

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА ПАРАМЕТРОВ ВНЕШНЕГО ДЫХАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

Лужинский А.В.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Ревинская И.И. – ст. преподаватель кафедры ЭТТ

Аннотация. В работе рассмотрена разработка программного комплекса для бесконтактной оценки параметров внешнего дыхания по видеозаписи пациента. Предлагаемый подход сочетает алгоритмы компьютерного зрения, автоматическую калибровку измерений и модуль аналитической обработки временных рядов. Система выполняет выделение контура тела, детекцию и трекинг маркеров, перевод пиксельных расстояний в миллиметры, расчет дыхательных циклов и сохранение результатов в базе данных. Практическая значимость разработки состоит в возможности применения для скрининга, динамического наблюдения и цифрового сопровождения пульмонологических пациентов.

Ключевые слова: внешнее дыхание, бесконтактная диагностика, компьютерное зрение, спирометрия, видеоанализ, трекинг маркеров, K-means, медицинские данные.

Введение. Современная пульмонология нуждается в инструментах, которые позволяют получать количественную информацию о дыхательной функции без контакта с пациентом. Классическая спирометрия остается клиническим стандартом, однако она требует специального оборудования, непосредственного взаимодействия с обследуемым и не всегда удобна для массового скрининга. На этом фоне растет интерес к методам, в которых параметры дыхания извлекаются из видеопотока [1]. Такой подход делает исследование менее инвазивным, упрощает организацию наблюдения и позволяет использовать стандартные камеры. Задача работы заключается в создании программного комплекса, который по видеозаписи определяет динамику дыхательных движений и формирует набор показателей, пригодных для дальнейшей интерпретации медицинским специалистом.

Разработанная система построена по модульному принципу. Центральным координатором обработки выступает модуль `video_processor.py`, который управляет загрузкой видео, последовательным вызовом алгоритмов и формированием итогового отчета. Такое разделение логики позволило выделить независимые компоненты для сегментации, детекции маркеров, калибровки, анализа дыхательных параметров и хранения данных. Модульная архитектура упрощает сопровождение, дает возможность быстро менять отдельные алгоритмы и делает систему пригодной как для интерактивного режима с визуализацией, так и для пакетной обработки набора роликов. В качестве технологической основы выбраны Python, OpenCV, NumPy и SQLite [2-4].

Основная часть. Ключевым этапом обработки является выделение пациента на кадре и локализация опорных маркеров. Для детекции используется цветовая сегментация в пространстве HSV, поскольку она менее чувствительна к изменениям освещения, чем работа непосредственно в исходной модели BGR. После формирования бинарной маски применяются морфологические операции, позволяющие убрать шум, сгладить разрывы и оставить только релевантные контуры. Для повышения устойчивости система фильтрует найденные объекты по площади и геометрическим признакам. Это снижает число ложных срабатываний и повышает надежность измерений в реальных условиях съемки.

Параллельно с поиском маркеров решается задача сегментации тела пациента. В проекте для этого используется алгоритм K-means, который разделяет пиксели кадра на два кластера – фон и передний план. Такой подход особенно эффективен при съемке на контрастном однотонном фоне, что и предусмотрено методикой исследования. Для ускорения вычислений кластеризация выполняется не по всем пикселям, а по случайной выборке, после чего модель распространяется на весь кадр. Сформированная маска тела позволяет отсечь посторонние

объекты и дополнительно валидировать найденные маркеры, привязывая их к допустимой анатомической области [5].

После обнаружения маркеров выполняется их трекинг между соседними кадрами. Каждому маркеру присваивается идентификатор, а система сохраняет историю его положений, что позволяет сопоставлять объекты даже при кратковременном ухудшении видимости. Если маркер временно пропадает из кадра, он не удаляется сразу, а удерживается в модели в течение нескольких кадров. Дополнительно применяется сглаживание координат и измерений по скользящему окну, что уменьшает влияние шумов и случайных скачков. За счет этого временной ряд дыхательных движений становится стабильнее, а последующий расчет частоты и амплитуды дыхания оказывается более достоверным.

Важнейшей частью комплекса является калибровка масштаба. Так как исходно все расстояния измеряются в пикселях, без пересчета в физические единицы они не имеют клинической ценности. Для преобразования используется референсный квадратный маркер размером 14 мм. По его размеру на изображении определяется коэффициент пересчета пикселей в миллиметры, который может динамически обновляться при изменении условий съемки. Это решение позволяет переходить от относительных координат к количественным значениям ширины тела на разных уровнях и делает результаты сопоставимыми между различными исследованиями.

Аналитический модуль `medical_tracker.py` преобразует измеренные временные ряды в набор медицински значимых параметров. Система выделяет отдельные дыхательные циклы, определяет пики и впадины кривой, вычисляет амплитуду дыхательных движений, частоту дыхания, регулярность ритма и соотношение грудного и брюшного компонентов. Дополнительно рассчитываются статистические показатели: средние и медианные значения, стандартное отклонение, коэффициенты вариации и характеристики устойчивости сигнала. В результате пользователь получает не просто последовательность координат, а структурированный набор индикаторов, на основе которых можно оценивать особенности дыхательного паттерна и отслеживать его изменение во времени.

Для более глубокой интерпретации дыхательных паттернов система выполняет статистическую обработку временных рядов. Анализируются средние значения, медианы, разброс, а также частотные характеристики сигнала. Такой подход позволяет оценивать не только текущую амплитуду дыхательных движений, но и устойчивость ритма, наличие нерегулярности и выраженность колебаний в различных анатомических зонах. Благодаря этому программный комплекс пригоден не только для демонстрации движения маркеров, но и для накопления количественных данных, которые можно использовать в сравнительных исследованиях и при длительном наблюдении пациента.

Математическое описание обработки данных в упрощенной форме включает калибровку по опорному маркеру и последующий анализ временных рядов. Для опорного квадратного маркера известного размера $S_{ref} = 14$ мм коэффициент калибровки k определяется по формуле (1).

$$k = W_{ref_px} / S_{ref} \quad (1)$$

Пересчет любого расстояния из пикселей в миллиметры выполняется по формуле (2).

$$L_{mm} = L_{px} / k \quad (2)$$

Для каждой анатомической зоны i ширина контура тела и соответствующий временной ряд дыхательных движений определяются по формуле (3).

$$W_{i(n)} = x_{R,i(n)} - x_{L,i(n)}, s_{i(n)} = W_{i(n)} / k \quad (3)$$

Для уменьшения влияния шума используется сглаживание по скользящему окну длиной m , как показано в формуле (4).

$$s_i^f(n) = (1 / m) \sum_{j=0}^{m-1} s_i(n - j) \quad (4)$$

По сглаженному сигналу выделяются локальные максимумы и минимумы. Амплитуда дыхательного цикла и частота дыхания рассчитываются по формуле (5).

$$A_j = s_i^{f(p_j)} - s_i^{f(q_j)}, RR = 60 N_{peaks} / T \quad (5)$$

где N_{peaks} – число зарегистрированных вдохов за интервал наблюдения T .

Для оценки устойчивости ритма используется индекс регулярности, задаваемый формулой (6), а согласованность грудного и брюшного компонентов оценивается по коэффициенту корреляции согласно формуле (7).

Для оценки устойчивости ритма используется индекс регулярности

$$R = 1 - std(Delta p) / mean(Delta p) \quad (6)$$

где $Delta p$ – интервалы между соседними максимумами.

Согласованность грудного и брюшного компонентов может оцениваться по коэффициенту корреляции

$$C = corr(s_1, s_2) \quad (7)$$

Упрощенный алгоритм работы системы включает следующие этапы: считывание кадра, перевод изображения в пространство HSV, цветовую сегментацию маркеров, морфологическую фильтрацию, сегментацию тела методом K-means в пространстве LAB, валидацию маркеров по области тела, пересчет пиксельных расстояний в миллиметры, формирование временных рядов по нескольким анатомическим уровням, выделение дыхательных циклов и расчет итоговых диагностических показателей. Такое математическое описание делает методику расчета прозрачной и связывает программную реализацию с количественными параметрами дыхания.

Для хранения результатов спроектирована база данных SQLite, включающая таблицы пациентов, видеозаписей и специализированные таблицы показателей. Такое решение обеспечивает централизованное хранение медицинской информации, быстрый доступ к результатам и возможность последующего экспорта в табличные форматы. Разделение показателей по категориям упрощает статистическую обработку и сравнение нескольких исследований одного пациента. Отдельным преимуществом является возможность автоматической синхронизации отчетов и формирование структурированных выгрузок для врача или исследователя, что снижает долю ручной работы и ускоряет анализ данных.

Система поддерживает как интерактивный, так и пакетный режим работы. В интерактивном режиме пользователь получает визуальное представление процесса анализа: отображаются контур тела, координаты маркеров и текущие измеряемые значения. Это удобно при отладке алгоритмов и первичной оценке качества записи. В пакетном режиме возможна последовательная обработка нескольких видеороликов без постоянного участия оператора, что особенно полезно при анализе серий наблюдений. Наличие двух режимов делает решение универсальным для исследовательских и прикладных задач.

Отдельно важно, что в системе предусмотрены механизмы контроля качества входных данных. Программа проверяет соответствие записи базовым условиям: съемка должна вестись в профиль, на однородном контрастном фоне, при стабильном освещении и с неподвижной камерой. Рекомендуемая длительность ролика составляет от 30 секунд до 2 минут, а размещение маркеров вдоль средней линии тела позволяет анализировать согласованность движений грудной клетки, талии и бедер. Соблюдение этих условий принципиально, потому что точность детекции и корректность калибровки напрямую зависят от качества исходного видеоматериала.

Практическая значимость разработки определяется возможностью ее применения в нескольких направлениях. Во-первых, система подходит для первичного скрининга, когда необходимо быстро получить количественную оценку дыхательной активности без сложного

оборудования. Во-вторых, она может использоваться для динамического наблюдения за пациентом в процессе лечения, когда важно сопоставлять показатели между несколькими исследованиями. Наконец, предложенная архитектура может стать основой для дальнейшей интеграции с телемедицинскими сервисами и цифровыми медицинскими платформами.

Заключение. Разработанный программный комплекс решает задачу бесконтактной оценки параметров внешнего дыхания на основе видеоанализа и объединяет в едином процессе сегментацию тела, детекцию и трекинг маркеров, калибровку измерений и расчет клинически значимых показателей. Практическая ценность работы состоит в возможности использовать систему для первичного скрининга, мониторинга динамики лечения и дальнейшей интеграции в цифровые медицинские сервисы. Полученные результаты подтверждают перспективность применения методов компьютерного зрения для функциональной диагностики дыхательной системы.

Список литературы

1. Ревинская, И. И. Методика оценки легочных объемов на основе записи биомеханики дыхательных движений = *Methodology for Assessing Lung Volumes Based on Recording the Biomechanics of Respiratory Movements* / И. И. Ревинская, П. В. Камлач // Доклады БГУИР. – 2023. – Т. 21, № 6. – С. 92–98
2. OpenCV: Open Source Computer Vision Library [Электронный ресурс]. - Режим доступа: opencv.org.
3. NumPy: фундаментальная библиотека для научных вычислений в Python [Электронный ресурс]. - Режим доступа: numpy.org.
4. SQLite: встраиваемая реляционная база данных [Электронный ресурс]. - Режим доступа: sqlite.org.
5. Scikit-learn: библиотека машинного обучения для Python [Электронный ресурс]. - Режим доступа: scikit-learn.org.

UDC 616-78

FUNCTIONAL DIAGNOSTICS OF EXTERNAL RESPIRATION PARAMETERS USING COMPUTER VISION

Luzhinsky A.V.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Scientific supervisor: Revinskaya I.I. - Senior Lecturer of the Department of ETT

Annotation. The paper presents a software system for contactless assessment of external respiration parameters based on patient video analysis. The proposed approach combines body segmentation, marker detection and tracking, automatic scale calibration, time-series processing and storage of calculated indicators in a database. The developed solution is focused on quantitative analysis of respiratory motion and can be used both in real-time operation and in batch processing mode.

The software determines the patient contour, detects reference markers, converts pixel distances into millimeters, identifies breathing cycles and calculates clinically significant indicators, including respiratory rate, amplitude and rhythm stability. The modular architecture also includes a database layer for structured storage and export of results. This makes the proposed system suitable for screening, follow-up observation and further integration into digital medical services.

Keywords. external respiration, contactless diagnostics, computer vision, spirometry, video analysis, marker tracking.