппарата человека;

- автоматизировать процесс получения траекторных положений спортсмена в цифровом виде и на графическом уровне;

- разработать механико-математические модели целенаправленного движения на основе алгебры кватернионов, тем самым создавая основу для последующего биомеханического синтеза пространственного движения, так как кватернионы позволяют минимизировать трудоемкость вычислительного эксперимента, что составляет основную трудность в синтезе сложных систем;

- выявить проблемы и поставить задачи в области разработки математических моделей пространственного движения, например, в области разработки методов силового анализа статически неопределимых систем в движении.

Математическое моделирование целенаправленного движения биомеханической системы в сферической системе координат является еще одним способом исследования пространственного движения и позволяет решить следующие задачи:

- упростить видеосъемку спортивного упражнения, используя не только специальное оборудование, но и обычные видеокамеры;

- в ряде случаев получить пространственную картину движения с помощью одной камеры;

- значительно увеличить точность биомеханического анализа на кинематическом и динамическом уровнях при получении траекторных положений спортсмена по результатам видеосъемки одной камерой;

- при необходимости перевести данные биомеханического анализа в другие системы координат, например, в декартовую прямоугольную.

Описание движения в сферической системе координат не решает проблему автоматизации видеосъемки и расчетов координат – это отдельная задача, в отличие от технологии «захвата движения». Но он более доступен для получения линейных и угловых координат звеньев биомеханической системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Загrevский, В.И.* Биомеханика физических упражнений: учебное пособие. – Могилев: МГУ им. А.Л. Кулешова, 2003. – 140 с.

2. *Бегун, П.И.* Биомеханика: учеб. для вузов / П.И. Бегун, Ю.А. Шукейло. – СПб.: Политехника, 2000. – 463 с.

3. *Киркор, М.А.* Исследование пространственного движения в биомеханике спорта с помощью кватернионов / М.А. Киркор, А.Е. Показилов, А.М. Гальмак // Проблемы физики, математики и техники. – 2019. – № 4 (41). – С. 92–97.

4. *Исследование пространственного движения в биомеханике спорта* / А.Е. Показилов, М.А. Киркор, В.П. Пахадня, В.Н. Попов // Биомеханика двигательных действий и биомеханический контроль в спорте: материалы VII Всероссийской с международным участием научно-практической конференции, 21–22 ноября 2019 г., Москва. – Рос. гос. акад. физ. культуры, спорта и туризма, Моск. гос. акад. физ. культуры; ред.-сост. А.Н. Фураев. – М.: Малаховка, 2019. – С. 102–107.

5. *Киркор, М.А.* Математические модели движения в биомеханике спорта / М.А. Киркор, А.Е. Показилов, А.М. Гальмак // Научные и методические аспекты математической подготовки в университетах технического профиля: материалы Междунар. науч. пр. конф., 25 октября 2019 г., Гомель. – УО «Белорусский государственный университет транспорта». – Гомель: БелГУТ, 2019. – С. 18–21.

6. *Воронович, Ю.В.* Профессионально-прикладная физическая подготовка. Учебная программа учреждения высшего образования по учебной дисциплине для специальностей 1-93 01 01 «Правовое обеспечение общественной безопасности», 1-93 01 03 «Правовое обеспечение оперативно-розыскной деятельности» / Ю.В. Воронович, Д.А. Ревин. – Могилев. – 76 с.

7. *Kulpers, J.B.* Quaternions and rotation sequences / J.B. Kulpers. – Princeton, New Jersey. – 1999. – 371 с.

8. *Лесков, А.Г.* Кинематика и динамика исполнительных механизмов манипуляционных роботов: учебное пособие / А.Г. Лесков, К.В. Бажинова, Е.В. Селиверстова. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 102 с.

9. *Корендясев, А.И.* Теоретические основы робототехники. В 2-х кн. / А.И. Корендясев, Б.Л. Саламандра, Л.И. Тывес; отв. ред. С.М. Каплунов; Ин-т машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. – М.: Наука, 2006. – Кн. 1. – 2006. – 383 с.

10. *Булгаков, А.Г.* Промышленные роботы. Кинематика, динамика, контроль и управление. / А.Г. Булгаков, В.А. Воробьев // Серия «Библиотека инженера». – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2007. – 448 с.

11. *Григорьев, А.Ю.* Сферическое движение твердого тела: учебн.-метод. пособие / А.Ю. Григорьев, Д.П. Малякко, Л.А. Фёдорова // СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2014. – 37 с.

12. *Гусак, А.А.* Справочник по высшей математике / А.А. Гусак, Г.М. Гусак. – Минск: Наука і техника, 1991. – 480 с.

13. *Воронович, Ю.В.* Биомеханика тяжелоатлетических упражнений: монография / Ю.В. Воронович, Д.А. Лавшук, В.И. Загrevский; М-во внутр. дел Респ. Беларусь, УО «Могилевский институт Министерства внутренних дел Республики Беларусь». – Могилев: Могилевский институт МВД, 2014. – 196 с.

14. *Дубровский, В.И.* Биомеханика / В.И. Дубровский, В.Н. Федорова. – М.: ВЛАДОС-ПРЕСС, 2003. – 672 с.

15. *Киркор, М.А.* Математическое описание синтеза целенаправленного движения спортсмена / М.А. Киркор, А.Е. Показилов, А.М. Гальмак // Веснік МДУ імя А.А. Куляшова. Серыя В. Прыродазнаўчыя навук. – 2020. – № 1 (55). – С. 44–50.

16. *Воронович, Ю.В.* Сравнительный биомеханический анализ основных динамических характеристик техники рывка в тяжелой атлетике / Ю.В. Воронович, Д.А. Лавшук, В.И. Загrevский // Мир спорта. – 2013. – № 1 (50). – С. 35–40.

17. *Воронович, Ю.В.* Вариация основных кинематических характеристик штанги в тяжелоатлетическом упражнении «рывок» в зависимости от массы спортивного снаряда / Ю.В. Воронович, Д.А. Лавшук // Мир спорта. – 2015. – № 2 (59). – С. 66–69.

Поступила в редакцию 17.09.2020.