

АНАТОМИЧЕСКИ ОБУСЛОВЛЕННЫЙ МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ АНОМАЛИЙ СКЕЛЕТНОЙ МОДЕЛИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ЛОКОМОЦИЙ

С. А. Федорова¹, Р.А. Парингер¹

¹Самарский университет, г. Самара
e-mail: feodorowa.sof@yandex.ru

Аннотация.

В данной работе рассматривается подход для идентификации аномалий скелетной модели, основанный на анатомических ограничениях. Предлагаемый алгоритм предусматривает три ключевых этапа: инициализацию калибровочного режима на основе шагового паттерна, ввод анатомических ограничений с последующей проверкой вычисленных значений и определение параметров симметрии. Превышение установленных граничных значений параметров служит критерием для детекции некорректно идентифицированных поз.

Ключевые слова: нейронные сети, идентификация человека, MediaPipe, поза человека, цикл походки.

Введение

Анализ биомеханики движения является критически важной задачей в современных областях спортивной медицины, реабилитации, профессионального спорта и эргономики. Традиционные подходы к оценке биомеханики человека имеют ряд сдерживающих факторов, таких как высокая стоимость оборудования, субъективность оценки эксперта и ограниченность клиническими и лабораторными условиями, что делает их недоступными для широкого круга пользователей. Развитие компьютерного зрения и машинного обучения открыло новые возможности для автоматизированного анализа движения по обычным видеозаписям [1, 2], не уступающим по точности маркерным системам. В основе методов оценки позы лежат сверточные нейронные сети (CNN), которые, обучившись на огромном количестве данных [2], идентифицируют ключевые точки тела человека для последующего отслеживания их движений во времени. Тем не менее, неблагоприятные условия освещённости и окклюзии сегментов тела обуславливают возникновение погрешностей при локализации ключевых точек [3], как следствие – приводят к некорректному вычислению суставных углов, искажая оценку двигательной техники спортсмена.

В рамках настоящего исследования в качестве модельного примера циклической локомоции был выбран бег. Предлагаемый подход обладает достаточной универсальностью и может быть адаптирован для анализа иных типов циклических локомоций.

1. Биомеханические особенности выполнения бега

Бег, как производная от ходьбы, представляет собой ритмичный способ передвижения человека, описываемый уравнениями колебательного движения. Во время бега можно выделить цикл походки, который включает в себя чередующиеся фазы опоры на одну ногу и фазу полёта. Для каждой ноги фаза опоры характеризуется тремя последовательно переходящими состояниями: приземление, опора и отталкивание. Для оценки техники бега часто используют анализ в сагиттальной плоскости, так как эта проекция даёт наиболее полное представление о биомеханике движений. В этой плоскости наиболее чётко видны углы сгибания в суставах, позволяющие проанализировать осанку бегуна, работу колена и голеностопа, а также эффективность отталкивания.

2. Обоснование разработки системы верификации детекции суставов

Для детекции позы человека в кадре используются безмаркерные системы, в основе которых лежат сверточные нейронные сети. В работе была использована модель MediaPipe Pose [4], так как в исследовании авторов [5] было установлено, что она является оптимальной моделью для анализа походки, за счёт того, что фреймворк основан на подходе «сверху вниз», при котором сначала формируется область интереса, а после применяется модель для анализа позы. Однако, в сложных условиях освещения, перекрытиях частей тела или при нестандартных позах возникают ошибки в детекции ключевых точек [3]. Рисунок 1 показывает случай ошибочного обнаружения ключевых точек после успешной детекции на предыдущем кадре.



Рисунок 1 – Нарушение временной согласованности детекции

Любые неточности, полученные на этапе обнаружения ключевых точек человека, приводят к некорректным расчётам углов сгибания в суставах, что, в свою очередь, искажает оценку техники движения и может привести к неверным выводам о биомеханических параметрах спортсмена. Таким образом, возникла цель данного исследования – построение системы выявления ошибочно детектированных суставов человека на входном видеопотоке при выполнении циклических локомоций (ходьба, бег).

3. Существующие решения

Для достижения поставленной цели был рассмотрен алгоритм, который основан на покадровой коррекции ключевых точек и временном сглаживании

скорректированной последовательности координат [3]. Результаты применения алгоритма, основанного исключительно на временной согласованности кадров, оказались недостаточными для обнаружения некорректно определённых ключевых точек и их последующей коррекции в задачах биомеханического анализа, поскольку не учитывают такие факторы, как физиологические закономерности движений человека и анатомические ограничения опорно-двигательного аппарата. На основании выявленных проблем был предложен алгоритм детекции, который принципиально отличается от рассмотренного подхода.

4. Детектирование ошибок на основании физиологических ограничений

В работе предлагается алгоритм, который интегрирует биомеханические знания о строении и функционировании опорно-двигательного аппарата человека, используя анатомические ограничения как основу для принятия решений о корректировке ключевых точек. Алгоритм содержит три основных этапа – установка режима калибровки по шагам, введение анатомических ограничений и проверка значений, определение параметров симметрии. Для обеспечения достоверности калибровочных данных при использовании минимального двухшагового окна применяется предварительная фильтрация кадров по показателям уверенности детекции (confidence score) [2] и видимости ключевых точек, предоставляемых моделью MediaPipe Pose. Калибровочными считаются только те кадры, в которых средняя уверенность детекции всех ключевых точек нижних конечностей превышает пороговое значение, а значения видимости соответствуют нахождению конечностей в кадре. Сбор данных по кадрам позволяет вычислить эталонные значения (средние длины сегментов тела, углы суставов и их диапазоны). Так как бег является двусторонне симметричным способом передвижения с фазовым сдвигом в полпериода, то ещё одним из способов оценки корректности обнаружения будет анализ симметрии между правой и левой частями тела. На втором этапе выполняется проверка соответствия длин сегментов эталонным значениям, а также двухступенчатая проверка углов суставов – на соответствие физиологическим нормам и калибровочным данным с учётом текущей фазы бегового цикла.

Заключение

Рассмотренные этапы составляют алгоритм, который позволяет не только выявить некорректно определённые позы, но и классифицировать тип возникшей аномалии – связана ли она с нарушением длины сегментов, выходом углов суставов за физиологические пределы или несоответствием фазе бегового цикла, тем самым создавая основу для последующей целевой коррекции выявленных неточностей.

Список литературы:

1. A comprehensive analysis of the machine learning pose estimation models used in human movement and posture analyses: A narrative review / F. Roggio [et al.] // Heliyon. – 2024. – V. 10, № 21.
2. Mediapipe: A framework for building perception pipelines / C. Lugaresi [et al.] // arXiv preprint. – 2019. – V. 5.

3. Efficient Human Posture Recognition and Assessment in Visual Sensor Systems: An Experimental Study / L. Lei [et al.] // *Sensors*. – 2025. – V. 25, № 21. – P. 6789.

4. Федорова, С.А. Способ извлечения признаков идентификации человека по паттерну шага / С.А. Федорова, Р.А. Парингер // I Всероссийская научно-техническая конференция по информатике и кибернетике «Volga Cyber Week». – 2025. – С. 73–74.

5. Automated gait analysis based on a marker-free pose estimation model / Hii C. S. T. [et al.] // *Sensors*. – 2023. – V. 23, № 14. – P. 6489.

ANATOMICALLY-BASED METHOD FOR IDENTIFYING SKELETAL MODEL ANOMALIES DURING CYCLIC LOCOMOTION

S.A. Fedorova¹, R.A. Paringer¹

¹*Samara University, Samara*
e-mail: feodorowa.sof@yandex.ru

Abstract

This paper discusses an approach for identifying skeletal model anomalies based on physiological constraints that define the allowable feature space. The proposed algorithm includes three key stages: initialization of the calibration mode based on a step pattern, introduction of anatomical constraints with subsequent verification of calculated values, and determination of symmetry parameters. Exceeding the established boundary values of the parameters serves as a criterion for detecting incorrectly identified poses.

Keywords: neural networks, human identification, MediaPipe, human posture, gait cycle.