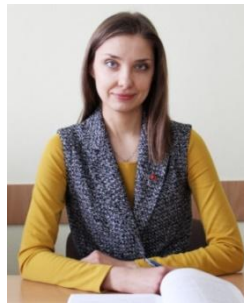


УДК 004.021:004.622:004.043

## КИНЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЙ ЧЕЛОВЕКА НА БАЗЕ МАТРИЦ РАССТОЯНИЙ



**Д.И. Гусейнов**  
Аспирант кафедры  
«Спортивная инженерия БНТУ»  
guseynov.daniil@yandex.by



**Н.С. Давыдова**  
Доцент кафедры  
инфокоммуникационных  
технологий, кандидат  
технических наук, доцент  
davydova-ns@bsuir.by

### **Д.И. Гусейнов**

Окончил Белорусский национальный технический университет. Область научных интересов связана с разработкой методов и алгоритмов обработки, автоматизированного анализа и оценки данных.

### **Н.С. Давыдова**

Окончила Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. Область научных интересов связана с исследованием сетевых технологий, микропроцессорных устройств, исследование особенностей цифровой обработки сигналов, организацией учебного и научно-исследовательского процессов в техническом университете.

**Аннотация.** В статье рассмотрен подход анализа и контроля техники спортивных движений с использованием данных системы захвата движений и нормированных матриц расстояний. Выполнен анализ кинематической структуры тела спортсмена, а также некоторые аспекты формирования содержания нормированных матриц расстояний. Приведен матрицы расстояний для ключевых поз спортсмена в технике бега на 400 м.

**Ключевые слова:** системы захвата движений, матрицы, нормализация, кинематика, модель.

**Введение.** Системы захвата движений, в основе которых лежат различные вычислительные технологии, используются во многих сферах жизнедеятельности человека с целью поддержки принятия решения, предоставления необходимого и содержательного объема достоверных данных, обеспечения безопасности, автоматизация промышленных и гражданских процессов [1]. Наиболее насыщенными технологиями захвата движений областями является строительство, робототехника и автомобилестроение [2]. В силу своих функциональных и вычислительных возможности системы захвата движений все чаще используются в других областях. Одними из наиболее перспективных областей для использования подобных систем являются область спортивной тренировки и спортивных исследований.

Наиболее актуальными и труднорешаемыми задачами, формируемыми в рамках современной спортивной тренировки вне зависимости от вида спорта, являются задачи, связанные с контролем динамики подготовленности, повышение его двигательной производительности, совершенствование техники выполнения двигательных действий, снижение риска травматизма, а также, что в значительной степени актуально в последнее

время, формирование и предоставление спортсмену объективной и содержательной обратной связи [3]. К задачам, непосредственно решаемым в области спортивных исследований, относятся изучение биомеханических механизмов организации двигательного действия, комплексный анализ и синтез целостного упражнения или отдельных его частей [4]. Все обозначенные задачи в необходимой и достаточной степени решаются с использованием систем захвата движений.

Несмотря на тот факт, что системы захвата движений могут применяться в самых различных областях, а предоставляемые ими данные могут быть использованы при решении задач различной сложности и комплексности, главной проблемой, ограничивающей использование таких систем, является формат и структура представления данных для дальнейшей их предметной обработки и анализа. В частности, в области спортивной биомеханики часто рассматривается тело спортсмена как структурная совокупность биокинематических звеньев и сочленений. Часто такая структурная совокупность представляет собой большой содержательный набор данных. В данном случае необходимо использовать такой формат и структуру данных, которая позволила бы сохранить полноту биомеханических признаков, характерных для того или иного двигательного действия. Наиболее подходящей структурой данных, позволяющей сохранить такие признаки с учетом широты регистрируемой и обрабатываемой информации, а также однозначно количественно описать двигательное действие, является матрица расстояний для каждой позы в ключевые моменты времени, а в качестве формата данных, наполняющих матрицу, – нормализованные показатели пространственного расстояния.

**Кинематическая модель тела спортсмена.** Базовая модель тела человека при решении прикладных задач спортивной биомеханики структурно состоит из трех звеньев – ноги, туловище, руки. Однако подобная модель является плоскостной, не обладает достаточной детализацией для анализа сложных многоплоскостных двигательных действий, сочетающих в себе поступательное и вращательное движение, а также характеризуется наличием определенных критических анатомических ограничений [5, 6]. В современной спортивной биомеханике в рамках решения задач, связанных с количественным анализом и оценкой двигательных действий спортсмена, вне зависимости от вида спорта и пространственной сложности упражнения, используется формализованная модель тела человека, которую можно представить в виде упорядоченного древовидного графа (с англ. – «*tree-structured graph*», «*tree-structured kinematic chain*») [7, 8]. Обобщенное представление подобной модели представлено на рисунке 1 [9].

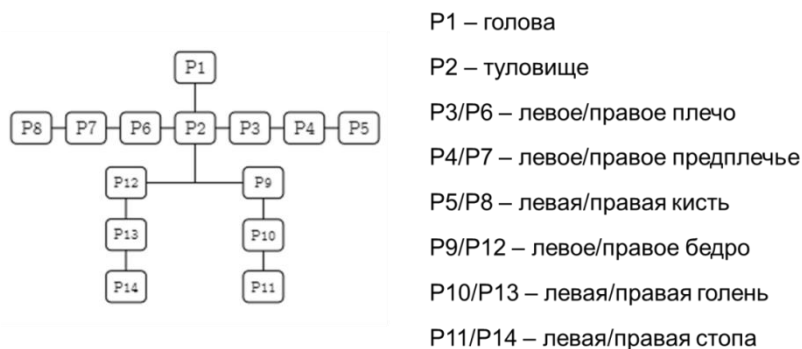


Рисунок 1. Обобщенная модель тела спортсмена в формате упорядоченного древовидного графа [9]

Данный формат модели содержит в себе необходимый и достаточный объем информации, позволяет отразить все ключевые биокинематические звенья и сочленения, а также структурные взаимосвязи между ними.

Подобные модели рассматриваются в пределах некоторого пространства (чаще всего, трехмерного) и данные, характеризующие относительное и абсолютное пространственное положение каждого угла представляют собой проекцию на координатные оси, определяющие ориентацию пространства. Объем и формат данных, получаемых с использованием кинематической модели структуры упорядоченного древовидного графа, различается в зависимости от области применения и решаемой задачи. Наиболее распространенным исходным форматом представление данных, характеризующих двигательные действия человека, является матричное представление. В рамках подобного представления данные подразделяются на отдельные совокупности, каждая из которых соответствует пространственной позе в текущий момент времени (рисунок 2).

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{c} \downarrow n \\ \left[ \begin{array}{c} \begin{array}{c} \xrightarrow{m} \\ \left[ \begin{array}{c} [x_{01}, y_{01}, z_{01}], [x_{02}, y_{02}, z_{02}], \dots [x_{0i}, y_{0i}, z_{0i}] \\ [x_{11}, y_{11}, z_{11}], [x_{12}, y_{12}, z_{12}], \dots [x_{1i}, y_{1i}, z_{1i}] \\ \dots \\ [x_{j1}, y_{j1}, z_{j1}], [x_{j2}, y_{j2}, z_{j2}], \dots [x_{ji}, y_{ji}, z_{ji}] \end{array} \right] \end{array} \end{array} \end{array}
 \end{array}$$

Рисунок 2. Матричное представление кинематики двигательных действий человека в 3-х мерном пространстве

Содержание матрицы представляет собой пространственные координаты каждого узла, совокупность которых составляет целостную кинематическую модель. Размер матрицы определяется количеством строк и столбцов ( $m \times n$ , где  $m$  – количество узлов, используемых для описания тела человека в формате кинематической модели;  $n$  – количество моментов времени, в течение которых осуществлялось двигательное действие) [10]. Подобное представление является наиболее удобным и распространенным для количественного описания двигательных действий человека, которое представляет собой совокупность последовательных поз в пространстве. Для каждой из этих поз характерно уникальная совокупность пространственных координат каждого узла. Однако главными недостатками данного представления является наличие погрешности, связанной с антропометрическими размера тела спортсмена и отдельных его сегментов, а также малоинформативное содержание данных, особенно при их анализе в масштабе одного момента времени (одна поза). В таком случае получается не полноценная матрица, а вектор-строка.

**Нормированная матрица расстояний.** Более совершенным и содержательным форматом и структурой данных является нормированная матрица расстояний, которая содержит в себе числовые значения расстояний одних сочленений относительно других (рисунок 3) [11].

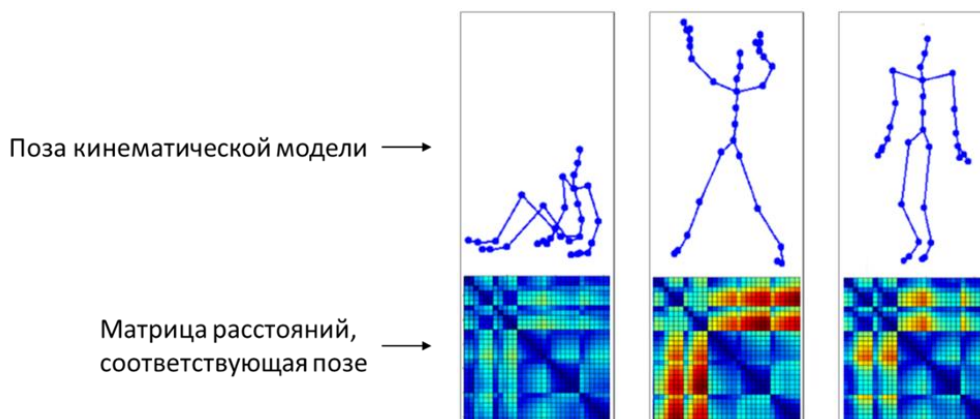


Рисунок 3. Визуализация представления кинематической модели тела человека на основании матрицы расстояний [11]

Наиболее распространенной и фундаментальной метрикой для формирования матрицы расстояний (вне зависимости от размерности пространства) является евклидова метрика, определяющая геометрическое расстояние между точками в  $n$ -мерном евклидовом пространстве (1) [12]:

$$d(p, q) = \sqrt{(p_1 - q_1)^2 + (p_2 - q_2)^2 + \dots + (p_n - q_n)^2} \quad (1)$$

где  $d(p, q)$  – геометрическое расстояние между точками  $p$  и  $q$  в  $n$ -мерном пространстве;  
 $n$  – размерность пространства.

Однако расчета значений евклидовой метрики недостаточно. Необходимо также осуществить нормализацию данных. Одним из способов нормализации является вычисления отношения длины цепи к пространственному расстоянию (значение евклидовой метрики). Длине цепи соответствует фактическое расстояние между точками (сумма длин звеньев, входящих в цепь). Данное отношение рассчитывается по формуле (2) [13]:

$$dn(p, q) = \frac{d(p, q)}{r(p, q)} \quad (2)$$

где  $dn(p, q)$  – нормализованное геометрическое расстояние между точками  $p$  и  $q$  в  $n$ -мерном пространстве;

$r(p, q)$  – фактическая длина цепи.

**Нормированная матрица расстояний в анализе и контроле технической подготовленности спортсменов.** Нормированная матрица расстояний в масштабе позы позволяет сохранить всю полноту биомеханических признаков, характерных для того или иного двигательного действия. К числу таких признаков относятся прежде всего пространственные, выраженные в величинах суставных углов всех сочленений, используемых в структуре модели. Однако величины суставных углов в матрице не представлены явно, а обозначены через значения расстояния тех или других сочленений относительно друг друга. В частности, на рисунках 4-6 представлены примеры нормированных матриц расстояний для ключевых поз в технике бега на 400 м.

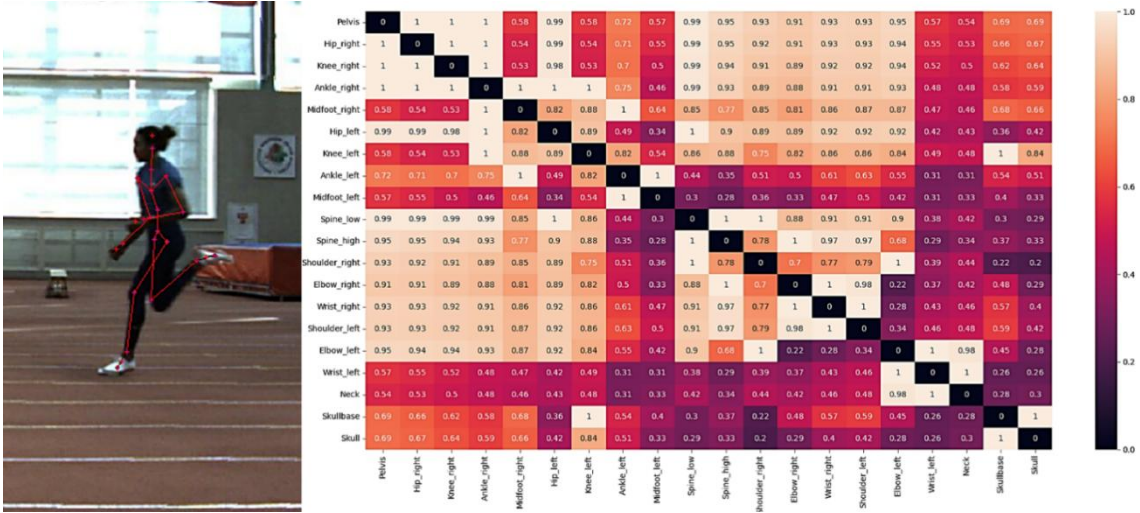


Рисунок 4. Нормированная матрица расстояний для момента контакта спортсмена с поверхностью опоры

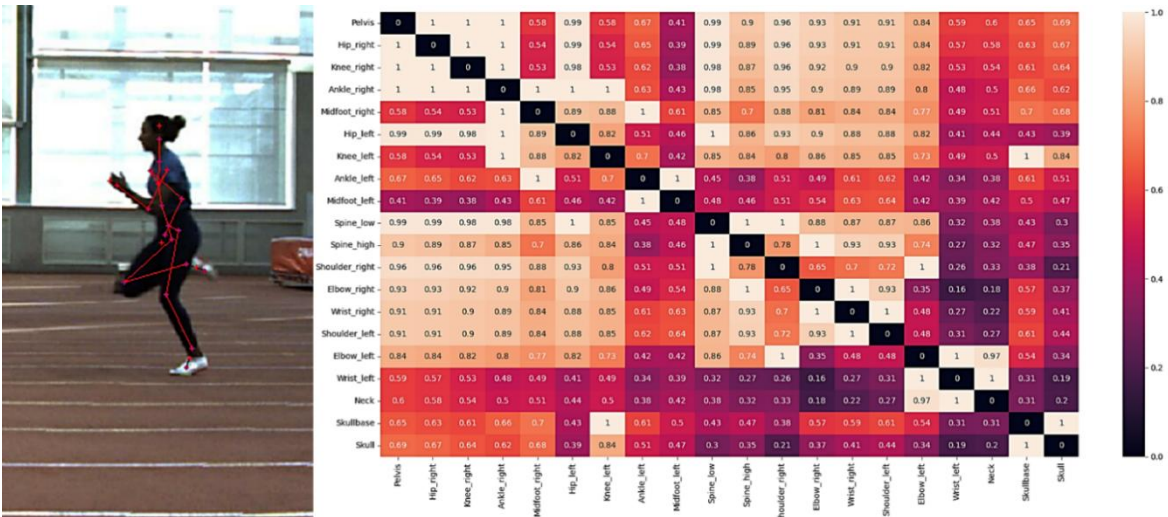


Рисунок 5. Нормированная матрица расстояний для момента амортизации спортсмена

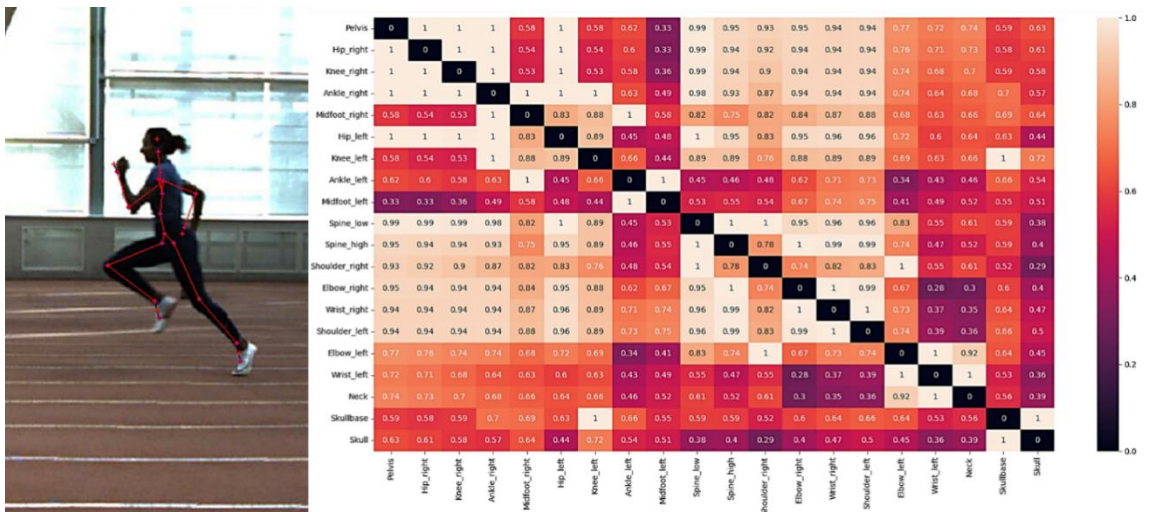


Рисунок 6. Нормированная матрица расстояний для момента отрыва спортсмена от поверхности опоры

На основании данных, содержащихся в матрицах, имеется возможность анализировать технику двигательных действий спортсмена на предмет соответствия модельных характеристикам, сравнивать технику двигательных действий спортсменов друг с другом, контролировать и отслеживать стабильность двигательного стереотипа в зависимости от этапа подготовки. Кроме того, такая структура и формат представления данных в силу своей упорядоченности и структурной стандартизованности, может быть использована для дальнейшей обработки в качестве входных данных в составе различных вычислительных алгоритмов, описывающих принципы работы систем автоматизированного анализа и контроля технической подготовленности спортсменов.

**Заключение.** Системы захвата движений позволяют получать большой объем полезной и содержательной информации. Главной проблемой и ограничением внедрения таких систем в различные области жизнедеятельности заключается в сложности структурирования и форматирования такой информации. Нормированные матрицы расстояний для отдельных поз позволяют решать множество актуальных прикладных задач в области спортивной биомеханики, поскольку позволяют количественно учесть пространственную сложность двигательных действий, а также сохранить их ключевые биомеханические признаки.

### Список литературы

- [1] Bortolini M., Faccio M., Gamberi M., Pilati F. Motion Analysis System (MAS) for production and ergonomics assessment in the manufacturing processes. *Computers & Industrial Engineering*. 2020;139:105485. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.10.046>
- [2] Menolotto M., Komaris D., Tedesco S., O'Flynn B., Walsh M. Motion Capture Technology in Industrial Applications: A Systematic Review. *Sensors (Basel)*. 2020;20(19):5687. <https://doi.org/10.3390/s20195687>
- [3] Платонов В.Н. Двигательные качества и физическая подготовка спортсменов. К.: Олимп. лит., 2017. – 656 с.
- [4] Sian B., Button C. A Review of Vision-Based Motion Analysis in Sport. *Sports Medicine*. 2008;38(12):1025–1043. <https://doi.org/10.2165/00007256-200838120-00006>
- [5] Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2006. – 752 с.
- [6] Форсайт Д., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход. М.: «Вильямс», 2004. – 928 с.
- [7] Sedmidubsky J., Elias P., Zezula P. Effective and efficient similarity searching in motion capture data. *Multimedia Tools and Applications*. 2017;77:12073–12094. <https://doi.org/10.1007/s11042-017-4859-7>
- [8] Wang J., Tan S., Zhen X., Xu S., Zheng F., He Z., Shao L. Deep 3D human pose estimation: A review. *Computer Vision and Image Understanding*. 2021;210:103225. <https://doi.org/10.1016/j.cviu.2021.103225>
- [9] Khan M. H., Schneider M., Farid M.S., Grzegorzec M. Detection of Infantile Movement Disorders in Video Data Using Deformable Part-Based Model. *Sensors*. 2017;18(10):3202. <https://doi.org/10.3390/s18103202>
- [10] Parag A., Ketaki A., Prabhakaran B. Robust blind watermarking mechanism for motion data streams. In *Proceedings of the 8th workshop on Multimedia and security (MM&Sec '06)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. 2006:230–235. <https://doi.org/10.1145/1161366.1161407>
- [11] Vieira A.W., Schwartz W.R., Campos M., Lewiner T. Distance Matrices as Invariant Features for Classifying MoCap Data. *Proceedings of the 21st International Conference on Pattern Recognition (ICPR2012)*, Tsukuba, Japan. 2012:2934–2937.
- [12] Deza M.M., Deza E. *Encyclopedia of Distances*. Springer, 2014. – P 103.
- [13] Bernardin A., Hoyet L., Mucherino A., Gonçalves D., Multon F. Normalized Euclidean distance matrices for human motion retargeting. 2017:1–6. <https://doi.org/10.1145/3136457.3136466>

### Авторский вклад

**Гусейнов Даниил Истамович** – описание принципа формирования матриц расстояний, описание нормированной матрицы расстояний в анализе и контроле технической подготовленности спортсменов, сбор, обработка, анализ и визуализация экспериментальных материалов.

**Давыдова Надежда Сергеевна** – постановка задачи исследования, описание кинематической модели тела спортсмена, формирование структуры статьи.

## **KINEMATIC MODEL OF HUMAN MOVEMENTS BASED ON DISTANCE MATRICES**

***D.I. Guseinov***

*PhD student of sports engineering  
department of BNTU*

***N.S. Davydova***

*Associate Professor of the  
Academic department of  
infocommunication technologies,  
PhD of Technical Sciences,  
Associate Professor*

**Abstract.** The article considers an approach to the analysis and control of sports movement techniques using motion capture system data and normalized distance matrices. The kinematic structure of the athlete's body is analyzed, as well as some aspects of the formation of the content of normalized distance matrices. The distance matrix for the key poses of an athlete in the 400 m running technique is given.

**Keywords:** motion capture systems, matrices, normalization, kinematics, model.