

УДК 004.021:796

## АНАЛИЗ ШАГОВЫХ И БЕГОВЫХ ЛОКОМОЦИЙ ЧЕЛОВЕКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТРИЦ РАССТОЯНИЯ

Д. И. ГУСЕЙНОВ<sup>1</sup>, Н. С. ДАВЫДОВА<sup>2</sup>, М. В. ДАВЫДОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет физической культуры, пр-т Победителей 105, 220020,  
Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроник, ул. П. Бровки, 6, 2200013,  
Минск, Беларусь

**Аннотация.** В работе представлен метод биомеханического анализа шаговых и беговых локомоций на основе данных захвата движений и матриц расстояний. Рассматриваются математические операции обработки многомерных данных для стандартизации и визуализации двигательных действий человека. Предлагается метод нормализации данных на основе евклидовой метрики, что позволяет учесть антропометрические особенности пациента и значительно повысить точность анализа. Результаты работы демонстрируют перспективы использования предложенного подхода для улучшения диагностики и персонализации реабилитационных программ при патологиях двигательного аппарата.

**Ключевые слова:** шаговые и беговые локомоции, диагностика, захват движений, матрицы расстояний

## ANALYSIS OF HUMAN WALKING AND RUNNING LOCOMOTIONS USING DISTANCE MATRICES

D. I. GUSEINOV<sup>1</sup>, N. S. DAVYDOVA<sup>2</sup>, M. V. DAVYDOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State University of Physical Culture, 105 Poboditeley Ave.,  
220020, Minsk, Belarus

<sup>2</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 6 P. Brovki str.,  
2200013, Minsk, Belarus

**Abstract.** The method for biomechanical analysis of walking and running locomotions based on motion capture data and distance matrices is presented in the paper. Mathematical operations of multidimensional data processing for standardization and visualization of human motor actions are considered. A method of data normalization based on Euclidean metrics is proposed, which allows taking into account the anthropometric characteristics of the patient and significantly improving the accuracy of the analysis. The results of the work demonstrate the prospects of using the proposed approach to improve the diagnosis and personalization of rehabilitation programs for pathologies of the motor apparatus.

**Key words:** walking and running locomotion, diagnostics, motion capture, distance matrices

### Введение

Практически каждый человек, за исключением людей с ограниченными возможностями, ежедневно преодолевает расстояние 1–3 км пешком. Известно, что биомеханические характеристики ходьбы являются надежными количественными индикаторами физического, а также психического здоровья человека. Известно, что наличие различных патологий шаговых локомоций вызывают дисфункции опорно-двигательного аппарата [1], нарушают нормальную работу сердечно-сосудистой системы [2], а также могут вызывать расстройства психического здоровья [3]. В области прикладной медицины биомеханический анализ шаговых и беговых локомоций, а также количественная и качественная оценка позы человека используется при постановке и уточнении диагноза, разработке терапевтического воздействия в рамках реабилитации после различных травм головного и спинного мозга, при протезировании [4].

Технологии, обеспечивающие количественный анализ базовых локомоций человека, претерпели значительные усовершенствования. Сегодня при диагностике опорно-двигательной

системы человека используются аппаратно-программные комплексы видеоанализа движений, системы регистрации электромиографической активности мышц, динамометрические платформы, инерциальные измерительные устройства и другие носимые датчики [5]. Однако клиническая ценность данных технологий все еще является предметом дискуссий, поскольку их использование сопровождается активным вовлечением медицинских экспертов при обработке, анализе и оценке регистрируемых данных. Кроме того, клиническое использование большинства вышеперечисленных технологий на сегодняшний день затруднено и не может быть окончательно внедрено в практику вследствие повышенной ресурсоемкости процесса диагностики и интерпретации результатов [6].

Очевидно, что в области клинической диагностики биомеханики базовых локомоций человека необходимо стремиться к автоматизации и упрощению процессов сбора, анализа и оценки получаемых результатов с обязательным сохранением их точности, достоверности и информативности. Это обусловлено повышенной востребованностью и социальной значимостью данной процедуры. В данном направлении наиболее эффективным и подходящим способом повышения автоматизации процесса клинической диагностики и снижения его ресурсоемкости является разработка алгоритмов оценки отдельно взятых поз в совершаемых локомоциях [7].

### **Основная часть**

Главным исследовательским направлением в области клинической диагностики и оценке шаговых и беговых локомоций, а также позы человека является разработка алгоритмов автоматического анализа данных. Это обусловлено существенным технологическим прогрессом по части аппаратного обеспечения. На сегодняшний день известно достаточное количество научно и экспериментально обоснованных алгоритмов оценки позы и простых двигательных действий человека. Как правило, такие алгоритмы основаны на использовании пространственных, пространственно-временных и временных данных, регистрируемых соответствующим оборудованием [8]. В литературе встречаются алгоритмы измерения и количественной оценки поведенческих эффектов [9], мультиперсонального анализа позы людей на изображениях [10, 11] и многие другие схожие алгоритмы экспериментального применения. Это говорит о том, что все перечисленные подходы еще находятся на этапе технологического совершенствования и не могут быть полноценно внедрены в медицинскую практику. Ключевым недостатком данных алгоритмов является их недостаточная точность и прецизионность измерения, что делает невозможность их применения в клинической диагностике. Это обусловлено тем, что разрабатываемые алгоритмы оптимизируются и совершенствуются для использования на мобильных устройствах при решении либо бытовых, либо узкоспециализированных задач, не требующих высокой точности.

Алгоритмы анализа данных для клинической диагностики должны удовлетворять определенным требованиям. В частности, для обеспечения необходимой точности следует сперва изучить характеристики регистрируемых сигналов, определить ключевые и наиболее устойчивые признаки и установить последовательность их идентификации [12]. Это позволит распознавать и анализировать отдельные позы в составе шаговых и беговых локомоций, а также обеспечить высокую автоматизацию многих процессов.

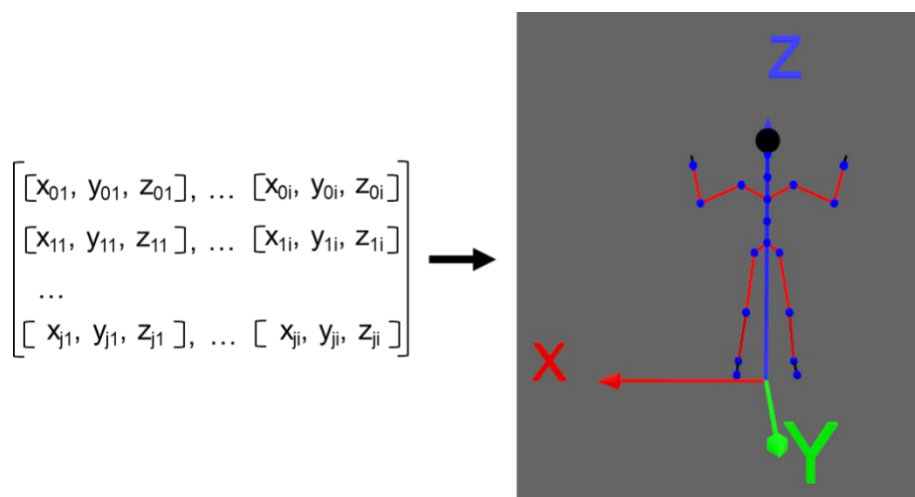
Сегодня в качестве измерительного оборудования для клинической диагностики широко используются системы захвата движений [13, 14]. Подобные системы используются преимущественно с целью поддержки принятия решения, предоставляя необходимый и содержательный объем достоверных данных. Однако необходимо в том числе обеспечить своевременную и оперативную обработку и анализ регистрируемых показателей.

В качестве исходной информации выступает многомерный массив данных, содержащий координаты точек (ключевых анатомических ориентиров) тела человека. На основании такого массива формируется кинематическая модель тела человека. Подобные модели рассматриваются в пределах некоторого пространства (чаще всего, трехмерного). Данные, которые имеется возможность определить, представляют собой относительное и абсолютное пространственное положение каждой точки в формате проекции на координатные оси. Такие данные удобно представлять в формате матрицы (рисунок 1).

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

**Рис.1.** Матричное представление двигательных действий человека в 3-х мерном пространстве

Содержание матрицы представляет собой пространственные координаты каждой анатомической точки, совокупность которых составляет целостную кинематическую модель тела человека. Размер матрицы определяется количеством строк и столбцов ( $m \times n$ , где  $m$  – количество анатомических точек, используемых для описания тела человека;  $n$  – количество моментов времени, в течение которых осуществлялось двигательное действие) [15]. 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 характерна уникальная совокупность пространственных координат каждого узла (рисунок 2).



**Рис. 2.** Преобразование данных матрицы в компьютерную модель тела человека

Необходимо отметить, что исходная матрица координат не может быть использована для клинической диагностики поз в рамках шаговых и беговых локомоций, поскольку содержит данные с учетом антропометрических признаков исследуемого. Для стандартизации данных необходимо использовать нормализацию по пространственному расстоянию точек относительно друг друга, в результате чего формируется матрица расстояний. 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 [16, 17] (формула 1):

$$dn(i, j) = \frac{d(i, j)}{r(i, j)} \quad (1)$$

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

$d(i, j)$  – евклидово расстояние между точками  $i$  и  $j$  в  $n$ -мерном пространстве;

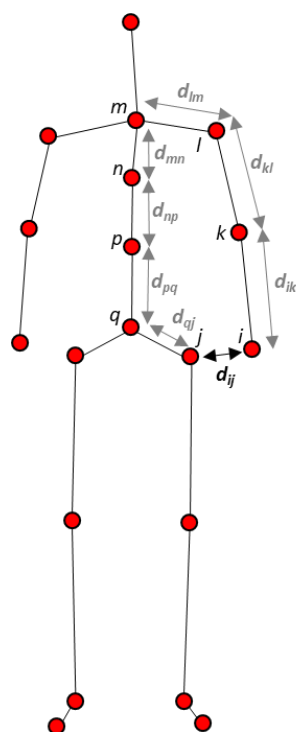
$r(i, j)$  – фактическая длина цепи.

Фактическая длина цепи представляет собой сумму евклидовых расстояний между всеми анатомическими точками, формирующими цепь (формула 2):

$$r(i, j) = \sum_{k=i}^j d(a, b)_k \quad (2)$$

где  $d(a, b)$  – нормализованное геометрическое расстояние между последовательными точками  $a$  и  $b$  в  $n$ -мерном пространстве.

Визуализация переменных, используемых в формулах 1 и 2 представлена на рисунке 3, где  $r(i, j)$  представляет собой сумму евклидовых расстояний между точками  $i$  и  $k$ ,  $k$  и  $l$ ,  $l$  и  $m$ ,  $m$  и  $n$ ,  $n$  и  $p$ ,  $p$  и  $q$  и  $j$ .



**Рис.3.** Расчет нормализованного геометрического расстояния между точками  $i$  и  $j$

В результате подобного преобразования регистрируемых с использованием систем захвата движений данных имеется возможность формировать наглядные матрицы расстояний, содержащие все кинематические признаки шаговых и беговых локомоций в рамках отдельных поз. На рисунке 4 представлены экспериментальные матрицы расстояний фазы постановки (1), переката (2) и отрыва стопы (3) от поверхности опоры.

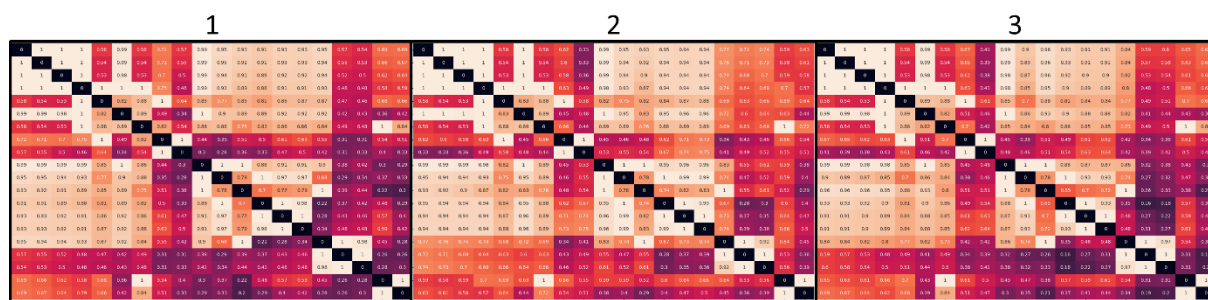


Рис.4. Матрицы расстояний для отдельных поз в структуре шаговых локомоций

На основании матриц расстояний в дальнейшем будут разработаны алгоритмы автоматического анализа биомеханических параметров шаговых и беговых локомоций человека. Кроме того, матрицы расстояний могут выступать наиболее удобной, содержательной и емкой структурой данных для изучения специфических характеристик поз в норме и патологии, а гибкие возможности масштабирования данных, лежащих в основе матриц расстояний позволят установить наиболее неочевидные биомеханические признаки.

### Заключение

Актуальность разработки и совершенствования алгоритмов клинической диагностики шаговых и беговых локомоций человека обусловлена состоянием технического и технологического оснащения медицинских учреждения, а также возросшим риском травматизма опорного-двигательного аппарата и других функциональных систем организма человека. Основной технологической задачей является создание и оптимизация алгоритмов, позволяющих анализировать локомоции с учётом особенностей и патологий двигательного аппарата. Ключевым этапом здесь становится преобразование многомерных данных, получаемых с помощью датчиков и устройств захвата движений, в матричное представление, что позволяет стандартизировать данные для дальнейшего анализа. Использование матриц расстояний, основанных на евклидовой метрике, обеспечивает точное представление поз в пространстве, что критически важно для диагностических задач.

В ходе настоящего исследования предложен метод нормализации данных видеозахвата движений человека на основе геометрических расстояний между ключевыми анатомическими точками, вследствие чего появляется возможность эффективно стандартизировать данные независимо от антропометрических особенностей исследуемого. Такой подход формирует перспективы для дальнейшего совершенствования алгоритмов диагностики, направленных на выявление неочевидных биомеханических признаков. Предложенный подход представляет собой перспективный инструмент для детального анализа и визуализации двигательных действий, что особенно актуально в реабилитации и клиническом мониторинге функционального состояния лиц с различными двигательными патологиями.

### Список литературы

1. Pirker W., Katzenschlager R. Gait disorders in adults and the elderly: A clinical guide. Wiener Klinische Wochenschrift. 2017;129(3):81–95. DOI: 10.1007/s00508-016-1096-4.
2. Jørgensen J.R., Bech-Pedersen D.T., Zeeman P., Sørensen J., Andersen L.L., Schönberger M. Effect of intensive outpatient physical training on gait performance and cardiovascular health in people with hemiparesis after stroke. Physical therapy. 2010;90(4):527–537. DOI: 10.2522/ptj.20080404.
3. Sanders R.D., Gillig P.M. Gait and its assessment in psychiatry. Psychiatry (Edgmont). 2010;7(7):38–43.
4. Rohan A., Rabah M., Hosny T., Kim S. Human Pose Estimation-Based Real-Time Gait Analysis Using Convolutional Neural Network. IEEE Access. 2020;8:191542–191550. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3030086.
5. Khan W., Badii A. Pathological gait classification and segmentation by processing the hip joints motion data to support mobile gait rehabilitation. Research in Medical & Engineering Sciences. 2019;7(3):1–9. DOI: 10.31031/RMES.2019.07.000662.

6. Simon S.R. Quantification of human motion: gait analysis—benefits and limitations to its application to clinical problems. *Journal of Biomechanics*. 2004;37(12):1869–1880. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2004.02.047.
7. Stenum J., Cherry-Allen K.M., Pyles C.O., Reetzke R.D., Vignos M.F., Roemmich R.T. Applications of Pose Estimation in Human Health and Performance across the Lifespan. *Sensors*. 2021;21(21):7315. DOI: 10.3390/s21217315.
8. Cornman H.L., Stenum J., Roemmich R.T. Video-based quantification of human movement frequency using pose estimation: A pilot study. *PLOS ONE*. 2021;16(12):e0261450. DOI: 10.1371/journal.pone.0261450.
9. Nath T., Mathis A., Chen A.C., Patel A., Bethge M., Mathis M.W. Using DeepLabCut for 3D markerless pose estimation across species and behaviors. *Nature Protocols*. 2019;14:2152–2176. DOI: 10.1038/s41596-019-0176-0.
10. Viswakumar A., Rajagopalan V., Ray T., Parimi C. Human Gait Analysis Using OpenPose. 2019 Fifth International Conference on Image Information Processing (ICIIP), Shimla, India. 2019:310–314. DOI: 10.1109/ICIIP47207.2019.8985781.
11. Insafutdinov E., Pishchulin L., Andres B., Andriluka M., Schiele B. DeeperCut: A Deeper, Stronger, and Faster Multi-person Pose Estimation Model. In: Leibe B., Matas J., Sebe N., Welling M. (eds) *Computer Vision – ECCV 2016*. ECCV 2016. Lecture Notes in Computer Science. 2016;9910. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-46466-4\_3.
12. Gao L., Zhang G., Yu B., Qiao Z., Wang J. Wearable human motion posture capture and medical health monitoring based on wireless sensor networks. *Measurement*. 2020;166:108252. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108252.
13. 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. DOI: 10.1016/j.cie.2018.10.046.
14. 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. DOI: 10.3390/s20195687.
15. 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. DOI: 10.1145/1161366.1161407.
16. Deza M.M., Deza E. *Encyclopedia of Distances*. Springer, 2014. – P 103.
17. Bernardin A., Hoyet L., Mucherino A., Gonçalves D., Multon F. Normalized Euclidean distance matrices for human motion retargeting. 2017:1–6. DOI: 10.1145/3136457.3136466.