

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ВИДЕОФИКСАЦИИ И ПЕРСИСТЕНТНЫХ ГОМОЛОГИЙ ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ОСАНКИ И СТАТИЧЕСКОЙ КООРДИНАЦИИ ЧЕЛОВЕКА

В.В. Смирнова¹, Е.В. Семенова¹, О.А. Саченков¹

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань
e-mail: yaikovavictoriya@mail.ru

Аннотация

Разработан безмаркерный программно-аппаратный комплекс для оценки осанки и постуральной устойчивости на основе обычной 4K/60fps видеокамеры. Методика включает стандартизированную съёмку, сегментацию предобученной моделью и автоматический расчёт углов тела и показателей симметрии. С применением статистического анализа, РСА, k-средних и топологических методов (фильтрация Морса, диаграммы персистентности) у 26 пациентов и 14 здоровых добровольцев выделено 3 типа нарушений осанки и 5 стратегий равновесия в тесте Ромберга.

Ключевые слова: безмаркерный видеоанализ, сегментация, постуральная устойчивость, поддержка принятия решений, фильтрация Морса, диаграммы персистентности, Vicon.

Введение

Объективная оценка осанки, симметрии и постурального баланса важна в неврологии, реабилитации и биомеханике. В отличие от дорогостоящих маркерных систем (например, Vicon), требующих спецподготовки, предлагаемая методика обеспечивает количественный анализ на основе обычной видеокамеры, сочетая компьютерное зрение, статистику, РСА, кластеризацию и топологический анализ данных.

Цель исследования — разработка безмаркерного комплекса для видеооценки асимметрии тела, статической координации и постуральной устойчивости и подтверждение клинической применимости методом кластерного анализа.

Материалы и методы

Аппаратная часть представляет собой цифровую камеру с разрешением ≥ 20 Мп (4K, 60 к/с), штатив (высота 90–110 см в зависимости от роста).

Исследование осуществлялось в несколько этапов:

- 1) запись видеоряда (40 сек, стандартизированные условия: облегающая одежда, расстояние 180 см, центрирование в кадре);
- 2) предобработка (выделение фрагмента, ручная разметка первого кадра);
- 3) покадровая автоматическая сегментация и трекинг [1] (бинаризация маски, автоматическое определение опорных точек и линий: центры масс головы/тела/пяточных областей, точки акромионов, талии, плечи, треугольники талии (представлены на рисунке 1));

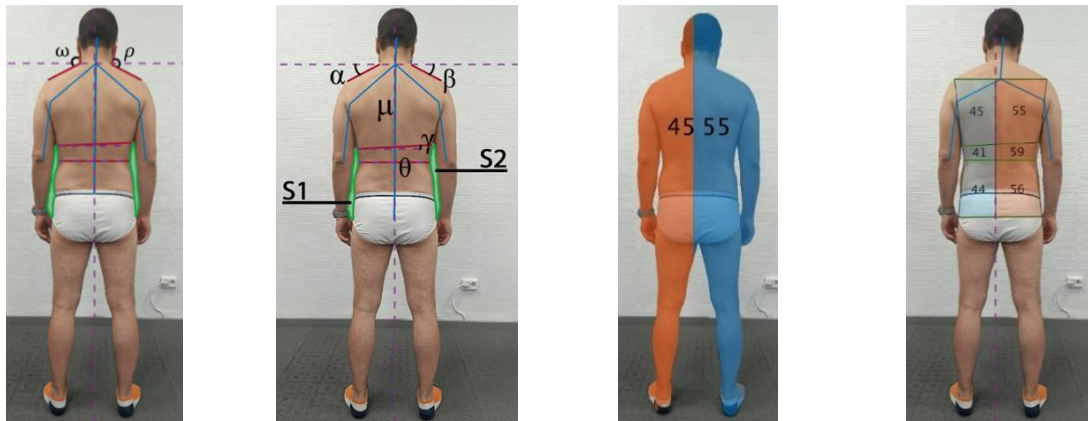


Рисунок 1 – Графическое представление рассчитываемых параметров

4) расчет параметров для теста со спины: углы отклонения тела от вертикали, наклона головы, плеч, талии, подмышечных впадин, площади треугольников талии, симметрия сегментов; и расчет параметров для теста Ромберга [2] (рисунок 2): углы α (руки), β (поясница), γ (грудной отдел), θ (отклонение головы).

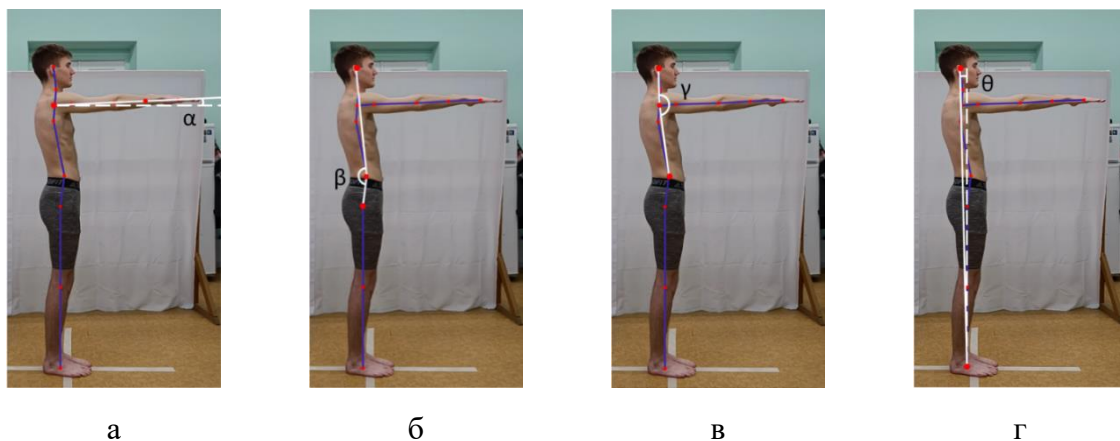


Рисунок 2 – Измеряемые углы: угол отклонения линии рук от горизонта - α (а), угол в пояснице - β (б), угол в грудном отделе - γ (в), угол отклонения тела от вертикали - θ (г)

Рассчитанные параметры представляют собой временные ряды. Для них применялся статистический анализ с помощью фильтрации выбросов, тесты Дики–Фуллера и Харке–Бера, нормализация, PCA (снижение размерности), k-средних с критерием Калинского–Харабаша [3]. Для оценки поструральной устойчивости осуществляется топологический анализ путем фильтрации Морса одномерных временных рядов, построение диаграмм персистентности, построение матрицы Вассерштейна W_p (1), реализация Венгерского алгоритма, многомерное масштабирование и SVD, кластеризация k-средних.

$$W_p(D_1, D_2) = \left(\inf_{s: D_1 \rightarrow D_2} \sum_{x \in D_1} \|x - s(x)\|^p \right)^{\frac{1}{p}}, \quad (1)$$

где s – биекция между точками диаграмм D_1 и D_2 .

Субъектами исследования являются 26 пациентов МЦ «Нейростарт» г. Казань (16 мужчин 25–67 лет, 10 женщин 27–64 лет) и 14 здоровых добровольцев КФУ (7 мужчин 23–30 лет, 7 женщин 19–27 лет). Участниками подписано информированное согласие.

Результаты

Для видеозаписей, полученных со спины, многомерная кластеризация пациентов выявила 3 группы:

- 1) боль в пояснице (спондилолистез, люмбалгия, радикулопатии L5);
- 2) после операций на поясничном отделе (без жалоб на момент съемки);
- 3) боль в шее/ВНЧС в комплексе с тревожно-депрессивным состоянием.

Для теста Ромберга топологический анализ показал 5 кластеров (представлены на рисунке 3): С – изменение угла в пояснице; D – отклонения туловища; E – колебания рук; F – коррекция головы; G – стабильное стояние.

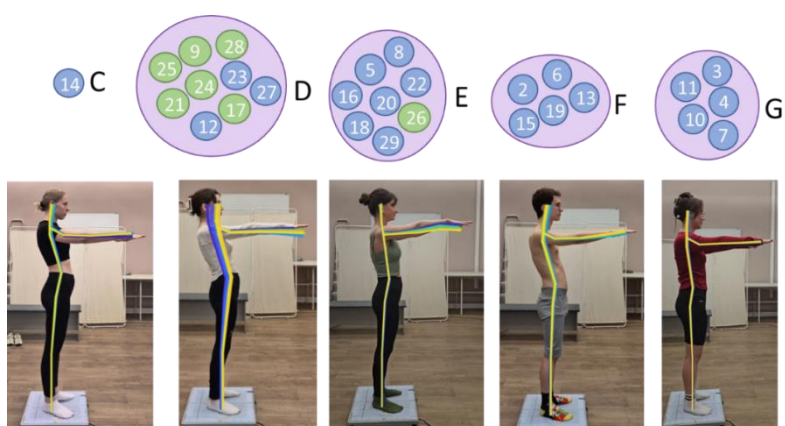


Рисунок 3 – Разделение на кластеры испытуемых в тесте «открытые глаза» по данным видеоанализа

Заключение

Предложенный подход демонстрирует, что комбинация геометрического моделирования, многомерной статистики и топологического анализа данных позволяет формализовать субъективные клинические оценки в воспроизводимые количественные метрики. Метод устойчив к шуму, не требует маркеров и обеспечивает точность, сопоставимую с лабораторными системами, при значительно меньшей стоимости и сложности реализации.

Список использованных источников

1. Разработка методики и программного обеспечения для количественной оценки асимметрии тела и статической координации пациента по данным видеофиксации / В. В. Смирнова, Е. В. Семенова, Б. Р. Самигуллин, Т. В. Балтина, О. А. Саченков // Российский журнал биомеханики. – 2025. – Т. 29, № 2. – С. 83–95.
2. Применение персистентных гомологий для кластеризации данных видеофиксации / В. В. Смирнова, Е. В. Семенова, Б. Р. Самигуллин, Т. В. Балтина, О. А. Саченков // Российский журнал биомеханики. – 2025. – Т. 29, № 4. – С. 84–98.

3. The automatization of the gait analysis by the Vicon video system: A pilot study / V. Smirnova, R. Khamaturova, N. Kharin, E. Yaikova, T. Baltina, O. Sachenkov // *Sensors*. – 2022. – V. 22, № 19. – P. 7178.

4. Смирнова, В. В. Разработка и валидация программно-аппаратного комплекса для количественной оценки осанки с использованием цифровых видеоданных / В. В. Смирнова // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика*. – 2026. – Т. 26, № 1. – С. 91–100.

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF VIDEO-BASED METHODS AND PERSISTENT HOMOLOGY FOR QUANTITATIVE EVALUATION OF HUMAN POSTURE AND STATIC COORDINATION

V.V. Smirnova¹, E.V. Semenova¹, O.A. Sachenkov¹

¹*Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan
e-mail: yaikovavictoriya@mail.ru*

Abstract

A markerless hardware and software system for quantitative assessment of posture and postural stability has been developed using a standard digital video camera (4K, 60 fps). The method includes standardized video recording, model-based segmentation, and automatic calculation of body, shoulder, head, and waist angles and symmetry indices. Statistical analysis, principal component analysis, k-means clustering, and topological analysis (Morse filtering, persistence diagrams) were applied. Three clinically significant groups of postural disorders and five balance strategies were identified in the Romberg test in 26 patients and 14 healthy volunteers. Verification with the Vicon system showed an error of less than 3°. The system provides an objective, accessible assessment of motor functions and personalized rehabilitation.

Keywords: markerless video analysis, segmentation, postural stability, decision support, Morse filtering.