

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ДВИЖЕНИЯ В БИОМЕХАНИКЕ СПОРТА С ПОМОЩЬЮ КВАТЕРНИОНОВ

М.А. Киркор, А.Е. Покатилов, А.М. Гальмак

Могилевский государственный университет продовольствия

THE STUDY OF THE SPATIAL MOVEMENT IN BIOMECHANICS OF SPORTS WITH THE HELP OF QUATERNIONS

M.A. Kirkor, A.E. Pokatilov, A.M. Gal'mak

Mogilev State University of Food Technologies

В статье представлены исследования пространственного движения опорно-двигательного аппарата спортсмена с использованием модели биомеханической системы с 25 звеньями. Показано, что при анализе спортивного упражнения задача разбивается на ряд этапов: натурный эксперимент, автоматизированную обработку результатов видеосъемки, разработку математических моделей с использованием алгебры кватернионов, вычислительный эксперимент на ЭВМ. Для получения исходных данных вычислительного эксперимента предложено использовать технологию «компьютерного зрения» на основе программного комплекса *iPi Soft*. При этом математические модели разбиваются на две группы: описывающие движение полюса биомеханической системы и модели на основе кватернионов для описания механики поворотов звеньев в суставах опорно-двигательного аппарата спортсмена.

Ключевые слова: анализ движения, захват движения, кватернионы, компьютерное зрение, пространственное движение, полюс.

A study of the spatial movement of the musculoskeletal system of the athlete using a model of a biomechanical system with 25 links is presented. It is shown that in the analysis of sports exercises the problem is divided into a number of stages: full-scale experiment, automated processing of video results, the development of mathematical models using the algebra of quaternions and computational experiment on a computer. To obtain the initial data of the computational experiment, it is proposed to use the technology of "computer vision" based on the software complex *iPi Soft*. Thus the mathematical models are divided into two groups: those describing the movement of the pole of the biomechanical system, and the model based on quaternions for the description of the mechanics of the turns of the links in the joints of the musculoskeletal system of the athlete.

Keywords: motion analysis, motion capture, quaternions, computer vision, spatial motion, pole.

Введение

Существующие на сегодняшний день проблемы в организации экспериментальных исследований по биомеханике пространственного движения в спорте и отсутствие математических моделей, позволяющих адекватно описать такое движение для пространственной модели опорно-двигательного аппарата спортсмена с увязкой с вычислительными алгоритмами расчета по ним на ПЭВМ, ставят задачи как для теоретического исследования пространственного движения, так и задачи разработки методов, алгоритмов, компьютерных программ и аппаратной части для проведения натурного эксперимента [1].

При анализе любого вида движения в спорте: плоского или пространственного, возникает проблема получения обобщенных координат биомеханической системы (БМС). Проблема имеет несколько аспектов: это техническая возможность получения траекторных положений звеньев биосистемы как таковых и возможность в приемлемые сроки и с приемлемой точностью на следующем этапе выполнить вычислительный эксперимент [2], [3].

Применяемые в биомеханике спорта модели биомеханической системы имеют ряд существенных

недостатков: обычно модели описывают плоское движение, а математические модели для него построены с использованием рекуррентных отношений по результатам анализа трехзвенной БМС, то есть описывают частный случай [3], [4].

Более сложные варианты, т. е. пространственное движение спортсмена, при исследовании на экспериментальном и теоретическом уровнях разбиваются или на изучение движения отдельных звеньев, а не всей системы, или весьма сложны и очень трудоемки, и поэтому используются всего лишь модели БМС с небольшим числом звеньев, т. е. исследуются модели с малым числом степеней свободы. Отметим, что трудоемкость расчетов с увеличением числа звеньев в применяемой модели БМС при переходе к пространственному движению такова, что она является ограничивающим фактором, т. е. критичным. Многие теоретические и экспериментальные исследования не проводятся из-за невозможности их выполнения в приемлемых временных рамках.

Следующими важнейшими проблемами являются отсутствие математических моделей адекватно описывающих пространственное движение биомеханической системы с учетом ее

сложности, трудоемкости расчетов по ней параметров движения на кинематическом и динамическом уровнях по существующим алгоритмам, моделям и методикам, а также наличие определенных ограничений в применении большинства методов, изучающих пространственное движение [5].

Анатомия человеческого тела позволяет совершать только угловые плоские или пространственные движения звеньев в суставах. Перемещение всего тела спортсмена (БМС) является лишь следствием этого движения. Таким образом, исследования в области биомеханики поворота является приоритетной задачей при исследовании пространственного движения [6].

Использование направляющих косинусов при больших объемах вычислений с расчетной точки зрения невыгодны, а при решении задач биомеханики движения порой и невозможны, так как для каждого звена БМС требуется шесть уравнений да еще с учетом того, что каждый тригонометрический параметр с точки зрения компьютерных вычислений это подпрограмма, требующая своего времени вычисления [5], [7].

Использование в непосредственных вычислениях углов Эйлера – Крылова тоже сопряжено с определенными проблемами. В [5] отмечено, что любая система углов моделирует некоторый карданов подвес, который при определенных значениях углов будет отражать эффект складывания рамок этого подвеса, т. е. происходит вырождение кинематических уравнений.

В работах [5], [7], [8] показано, что применение кватернионов дает, во-первых, всего одно уравнение связи, позволяющее проще комбинировать вращения, а также избежать проблемы, связанной с невозможностью поворота вокруг оси независимо от совершённого вращения по другим осям, а также создает удобный и наглядный формализм.

1 Экспериментальное исследование пространственного движения биомеханической системы

Отметим, что многие методы, аппаратура и прочее, используемые в исследованиях по биомеханике спорта не обязательно разрабатываются для решения проблем спорта, первоначальное применение может быть иное. Например, широко применяемые в натурном эксперименте по получению траекторных положений спортсмена

видеокамеры имеют более общее назначение, чем только для спорта [9]. Поэтому анализ смежных областей промышленности, культуры и искусства показал, что в настоящее время развиваются методы и совершенствуется материальная часть, предназначенные для автоматизированного получения координат движущегося тела, робота, человека и т. д. без привязки к исследовательским задачам биомеханики движения в спорте. Применяются результаты такой работы в кинематографе при разработке спецэффектов, в компьютерных играх, съемке мультипликационных фильмов, в робототехнике, при распознавании человеческих эмоций и пр. [9]–[12].

Такие технологии получили общее название «захват движения» (*motion capture*). Более целенаправленный анализ существующего уровня техники и науки показывает перспективность применения технологии безмаркерного «захвата движения» под названием «компьютерное зрение» [13]. Отметим только, что применение «захвата движения» в кинематографе и биомеханике спорта преследует разные конечные цели: в кинематографе это визуализация необходимых движений нарисованных графических структур, а в биомеханике – получение исходных данных по координатам спортсмена во время выполнения упражнения для последующего проведения вычислительного эксперимента по соответствующим математическим моделям на кинематическом и динамическом уровнях [13]–[15].

На рисунке 1.1 показан фрагмент видеозаписи выполнения формального упражнения в карате (ката) компьютерной программой *iPi Recorder* по технологии «компьютерного зрения». Съемка проводилась 4-мя видеокамерами *Sony PlayStation Eye for PS3* со скоростью 60 кадров в секунду. Выполнял ката мастер спорта РБ А.Р. в спортивном комплексе МГУП.

Для экспериментального исследования пространственного движения была использована кинематическая схема опорно-двигательного аппарата человека, представленная на рисунке 1.2. Данная схема моделирует движение позвоночника, головы и отдельных сегментов конечностей: рук и ног, что позволяет в последующем получить кинематические и динамические характеристики движения с необходимой детализацией применительно к человеческому телу, определяемого нами как биомеханическая система (БМС).



Рисунок 1.1 – Видеозапись ката (карате) программой *iPi Recorder*

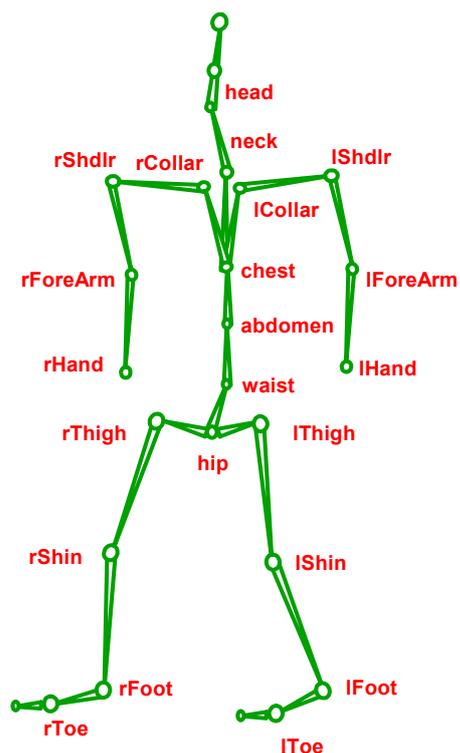


Рисунок 1.2 – Модель биомеханической системы

Такой подход позволил значительно увеличить степень свободы биомеханической системы (БМС) по сравнению с традиционно применяемой в биомеханике спорта, где зачастую ограничиваются всего тремя звеньями: ноги, туловище

и руки. В модели по рисунку 1.2 имеем 25 звеньев. Детализация увеличивается на порядок, при этом из плоской схема стала пространственной, что изменило ее качественно [16], [17].

Также отметим, что в человеческом теле с точки зрения механики суставы биомеханической системы (узлы) относят к одноподвижным, двухподвижным и трехподвижным. Это все узлы вращательного типа. На применяемой модели по рисунку 1.2 таких анатомических ограничений нет, что увеличивает точность применяемых математических моделей на кинематическом и динамическом уровнях.

На рисунке 1.3 показана отработка методики «компьютерного зрения» и проверка границ ее применимости. Условия видеосъемки специально затруднены и проводятся в учебной аудитории на сложном пестром фоне. Спортсмен одет в повседневную одежду.

На рисунке 1.4 показан еще один момент отработки «компьютерного зрения» после расшифровки и визуализации результатов программой *iPi Mocap Studio* [18]. Спортсмен одет в однотонного цвета спортивный костюм без всяких датчиков и маркеров и движется не только на сложном фоне, но и в условиях визуальных преград – штатив мешает видеосъемке. Тем не менее на результате анализа координат в виде графического скелета на рисунке 1.4 помеха не сказывается. На рисунке 1.5 показан тот же скелет по рисунку 1.4, но в отсутствии изображения спортсмена.



Рисунок 1.3 – Съемка «компьютерным зрением» в сложных условиях



Рисунок 1.4 – Видеокадр после расшифровки

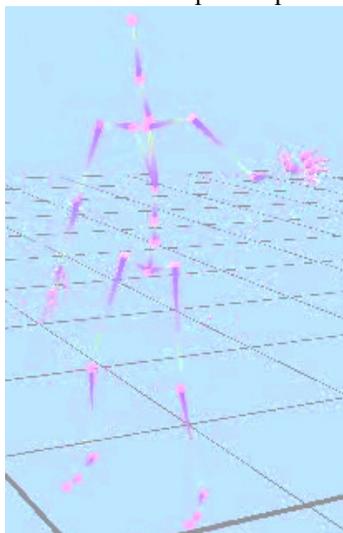


Рисунок 1.5 – Скелет БМС

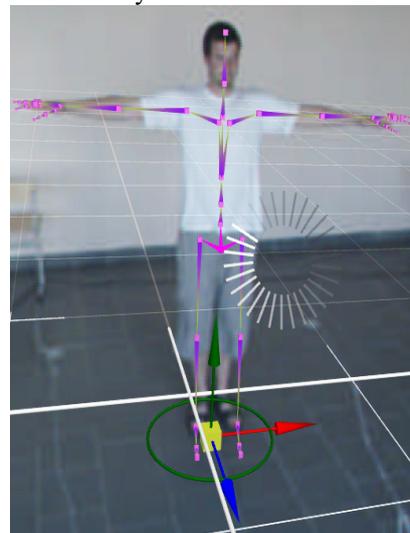


Рисунок 1.6 – Настройка «компьютерного зрения»

На рисунке 1.6 показана настройка «компьютерного зрения» на этапе расшифровки видеосъемки. Для этого типовой скелет применяемой модели биомеханической системы по рисунку 1.2 визуально подстраивается под размеры конкретного спортсмена. Данный этап существует во всех технологиях «захвата движения», использующих компьютерную обработку видеоизображения [11], [17].

Также отметим, что по рисунку 1.6 полюс настраиваемого типового скелета биомеханической системы находится в области ног (опора).

Так же укажем на важный момент в работе «компьютерного зрения»: результатом работы программы *iPi Recorder* и, прежде всего, *iPi Mocap Studio*, является файл формата *BVH* (*Bio Vision Hierarchical*) со структурой графической модели в виде графа и кадровыми координатами звеньев в суставах в виде углов Эйлера [13], [16]. Структура графа (графическое дерево) соответствует рисунку 1.2.

Именно наличие кадрово численных значений угловых координат в виде углов Эйлера всех звеньев биомеханической системы и позволяет выполнить в дальнейшем вычислительный эксперимент по кинематике и динамике пространственного движения по разработанным исследователем математическим моделям пространственного движения.

Отметим, что скорость расшифровки координат по технологии «компьютерного зрения» не выполняется в режиме *on-line*, но, тем не менее, занимает всего несколько часов и зависит только от мощности применяемой видеооплаты, так как вся расшифровка видео выполняется ею, а не процессором [18].

2 Математическое моделирование пространственного движения с использованием алгебры кватернионов

На рисунке 2.1 показан «захват движения» по технологии «компьютерного зрения» шестью камерами после выполнения расшифровки движения. Здесь скелет в автоматическом режиме наложен на изображение спортсмена.

Отметим, что на данном этапе компьютерной программой уже сформирован файл формата *BVH* с линейными координатами биомеханической системы в начальном положении и угловыми (углы Эйлера) координатами модели БМС по рисунку 1.2 для каждого звена покадрово.

На рисунке 2.1 имеем абсолютную (глобальную) координатную систему *Oxyz* и полюс *P*, расположенный в тазовой области БМС. Отметим разницу в понятии и назначении полюса в технологии «компьютерного зрения» (рисунок 1.6) и в биомеханике (рисунок 2.1). Также различно и их местоположение. В «компьютерном зрении» относительно полюса настраивается скелет БМС, а в биомеханике относительно полюса записываются все кинематические уравнения пространственного движения спортсмена [1], [2], [19].

Координата любого узла БМС \bar{R}_{O_i} по рисунку 2.1 в абсолютных координатах определяется как

$$\bar{R}_{O_i} = \bar{R}_{OP} + \sum_{k=1}^i \bar{r}_k. \quad (2.1)$$

Здесь радиус-вектор \bar{R}_{OP} определяет положение полюса БМС, находящегося в тазовой области тела спортсмена, вектор \bar{r}_k определяет уже положение каждого звена в пространстве относительно проксимального по отношению к полюсу

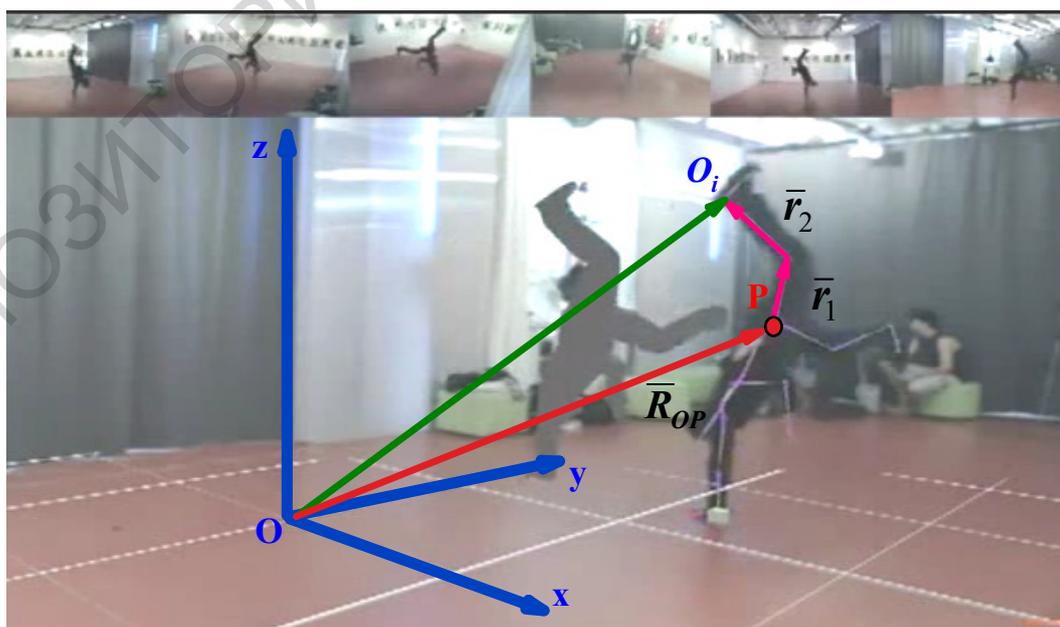


Рисунок 2.1 – Захват движения с помощью «компьютерного зрения»

сустава, то есть родительскому суставу по графическому дереву файла формата *BVH*.

Таким образом, в соответствии с уравнением (2.1) пространственное движение разбивается на два движения: на движение полюса ОР биомеханической системы и поворот каждого звена в соответствующем суставе. Последняя задача относится к механике поворотов [5]–[8].

Продифференцируем по времени выражение (2.1). В общем виде получим векторную скорость \bar{v}_{O_i} любой точки O_i биомеханической системы

$$\bar{v}_{O_i} = \frac{d\bar{R}_{O_i}}{dt} = \frac{d\bar{R}_{OP}}{dt} + \frac{d\left(\sum_{k=1}^i \bar{r}_k\right)}{dt}. \quad (2.2)$$

Выражение (2.2) можно использовать для получения линейных скоростей суставов БМС, центров масс звеньев и общего центра масс биосистемы.

Продифференцировав по времени уравнение (2.2), получим в общем виде уравнения для ускорений всех точек БМС. Имеем

$$\bar{a}_{O_i} = \frac{d\bar{v}_{O_i}}{dt}. \quad (2.3)$$

Выражение для ускорений (2.3) представлено в самом общем виде.

Важным моментом является тот факт, что необходимо математические модели и технологию «компьютерного зрения» связать в единое целое, и решать как сквозную задачу – «захват движения» обеспечивает исходными данными математические модели пространственного движения спортсмена, и поэтому последние должны разрабатываться под данный способ получения пространственных координат.

По технологии «компьютерного зрения» данные о движении показываются в виде иерархии основных узлов скелета человека, где вращение одних суставов относительно других представлено в виде кватернионов (роль вращающихся векторов выполняют кости скелета), а смещение представлено в виде трехмерных векторов в локальной для каждого узла системе координат:

$$T_{лок}^n = (x_n - x_{n-1}, y_n - y_{n-1}, z_n - z_{n-1}), \quad (2.4)$$

где $T_{лок}^n$ – локальное смещение каждого n -го узла относительно родительского узла, $n > 0$;

$$T_{глоб}^n = \prod_{i=0}^n T_{лок}^i, \quad (2.5)$$

$T_{глоб}^n$ – смещение n -го узла относительно глобальной системы координат;

$$Q_{глоб}^n = \prod_{i=0}^n Q_{лок}^i, \quad (2.6)$$

$Q_{глоб}^n$ – кватернион, представляющий вращение в глобальной системе координат (СК); $Q_{лок}^i$ – кватернион, представляющий вращение в локальной СК (относительно родительского элемента); n – порядковый номер узла в иерархической цепочке

скелета тела человека; i – порядковый номер дочернего узла в цепочке, $i < n$.

Таким образом, любой узел человеческого тела в представлении движения характеризуется вектором смещения T и кватернионом вращения Q , и для каждого кадра f имеем:

$$J_n = \langle Q_n T_n f \rangle = \begin{cases} n, f \in N, \\ Q \in H, \\ T \in R^3. \end{cases} \quad (2.7)$$

Получается, чтобы представить движение в формате *BVH*, необходимо найти соответствие между кватернионными представлениями углов вращений основных суставов человеческого тела и представлением этих же вращений в углах Эйлера и использовать математические модели (2.4)–(2.7).

Для данной технологии применения «компьютерного зрения» и алгебры кватернионов предложен общий алгоритм формализации движения в *BVH*-файле в виде блок-схемы.

Заключение

Исследование пространственного движения разбивается на ряд этапов, включающих разработку методов измерения траекторных положений спортсмена во время выполнения спортивного упражнения, разработку математических моделей на основе алгебры кватернионов и проведение вычислительного эксперимента на ПЭВМ. При этом методы измерения пространственных координат биомеханической системы, математические модели движения и расчетные алгоритмы вычислительного эксперимента составляют единый согласованный исследовательский комплекс, направленный на получение расчетных данных по кинематике и динамике пространственного движения с необходимой точностью для многозвенной пространственной биосистемы и с разумной трудоемкостью расчетов как при решении задач анализа целенаправленного движения так и его синтеза.

Одним из важнейших элементов исследования пространственного движения является «компьютерное зрение». Исследование и экспериментальная апробация данного метода на примере некоторых видов спорта и обычного повседневного пространственного движения показали устойчивость данного метода к помехам при видеосъемке, а также устойчивость к сложному фону, на котором перемещается биомеханическая система.

Также экспериментально установлено, что данная технология «захвата движения» предъявляет низкие требования к одежде и обуви человека – сниматься можно в специализированной спортивной форме, например, в кимоно, в повседневной одежде и в одноцветном спортивном костюме.

Теоретические исследования по кинематике пространственного движения показали, что

математические модели движения биомеханической системы имеют следующую структуру: первая часть описывает перемещение полюса биомеханической системы, расположенного в области общего центра масс (ОЦМ) биосистемы (тазовая область), а вторая часть описывает перемещение каждого звена (кости) тела спортсмена. При этом все звенья совершают вращательное движение в проксимальных по отношению к ОЦМ суставах.

Следовательно, математические модели построены таким образом, что учитывают два уровня движения каждого сустава (узла): локальный и глобальный. Локальный отображает кинематику движения относительно проксимального (родительского) сустава звена. На глобальном же уровне определяют смещение каждого сустава в глобальной (неподвижной, абсолютной) координатной системе. Разделение математических моделей на локальный и глобальный уровни относится как к линейному перемещению, так и к кватернионам, описывающим вращательное движение звеньев (костей).

Исследования пространственного движения на кинематическом уровне являются основой для изучения динамики целенаправленного движения спортсмена. В этом случае на кинематическом уровне должны быть не только уравнения линейных и угловых координат, но и их первые и вторые производные по времени.

Предложенный триединый исследовательский методический комплекс позволяет автоматизировать получение координат пространственного движения спортсмена на основе использования «компьютерного зрения», на порядок усложнить применяемые модели биомеханической системы, приблизив их к реальному скелету человека, и с использованием алгебры кватернионов выполнить вычислительный эксперимент по оптимальным алгоритмам с минимальным временем расчета, что является критичным в случае анализа и синтеза пространственного движения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бегун, П.И.* Моделирование в биомеханике: учеб. пособие / П.И. Бегун, П.Н. Афонин. – М.: Высш. шк., 2004. – 390 с.
2. *Покатилов, А.Е.* Биодинамические исследования спортивных упражнений в условиях упругой опоры / А.Е. Покатилов, В.И. Загrevский, Д.А. Лавшук. – Минск: Изд. центр БГУ, 2008. – 279 с.
3. *Покатилов, А.Е.* Биомеханика взаимодействия спортсмена с упругой опорой / А.Е. Покатилов; под ред. В.И. Загrevского. – Минск: Изд. центр БГУ, 2006. – 351 с.
4. *Бегун, П.И.* Биомеханика: учеб. для вузов / П.И. Бегун, Ю.А. Шукейло. – СПб.: Политехника, 2000. – 463 с.
5. *Бранец, В.Н.* Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела / В.Н. Бранец, И.П. Шмыглевский. – М.: Наука, 1973. – 320 с.

6. *Борисенко, Л.А.* Манипуляторы: Механика поворотов / Л.А. Борисенко. – Мн.: Тэхналогія, 2001. – 121 с.

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

8. *Мирмович, Э.Г.* Алгебра кватернионов и вращения в трехмерном пространстве / Э.Г. Мирмович, Т.В. Усачева // Научные и образовательные гражданской защиты. – 2009. – № 1. – С. 71–79.

9. *Техническое зрение роботов* / В.И. Мошкин, А.А. Петров, В.С. Титов, Ю.Г. Якушенков; под общ. ред. Ю.Г. Якушенко. – М.: Машиностроение, 1990. – 272 с.

10. *Орлова, Ю.А.* Обзор современных автоматизированных систем распознавания эмоциональных реакций человека / Ю.А. Орлова, В.Л. Розалиев // Изв. Волг. ГТУ. Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах». Вып. 10: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – 2011. – № 3. – С. 68–72.

11. *Развитие системы автоматизированного определения эмоций и возможные сферы применения* / А.В. Заболеева-Зотова, Ю.А. Орлова, В.Л. Розалиев, А.С. Бобков // Открытое образование. – 2011. – № 2. – С. 59–62.

12. *Покатилов, А.Е.* Проблемы исследования механики движения опорно-двигательного аппарата человека / А.Е. Покатилов, М.А. Киркор // Проблемы физики, математики и техники. – 2017. – № 1 (30). – С. 59–67.

13. *Методы обработки и распознавания изображений лиц в задачах биометрии* / Г.А. Кухарев [и др.]. – М.: Политехника, 2013. – 416 с.

14. *Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения* / С.Ю. Желтов [и др.]. – М.: Физматкнига, 2010. – 672 с.

15. *Розалиев, В.Л.* Анализ видеоряда для определения эмоциональных реакций человека / В.Л. Розалиев, А.С. Бобков, О.С. Федоров // Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации и бизнесе (IT+SE'10). Майская сессия (Украина, Крым, Ялта – Гурзуф, 20–30 мая 2010 г.): матер. XXXVII Междунар. конф. и дискуссионного науч. клуба: прилож. к журн. «Открытое образование» / РАН [и др.]. – Б/м, 2010. – С. 79–81.

16. *Шати́ро, Л.* Компьютерное зрение / Л. Шати́ро, Дж. Стокман. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2006. – 752 с.

17. *Форсайт, Д.* Компьютерное зрение. Современный подход / Д. Форсайт, Ж. Понс. – М.: «Вильямс», 2004. – 928 с.

18. *Лукьяница, А.А.* Цифровая обработка видеоизображений / А.А. Лукьяница, А.Г. Шишкин. – М.: «Ай-Эс-Эс Пресс», 2009. – 518 с.

19. *Покатилов, А.Е.* Математическое моделирование движения биомеханической системы / А.Е. Покатилов // Проблемы физики, математики и техники. – 2013. – № 4 (17). – С. 95–99.

Поступила в редакцию 18.07.19.