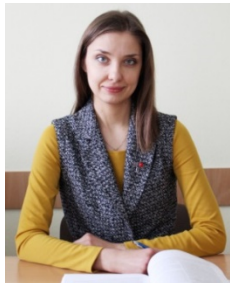


УДК 796.012:612.76]:514.742.2

АЛГОРИТМ КОРРЕКЦИИ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ СПОРТСМЕНОВ НА БАЗЕ МАТРИЦ ПОВОРОТА



Г.Г. Турантаева
Аспирант
кафедры
«Спортивная
инженерия
БНТУ»
ga_et@inbox.ru



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



В.Е. Васюк
Ведущий специалист
центра координации
научно-
методической и
инновационной
деятельности
БГУФК, кандидат
педагогических наук,
доцент



К.И. Татарко
Доцент кафедры
социальной и
организационной
психологии БГУ,
кандидат
психологических
наук, доцент

Аннотация. В статье рассматривается процесс коррекции траектории движения спортсменов на основе координат, полученных с помощью безмаркерных систем захвата движения, в соответствие к глобальной системе координат. Описан алгоритм коррекции траектории движения, основанный на векторной алгебре, в частности на базе матриц поворота. Предложенный подход обеспечивает получение точных количественных параметров для последующего биомеханического анализа спортивных движений.

Ключевые слова: система захвата движения, матрица поворота, коррекция траектории движения.

Введение. Современные технологии анализа движений спортсменов, в частности безмаркерные системы захвата движения, открывают новые горизонты для исследования и оптимизации спортивных показателей. Эти системы предоставляют возможность отслеживать движения спортсменов без необходимости использования специализированных датчиков или маркеров, что функционально упрощает процесс и делает его более естественным [1]. Помимо удобства, такие технологии обладают значительными преимуществами, включая высокую точность регистрации движений и возможность получения данных в реальном времени. Тем не менее, для достижения достоверных результатов необходимо не только правильно регистрировать данные, но и корректно обрабатывать их. Одним из ключевых этапов данного процесса является коррекция координат траектории движения спортсмена в соответствие с глобальной системой координат, т.к. в процессе регистрации движения происходит отклонение траектории спортсмена от заданной. При этом, глобальная система координат задается во время калибровки видеокамер безмаркерных систем захвата движения. В работе представлен алгоритм коррекции траектории движения спортсменов, основанный на методах векторной алгебры [2].

Необходимо откорректировать полученные координаты так, чтобы они соответствовали глобальной системе координат. Такое преобразование является критически важным для обеспечения точности количественных данных, используемых в дальнейших расчетах параметров движения, особенно в сагиттальной плоскости, где сосредоточены большинство аналитических показателей. Современные технологии

анализа движений в спорте требуют высокой точности при обработке данных [3, 4]. Проблема преобразования координат заключается в необходимости адаптировать локальные данные о движении (например, координаты суставов) к заранее установленной глобальной системе координат, что критически важно для обеспечения достоверности последующих расчетов параметров движения.

Основная часть. В рамках кинематического анализа движений спортсменов большинство показателей сосредоточено в сагиттальной плоскости [5]. Однако, для корректного преобразования координат по сагиттальной оси необходимо также учитывать углы наклона в горизонтальной плоскости. Это связано с тем, что во время регистрации движений спортсмены могут двигаться не по прямой линии, а с небольшим отклонением в сторону. Поэтому для корректного преобразования координат сагиттальной оси (Y) необходимо учитывать и рассчитывать углы наклона в горизонтальной плоскости (XY).

Для коррекции координат траектории движения спортсмена необходимо выполнить несколько последовательных шагов, используя математические методы, такие как векторная алгебра, матричные преобразования и тригонометрические функции. Прежде всего, необходимо определить общий центр тяжести (ОЦТ) спортсмена. Нахождение общего центра тяжести является ключевым аспектом для кинематической оценки движений спортсменов. Системы захвата движения предоставляют данные о координатах суставов, что позволяет применять их для вычисления ОЦТ.

Алгоритм расчета ОЦТ следующий:

1 Определение масс звеньев тела.

Как правило, массы звеньев тела спортсмена (рисунок 1) рассчитываются на основании академических данных [6] относительной массы и расположения центров масс звеньев тела (таблица 1):

Таблица 1. Относительные массы и расположения центров масс звеньев тела

Звено	Процент от массы тела	Расположение центра масс (от 1 целой части проксимального сустава)
Туловище	43%	0,44
Плечо	3%	0,47
Предплечье	2%	0,42
Бедро	12%	0,44
Голень	5%	0,42
Стопа	2%	0,44

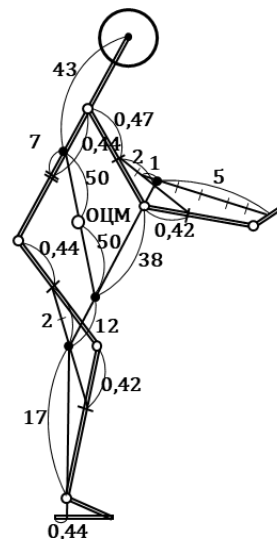


Рисунок 1. Схема расчета общего центра тяжести спортсмена

2 Расчет координат центров тяжести звеньев тела.

Для каждого звена тела рассчитывается центр тяжести в горизонтальной плоскости (YX) в соответствии с формулами [7]:

$$Y_{\text{цтн}} = \frac{y_{i1} + \lambda * y_{i2}}{1 + \lambda} \quad (1)$$

$$X_{\text{цтн}} = \frac{x_{i1} + \lambda * x_{i2}}{1 + \lambda} \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{m_1}{m_2} \quad (3)$$

где n – обозначения звеньев тела,

i – обозначения суставов,

y_{i1} – координаты проксимального сустава по горизонтальной оси,

y_{i2} – координаты дистального сустава по горизонтальной оси,

x_{i1} – координаты проксимального сустава по поперечной оси,

x_{i2} – координаты дистального сустава по поперечной оси,

m_1 и m_2 – массы проксимального и дистального звеньев тела, их заменяем относительным расположением центров звена.

3 Расчет координат общего центра тяжести.

Общий центр тяжести определяется на основании ЦТ всех звеньев тела спортсмена в соответствии с формулами [6]:

$$Y_{\text{ОЦТ}} = \frac{\sum_{n=1}^m y_n * P_n}{\sum_{n=1}^m P_n} \quad (4)$$

$$X_{\text{ОЦТ}} = \frac{\sum_{n=1}^m x_n * P_n}{\sum_{n=1}^m P_n} \quad (5)$$

где y_n – координата центр тяжести n -го звена тела по горизонтальной оси,

x_n – координата центр тяжести n -го звена тела по поперечной оси,

m – общее количество звеньев тела,

P_n – это вес n -го звена тела (берется относительное соотношение масс звеньев, например для голени 0,05P).

В данном исследовании применяется метод матрицы поворота, также известный как матрица направляющих косинусов [2]. Этот математический инструмент служит для выполнения ортогонального преобразования в евклидовых пространствах, что позволяет осуществлять вращение векторов без изменения их длины.

Схема поиска угла поворота и коррекции локальных координат траектории движения спортсмена в соответствии с глобальными координатами представлена на рисунке 2, алгоритм которой состоит из следующих этапов:

1 Построение вектора траектории движения спортсмена, используя начальные и конечные координаты ОЦТ;

2 Расчет угла поворота (α) вектора траектории движения ОЦТ относительно глобальной системы координат:

$$\alpha = \gamma - \beta \quad (6)$$

$$\gamma = \cos^{-1}\left(\frac{x_{\text{ОЦТн}}}{L}\right) \quad (7)$$

$$\beta = \cos^{-1}\left(\frac{x_{\text{ОЦТк}}}{L}\right) \quad (8)$$

где γ – угол между вектором L' и горизонтальной осью,

β – угол между вектором L_{OCT_k} и горизонтальной осью,

$OCT_H(x_{OCT_H}, y_{OCT_H}), OCT_K(x_{OCT_K}, y_{OCT_K})$ – начальная и конечная координаты перемещения OCT.

При этом, $L = L_{OCT_k} = L'$ – длина векторов OCT_k и OCT' , определяются по формуле вычисления евклидова расстояния между двумя точками:

$$L = \sqrt{(x_{OCT_k}^2 + y_{OCT_k}^2)} \quad (9)$$

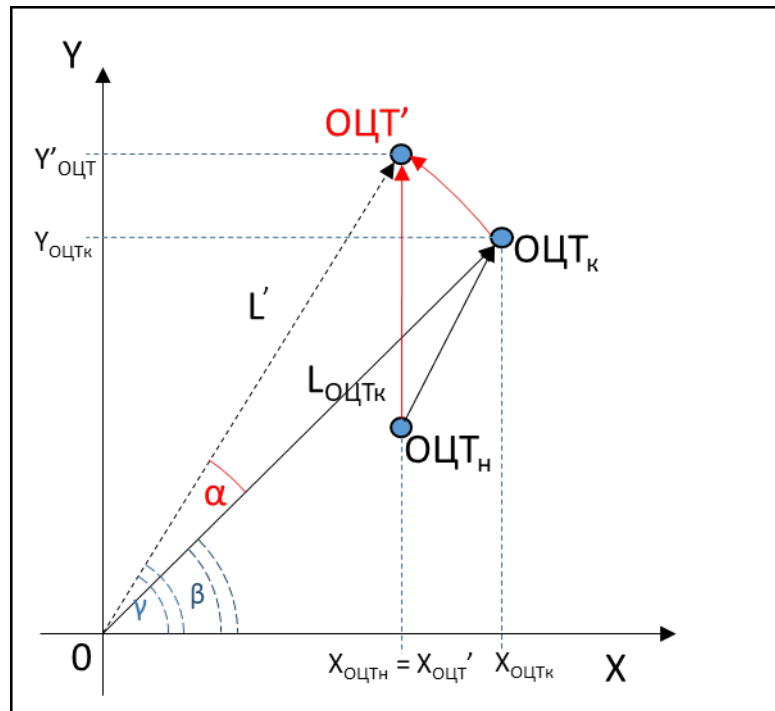


Рисунок 2. Схема поворота вектора траектории движения OCT (где α – угол поворота вектора, OCT_H OCT_K – исходная траектория движения OCT, OCT_H OCT' – откорректированная траектория движения OCT)

3 Коррекция координат к глобальной системе осуществляется с использованием матрицы поворота:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \mp \sin \alpha \\ \pm \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (12)$$

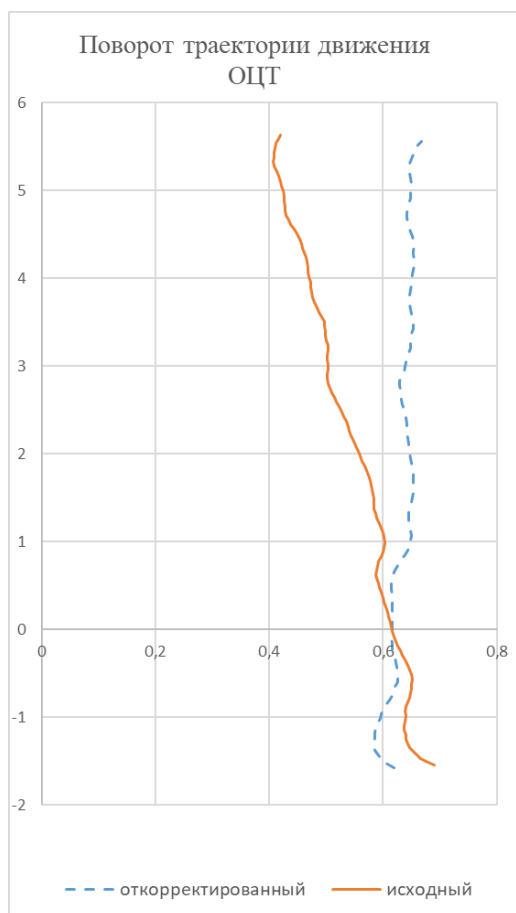


Рисунок 3. Пример откорректированной траектории ОЦТ спортсмена

Новые координаты $(x'y')$ в результате поворота точки $(x_{\text{ОЦТк}}y_{\text{ОЦТк}})$ будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} x' &= x_{\text{ОЦТк}} \cos \alpha \mp y_{\text{ОЦТк}} \sin \alpha \\ y' &= y_{\text{ОЦТк}} \cos \alpha \pm x_{\text{ОЦТк}} \sin \alpha \end{aligned} \quad (13)$$

Знак синуса в формулах 12-13 зависит от направления вектора поворота: при повороте по часовой стрелке - используются верхние знаки, против часовой – нижние знаки.

После нахождения угла поворота и применения соответствующих уравнений к сагиттальным и поперечным координатам для всех временных моментов, мы можем быть уверены в том, что полученные данные обладают необходимой точностью и надежностью. Пример откорректированной траектории ОЦТ спортсмена представлен на рисунке 3.

Заключение. Коррекция координат в анализе движения спортсменов является критически важным этапом, обеспечивающим получение точных и достоверных результатов. Представленный алгоритм коррекции траектории движения спортсменов может быть использован в рамках кинематического анализа движений и для разработки точных моделей движения. Это в свою очередь, может существенно повысить качество и эффективность оценки и анализа двигательных действий. Потенциальное приложение данного

подхода включает интеграцию в системы мониторинга и анализа движений в реальном времени, что позволит тренерам и спортсменам оперативно адаптироваться и корректировать тренировочные режимы.

Такие решения могут значительно улучшить процесс подготовки спортсменов и повысить спортивные достижения.

Список литературы

- [1] Cronin NJ, Feasibility of OpenPose markerless motion analysis in a real athletics competition / NJ Cronin, J Walker, CB Tucker [et al.] // Front. Sports Act. Living. – 2024. – Vol. 5:1298003.
- [2] Rotation-matrix [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.geeksforgeeks.org/rotation-matrix>. – Date of access: 16.01.2025.
- [3] Preatoni, E. Motion analysis in sports monitoring techniques: Assessment protocols and application to racewalking / E. Preatoni, La Torre [et al.] // Medicina Dello Sport. – 2010. – Vol. 63. – P. 327-342.
- [4] Johnson, J.D. Validation of machine vision and action sport cameras for 3D motion analysis model reconstruction / J.D. Johnson, M. Hales, R. Emert // Sci Rep. – 2023. – Vol. 13. – Mode of access: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46937-9>. Date of access: 05.02.2025.
- [5] Dorschky E. CNN-Based Estimation of Sagittal Plane Walking and Running Biomechanics From Measured and Simulated Inertial Sensor Data / E. Dorschky, M. Nitschke, F. Martindale Christine [et al.] // Bioeng. Biotechnol. – 2020. – Vol. 8.
- [6] Бондаренко, К. К. Биомеханика: практическое пособие / К. К. Бондаренко, А. Е. Бондаренко // Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины. – 2019. – С. 45.
- [7] Центр масс [Electronic resource]. – Mode of access: https://edu-potential.ru/images/catalog/physics/Massa_center.pdf. Date of access: 05.02.2025.

Авторский вклад

Турантаева Гарсия Гаврильевна – разработка алгоритма анализа данных, сбор и систематизация фактических данных, написание статьи.

Давыдова Надежда Сергеевна – постановка задач исследования и формулировка гипотез, разработка структуры статьи.

Васюк Валерий Евстафьевич – анализ и интерпретация результатов исследования, рецензирование статьи.

Татарко Кристина Игоревна - обзор литературы и аргументация выбора методов исследования, форматирование статьи.

ALGORITHM OF ATHLETES' TRAJECTORY CORRECTION BASED ON ROTATION MATRICES,

G.G. Turantaeva
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

V.E. Vassiouk
Leading specialist of the
center for coordination
of scientific,
methodological and
innovative activities of
BSUPC, Candidate of
Pedagogical Sciences,
Associate Professor

K.I. Tatarko
Candidate of
Psychological
Sciences,
Associate
Professor of the
Department of
Social and
Organizational
Psychology BSU

Abstract. The article deals with the process of converting athletes' motion trajectory coordinates obtained by markerless motion capture systems into correspondence to the global coordinate system. The algorithm of athletes' motion trajectory transformation based on vector algebra, in particular on the basis of rotation matrices, is described. The proposed approach provides accurate quantitative parameters for subsequent biomechanical analysis of sports movements.

Keywords: motion capture system, rotation matrix, transformation.