

На правах рукописи



Черненко Анна Дмитриевна

**АЛГОРИТМЫ ПОСТРОЕНИЯ
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ДЕСКРИПТОРОВ ПРИЗНАКОВ
ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ МИКРОЛИЦЕВЫХ ДВИЖЕНИЙ**

Специальность 2.2.12. Приборы, системы и изделия медицинского назначения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Рязань 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» на кафедре «Электронные вычислительные машины».

Научный
Руководитель: **Мельник Ольга Владимировна,**
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Информационно-измерительная и биомедицинская техника» ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина».

Официальные
оппоненты: **Фролов Сергей Владимирович,**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Биомедицинская техника» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов;

Николаев Дмитрий Петрович,
доктор технических наук, доцент, руководитель отдела 95 «Зрительные системы» Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», г. Москва.

Ведущая
организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», г. Санкт-Петербург.

Защита состоится 20 июня 2025 года в 12 ч 00 мин на заседании диссертационного совета Д 24.2.375.03 в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» и на сайте университета www.rsgeu.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2025 года.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1, ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина».

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.375.03,
д-р техн. наук, доцент



Г.В. Овечкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Объективная оценка текущего психоэмоционального состояния человека является актуальной задачей во многих областях – от медицины, психологии и педагогики до проблем подбора персонала, безопасности и криминалистики.

Один из наиболее популярных подходов к оценке эмоционального состояния – анализ выражений лица человека на основе автоматизированной интерпретации его фото- и видеоизображений. Крупнейший специалист в области психологии эмоций Пол Экман показал, что с точки зрения мимики люди любой культуры одинаково выражают свои эмоции, которые представлены семью базовыми выражениями лица: счастье, грусть, гнев, страх, удивление, отвращение и презрение. На сегодняшний день, с учетом активного прогресса в сферах машинного зрения и искусственного интеллекта, существует множество работ, направленных на обнаружение и идентификацию эмоциональных проявлений в мимике. Современные системы распознавания выражений лица достаточно успешно решают задачи предварительной обработки изображения, извлечения визуальных признаков и классификации эмоций, в том числе в режиме реального времени.

Ключевой проблемой большинства существующих систем распознавания выражений лица является неоднозначная связь между мимикой и реальным эмоциональным состоянием человека. Выражение лица во многих ситуациях социального взаимодействия может оказаться как наигранным, так и демонстративно нейтральным. Путем решения данной проблемы является переход от решения задачи анализа макровыражений лица, которые в зависимости от ситуации могут быть как спонтанными, так и фальшивыми, к задаче обнаружения микролицевых движений – кратковременных и низкоамплитудных движений лицевой мускулатуры, участвующих в формировании так называемых микровыражений.

Микровыражения – это кратковременные выражения лица низкой интенсивности, которые обычно появляются, когда люди намеренно или неосознанно пытаются скрыть свои истинные эмоции. Множество исследований, проведенных в данной области, показали, что человек не может контролировать проявление микровыражений и не способен их подавить. Когда запускается эмоциональный эпизод, возникает импульс, который вызывает сокращение соответствующих лицевых мышц. Как только выражение начинает проявляться, человек пытается остановить его, что вызывает кратковременное изменение лица. Оценка продолжительности микролицевого движения различается у разных исследователей, но общепринято, что микролицевое движение должно длиться не более 200 мс.

Процесс обнаружения микролицевых движений состоит из нескольких этапов, а именно: обнаружение ключевых точек лица, извлечение пространственно-временных признаков, классификация признаков. При этом, с учетом слабой выраженности микролицевых движений, требуются исследование и разработка специализированных алгоритмов для реализации каждого из этапов. В диссертационной работе основное внимание уделяется этапу извлечения пространственно-временных дескрипторов признаков, а также частично предшествующему и последующему этапам. Рассмотрена задача обнаружения микролицевых движений. Используется подход, который заключается в вычислении признаков для антропометрических точек на основе областей, в которых возможно возникновение микролицевых движений.

Исследования в направлении анализа микровыражений представляют существенный интерес из-за возможностей выявления скрытых эмоций человека. Актуальной задачей является создание программно-алгоритмических средств, выявляющих признаки подавляемых эмоций на видеопоследовательности изображений, что может быть полезно как при диагностике, так и в терапии различных нарушений эмоциональной сферы, в частности, фобий, депрессии и тревожного расстройства.

Степень разработанности темы исследования. Задача обнаружения характерных точек лица решалась в работах Cootes T.F., Taylor C.J., Cooper D.H., Graham J., Sullivan J., Raveendran K., Amos B. Решением задачи формирования дескрипторов признаков на видеопоследовательности для обнаружения микровыражений лица занимались Gong S., Pietikainen M., Zhao G., Hung X., Fei Z., Valstar M., Batista J., Li X. Вопросы классификации эмоций рассматривались Busso C., Jain J., Movellan J.R., D'Mello S., Graesser A., Mavromoustakos-Blom P., Tan C.T., Bakkes S.

Непосредственно исследованию научно-технических вопросов в области регистрации, распознавания и классификации микровыражений посвящено небольшое число работ отечественных и зарубежных исследователей, что связано с отсутствием подходящих алгоритмов и методов, а также наборов данных для проведения исследований в данной области. Исследованиями алгоритмов для решения задачи автоматизированного анализа занимаются зарубежные ученые Yap M.H., Davison A., Pietikainen M., Zhao G., Chaudhry R., Klazer A., Pfister T. В отечественной науке исследования в области анализа микровыражений представлены немногочисленными работами Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (Гусев А.Н.) и Рязанского государственного радиотехнического университета имени В.Ф. Уткина (Никифоров М.Б., Мельник О.В., Саблина В.А.).

Следует отметить, что в научной литературе рассматриваются различные способы применения анализа микролицевых движений, при этом вопросы обеспечения приемлемой вычислительной сложности остаются без должного внимания. Кроме того, недостаточно проработана проблема обнаружения микродвижений лица в естественной обстановке.

Таким образом, существует научная проблема, связанная с необходимостью поиска новых подходов и алгоритмов для повышения точности и степени автоматизации систем анализа микровыражений лица. Требуется разработать улучшенные алгоритмы анализа микролицевых движений с точки зрения качества и скорости решения поставленных задач.

Цель диссертационной работы заключается в повышении диагностической эффективности обнаружения микролицевых движений в областях их возможного проявления за счёт использования пространственно-временных дескрипторов признаков, вычисляемых с помощью улучшенных алгоритмов.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие **основные задачи**:

- выбор наборов данных для проведения исследований пространственно-временных дескрипторов признаков для анализа микролицевых движений;
- разработка алгоритмов выбора областей возможного проявления микролицевых движений для последующего построения пространственно-временных дескрипторов признаков;

- теоретические и экспериментальные исследования алгоритмов вычисления пространственно-временных дескрипторов признаков;
- разработка улучшенных алгоритмов пространственно-временных дескрипторов признаков для анализа микровыражений лица;
- обоснование повышения диагностической эффективности обнаружения микролицевых движений за счёт использования пространственно-временных дескрипторов признаков, вычисляемых с помощью разработанных алгоритмов.

Объектом исследований являются последовательности изображений с микродвижениями лица человека.

Предметом исследований является совершенствование пространственно-временных дескрипторов признаков для анализа микродвижений лица.

Методы исследования. В данной диссертационной работе теоретические исследования выполнялись с помощью теории методов машинного обучения, теории классических математических алгоритмов вычисления дескрипторов антропометрических точек. Моделирование и экспериментальные исследования предлагаемых алгоритмов выполнялись с использованием набора данных спонтанных действий и микродвижений Spontaneous Micro-Facial Movement Dataset (SAMM), соответствующих системе кодирования лицевых движений, фреймворка MediaPipe Face Mesh на основе библиотеки TensorFlow, языков программирования MATLAB и Python.

Научная новизна работы определяется разработкой нового алгоритма поиска антропометрических точек вокруг глаз и новых методик подбора параметров алгоритмов вычисления пространственно-временных дескрипторов признаков и модификацией алгоритма вычисления дескриптора локальных бинарных шаблонов по трем ортогональным плоскостям.

Практическая значимость и научная ценность результатов заключается в том, что:

- применение разработанного алгоритма обнаружения антропометрических точек вокруг глаз позволяет уменьшить среднеквадратичное отклонение координат обнаруженных точек от искомым по сравнению с алгоритмом модели активной формы;
- применение модифицированного алгоритма и разработанной методики позволяет повысить диагностическую эффективность обнаружения микролицевых движений.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует паспорту специальности 2.2.12. Приборы, системы и изделия медицинского назначения (технические науки) по направлениям исследований 4, 14, 19, 22.

Достоверность и обоснованность результатов и выводов подтверждается корректным использованием математического аппарата, результатами моделирования на ЭВМ и экспериментальными исследованиями с использованием специализированных аннотированных наборов данных.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритм обнаружения антропометрических точек вокруг глаз, обеспечивающий в 2,2 раза меньшее среднеквадратичное отклонение координат обнаруженных точек от искомым по сравнению с алгоритмом модели активной формы.
2. Модифицированный алгоритм вычисления дескриптора локальных бинарных шаблонов по трем ортогональным плоскостям и методика подбора его параметров,

которые позволили получить диагностическую эффективность обнаружения микролицевых движений, равную 98%, в то время как диагностическая эффективность при стандартной реализации алгоритма составляет 88%.

3. Методика подбора параметров для алгоритмов вычисления дескриптора нечеткой гистограммы направленного оптического потока и дескриптора нечеткой гистограммы ориентаций оптического потока, которая позволила получить диагностическую эффективность обнаружения микролицевых движений, равную 98% и 97% соответственно, в то время как диагностическая эффективность при стандартной реализации алгоритмов составляет 95% и 96% соответственно.

Внедрение результатов диссертации. Разработанные программно-алгоритмические средства были использованы в центре практической психологии ФГБОУ ВО РязГМУ Минздрава России при проведении исследований по влиянию звуковой стимуляции на эмоциональную сферу человека. Результаты диссертации внедрены в разработки ООО «Биотехпродуктс» и в учебный процесс ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» при подготовке студентов, обучающихся по направлению 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии».

Апробация работы. Основные результаты докладывались и обсуждались на конференциях: II Международный научно-технический форум «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2019, РГРТУ (Рязань, 2019 г.); V НТК магистрантов Рязанского радиотехнического университета, РГРТУ (Рязань, 2019 г.); 8-ая международная Средиземноморская конференция по встроенной вычислительной обработке МЕСО-2019 (Будва, Черногория, 2019 г.); XXXIV Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых, специалистов БИОМЕДСИСТЕМЫ-2021 (Рязань, 2021 г.); V Международный научно-технический форум «Современные технологии в науке и образовании» (СТНО-2022) (Рязань, 2022 г.); 32-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению ГРАФИКОН-2022 (Рязань, 2022 г.); XXXV Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых, специалистов БИОМЕДСИСТЕМЫ-2022 (Рязань, 2022 г.); 78-я Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио, 26 апреля 2023 года, СПбГЭТУ «ЛЭТИ»; Международная научная конференция Системы и технологии цифровой медицины STDH-23 (Ташкент, Узбекистан, 2023 г.); Десятая международная конференция по когнитивной науке (Пятигорск, 2024 г.); Физика и Радиоэлектроника в Медицине и Экологии ФРЭМЭ-2024 (Суздаль, 2024 г.); XXXVII Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых, специалистов БИОМЕДСИСТЕМЫ-2024 (Рязань, 2024 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 22 печатные работы, в том числе из них 4 статьи в научных рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертаций по специальности 2.2.12; 3 публикации, индексируемые в международных реферативных базах Web of Science и (или) Scopus; 13 статей и тезисов докладов внутривузовских, всероссийских и международных конференций, 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка используемой литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 150 страниц, работа содержит 53 рисунка и 19 таблиц. Список использованных источников включает 136 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение содержит обоснование актуальности темы исследования, цель диссертационной работы, задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели, сведения об объекте, предмете и методах исследования. Отражена научная новизна полученных результатов диссертационной работы и положения, выносимые на защиту. Представлена апробация полученных результатов.

Первая глава диссертации содержит информацию о современных областях применения и существующих алгоритмах вычисления пространственно-временных дескрипторов признаков. В ней приведены обзор и анализ проблем и задач, возникающих в системах обнаружения и анализа микродвижений лица, а также подходов к их решению. Рассмотрены этапы обнаружения микродвижений лица. Представлены наборы данных, применяемые при решении задачи обнаружения микродвижений лица.

Процесс обнаружения микродвижений лица состоит из последовательных этапов, корректность выполнения каждого из которых влияет на итоговую диагностическую эффективность обнаружения микролицевых движений.

Первым этапом является локализация антропометрических точек лица, соответствующих областям возможного появления микродвижений, которая может выполняться вручную или методами автоматического определения лицевых ориентиров.

Вторым этапом является вычисление признаков микродвижений в локализованных областях. Наиболее распространенными алгоритмами вычисления пространственно-временных дескрипторов признаков, применяемых для анализа микродвижений лица, являются дескриптор локального бинарного шаблона по трем ортогональным плоскостям, дескриптор трехмерных гистограмм ориентированных градиентов, дескриптор гистограммы ориентированного оптического потока.

Дескриптор локальных бинарных шаблонов по трем ортогональным плоскостям Local Binary Pattern from Three Orthogonal Planes (LBP-TOР)

Дескрипторы LBP-TOР последовательности изображений вычисляются путем объединения локальных бинарных шаблонов по трем ортогональным плоскостям XOY, XOT, YOT, принимая во внимание только статистику совпадений в трех направлениях. Чтобы учесть временной порядок расположения микрошаблонов вся последовательность изображений делится на блоки в соответствии с временной и пространственной областями. В каждом блоке вычисляются гистограммы LBP-TOР, которые объединяются в одну гистограмму. Метки гистограмм содержат информацию, описывающую внешний вид и временную информацию на уровне пикселей по трем ортогональным плоскостям. Метки суммируются в небольшие блоки, затем вся информация с регионального уровня объединяется для создания глобального описания движения.

Гистограмма движения описывается формулой (1):

$$H_{r,c,d,j,i} = \sum_{x,y,t} I\{f_j(x,y,t) = i\}, i = 0, \dots, n_j - 1; j = 0, 1, 2, \quad (1)$$

где n_j – количество меток, созданных дескриптором LBP в j -й плоскости ($j = 0$: XOY, $j = 1$: XOT, $j = 2$: YOT), $f_j(x,y,t)$ – LBP код центрального пикселя с координатами (x,y,t) в j -й плоскости, r – индекс строк, c – индекс столбцов, d – время.

Дескриптор гистограммы ориентированного оптического потока Histogram of Oriented Optical Flow (HOOF)

Дескриптор HOOF представляет собой гистограммы направлений движения, взвешенные по величине движения. Для различения движений необходимо анализировать динамику временных рядов дескрипторов HOOF, определенных для каждого изображения последовательности. Временной ряд гистограмм представлен формулой (2):

$$h_t = [h_{t,1}, h_{t,2}, \dots, h_{t,B}]^T \quad (2)$$

Метрикой в пространстве гистограмм, называемой минимальной разностью попарных значений, является сумма расстояний между точками, из которых построены гистограммы. При формировании гистограмм по линейно изменяющимся данным расстояние вычисляется по формуле (3):

$$d_{MDPA}(h_1, h_2) = \sum_{i=1}^B \left| \sum_{j=1}^i (h_{1,i} - h_{2,j}) \right|. \quad (3)$$

Дескриптор трехмерных гистограмм ориентированных градиентов 3D Histograms of Oriented Gradients (3DHOG)

Для каждой области лица создаются трехмерные блоки δv_{xy} , δv_{yt} , δv_{xt} , на основе которых вычисляются гистограммы ориентированных градиентов. Для каждого текущего кадра выполняется сравнение с признаками среднего кадра, который представлен усредненными признаками начального кадра, k -го кадра перед текущим кадром, конечного кадра, k -го кадра после текущего кадра. Вычисленная разница есть различие между гистограммами в каждой области.

Для расчета различий между гистограммами используется расстояние хи-квадрат χ^2 , которое определяется формулой (4):

$$\chi^2(P, Q) = \sum_b \frac{(P_b - Q_b)^2}{(P_b + Q_b)}, \quad (4)$$

где b – это b -я ячейка на гистограммах P и Q , которые имеют одинаковое количество ячеек для общего количества ячеек B .

Последним этапом является классификация вычисленных признаков.

Несмотря на прогресс рассмотренных методов для распознавания микродвижений лица, они имеют ограничения в точности получаемых результатов. В то же время нейронные сети способны выполнить извлечение признаков и классификацию за один этап, но для правильного их обучения требуется значительный объем корректно размеченных данных. Из-за триггерного механизма и спонтанности микровыражений сложно сформировать большие наборы обучающих примеров. В связи с этим в первой главе обосновано использование классических методов вычисления дескрипторов признаков, применяемых для обнаружения микродвижений лица, диагностическая эффективность которого может быть повышена за счет создания более точных алгоритмов обнаружения областей интереса на видеопоследовательности изображений и модификации последующих вычислительных процедур с учетом особенностей проблемы обнаружения микродвижений.

Вторая глава посвящена разработке алгоритмов выбора областей возможного проявления микродвижений лица, необходимых для дальнейшего вычисления пространственно-временных дескрипторов признаков. Разработан алгоритм

вычисления антропометрических точек вокруг глаз. Предложен процесс подготовки набора векторов признаков для повышения точности определения микродвижений лица.

Алгоритм вычисления антропометрических точек на верхнем и нижнем веке глаза состоит из следующих шагов.

Шаг 1. Вычисление дескрипторов LBP изображения глаза. Анализ текстуры LBP.

Шаг 2. Поиск внешнего и внутреннего уголков глаза. В качестве точек, удовлетворяющих данному условию, выбираются крайние точки по горизонтали с максимальной интенсивностью.

Шаг 3. Поиск зрачка.

3.1. Применение медианного фильтра для удаления зашумленности.

3.2. Преобразование полученного черно-белого изображения в бинарное изображение.

3.3. Инвертирование изображения.

3.4. Поиск объектов окружностей на изображении.

Шаг 4. Вычисление геометрического центра глаза.

Вычисление геометрического центра глаза реализуется путем нахождения середины между уголками глаза.

Шаг 5. Вычисление антропометрических точек на верхнем веке.

5.1. Вычисление самой верхней точки верхнего века по отношению к точке геометрического центра глаза. Данная точка должна удовлетворять одновременно следующим условиям: она должна быть расположена выше зрачка и соответствовать одной из точек с наибольшей интенсивностью, лежащих на ресничном контуре.

5.2. Вычисление антропометрических точек, расположенных в верхнем правом секторе глаза. Из вычисленного геометрического центра глаза проводится луч до самой верхней точки верхнего века под углом 30° к базовой линии, перпендикулярной центру. Затем выполняется оценка попадания данной точки на ресничный контур. Считается, что точка попала на ресничный контур, если она имеет наименьшее расстояние с точкой интенсивности, расположенной на ресничном контуре. Постановка остальных точек выполняется аналогичным образом. Все точки на верхнем веке вычисляются примерно на одинаковом расстоянии между собой.

Шаг 6. Вычисление антропометрических точек на нижнем веке. Данный шаг выполняется аналогично шагу 5.

Шаг 7. Перенос вычисленных антропометрических точек на исходное изображение лица.

Результаты, полученные с помощью разработанного алгоритма, сравнивались с результатами, полученными с помощью алгоритма модели активной формы Active Shape Model (ASM). Для сравнения полученных данных было выбрано образцовое изображение, которым являлось то же самое изображение, что было подано на вход алгоритмов, но размеченное вручную. Для оценки точности разработанного алгоритма и ASM было вычислено среднеквадратичное отклонение координат антропометрических точек, вычисленных каждым из алгоритмов, от координат точек образцового изображения. Результаты показали, что разработанный алгоритм показывает меньшее в 2,2 раза среднеквадратичное отклонение по сравнению с алгоритмом ASM.

Для конвейера анализа микродвижений лица необходимо точное обнаружение антропометрических точек, поэтому также было выполнено сравнение фреймворков

MediaPipe Face Mesh и OpenFace, по результатам которого выбран MediaPipe Face Mesh. Далее для этапа обнаружения антропометрических точек в системе обнаружения микродвижений лица используется данный фреймворк.

Для распознавания микродвижений лица очень важно локализовать области лица, в которых микродвижение имело место. В системе кодирования лицевых движений (СКЛиД) выражение лица представлено комбинацией различных визуально наблюдаемых движений лица, называемых единицами действий (ЕД). Области возможного возникновения микродвижений лица выбираются в соответствии со СКЛиД. Такими областями являются правая щека, подбородок, левая щека, правая бровь, левая бровь, нос (прямая), нос (нижняя часть), правый глаз, левый глаз, губы (внутренняя часть), губы (внешняя часть). Для подготовки набора векторов признаков в качестве исходных данных использовался набор данных SAMM и файл разметки данного набора по СКЛиД.

В соответствии с описанными в файле ЕД выбираются 62 антропометрические точки в анализируемых областях лица. Для описания наличия или отсутствия микродвижения в конкретной точке разработаны векторы признаков. Вектор признаков в исходном состоянии имеет вид одномерного массива, состоящего из нулей. Последовательность элементов этого вектора соответствует последовательности всех 62 выбранных антропометрических точек. Описанный процесс подготовки векторов признаков обеспечивает возможность определить наличие или отсутствие микродвижения в определенной области лица, что является важным шагом для точного выявления неосознанно проявляемой эмоции.

Третья глава посвящена модификации алгоритмов вычисления пространственно-временных дескрипторов признаков LBP-TOP, FHOOF и FHOFO, анализу влияния настраиваемых параметров указанных алгоритмов на диагностическую эффективность обнаружения микролицевых движений и разработке методик подбора данных параметров.

Этап извлечения признаков является одним из самых важных и заключается в вычислении дескрипторов признаков по выбранному алгоритму. Это позволяет преобразовать большой объем информации, содержащийся в некоторой области изображения или в последовательности фрагментов изображений, в сравнительно небольшой вектор признаков, описывающий наиболее существенные для решаемой задачи характеристики рассматриваемой области.

Выбор дескриптора зависит от специфики решаемой задачи. В настоящей работе рассматривается задача обнаружения микродвижений лица по последовательности изображений лица человека с помощью алгоритмов вычисления дескрипторов LBP-TOP, FHOOF и FHOFO.

В качестве классификаторов используются метод опорных векторов Support Vector Machine (SVM) и многослойный перцептрон Multilayer Perceptron (MLP).

1. Исследование алгоритма вычисления дескриптора LBP-TOP

В исследовании использовалась реализация алгоритма на основе трехмерных блоков, сформированных из последовательности изображений. В выбранной реализации вычислительная сложность алгоритма снижена за счет меньшего количества циклов.

Шаги алгоритма вычисления дескриптора LBP-TOP представлены ниже.

Шаг 1. На вход поступает трехмерный блок, сформированный из последовательности изображений.

Шаг 2. Преобразование трехмерного блока в три двумерных блока соответственно для каждой из плоскостей ХОУ, ХОТ, УОТ.

Шаг 3. Вычисление дескриптора LBP для каждого из трех полученных на предыдущем шаге двумерных блоков.

Шаг 4. Преобразование каждого из трех полученных векторов признаков LBP в трехмерный блок для дальнейшего вычисления гистограмм.

Шаг 5. Разбиение полученных трехмерных блоков на меньшие блоки в соответствии с входными параметрами алгоритма LBP-TOP.

Шаг 6. Каждый меньший блок разворачивается в вектор, по которому вычисляется гистограмма с ранее заданным количеством интервалов.

Шаг 7. Конкатенация вычисленных по меньшим блокам гистограмм в единую гистограмму признаков по каждой из плоскостей ХОУ, ХОТ, УОТ.

Шаг 8. Конкатенация вычисленных трех гистограмм по ортогональным плоскостям в единую гистограмму признаков LBP-TOP.

На данном шаге вся полученная локальная информация по трем плоскостям объединяется. Таким образом, получается статистика по ХОУ, ХОТ, УОТ плоскостям для формирования информации о микродвижении и выражении лица.

Гистограмма формируется на основе формулы (1), представленной выше.

Модификация данного алгоритма состояла в изменении траектории размещения точек в окрестности вокруг центрального пикселя с круговой на эллиптическую по причине того, что в пределах одних и тех же временных интервалов текстура может резко меняться.

На основе разработанной методики подбора параметров и модификации алгоритма LBP-TOP диагностическая эффективность обнаружения микролицевых движений составила 98%, тогда как при использовании стандартной реализации она составляла 88%.

2. Исследование алгоритмов вычисления дескрипторов FHOOF и FHOFO

Другими алгоритмами вычисления пространственно-временных дескрипторов признаков являются алгоритмы вычисления дескрипторов, основанные на дескрипторе гистограмм ориентированного оптического потока HOOF, а именно FHOOF и FHOFO.

Шаги алгоритмов вычисления пространственно-временных дескрипторов FHOOF и FHOFO.

Шаг 1. Вычислить вектор оптического потока $v = [v_x, v_y]^T$ для каждого местоположения пикселя изображения.

Шаг 2. Вычислить величину движения ρ_j , где $\rho = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$ и направление движения θ_j , где $\pi \leq \theta \leq \pi$ для каждого пикселя на основе векторов оптического потока, полученных на шаге 1. Таким образом, для каждого пикселя получена пара из величины и направления движения (ρ, θ) .

Для алгоритма FHOOF величина движения рассчитывается по формуле (5):

$$\rho'_j = \begin{cases} \rho_j, & \text{если } \rho_j > T, \text{ где } T - \text{пороговое значение;} \\ 0, & \text{в других случаях.} \end{cases} \quad (5)$$

Для алгоритма FHOFO величина движения рассчитывается по формуле (6):

$$\rho_j' = \begin{cases} 1, & \text{если } \rho_j > T, \text{ где } T - \text{пороговое значение;} \\ 0, & \text{в других случаях.} \end{cases} \quad (6)$$

Шаг 3. Сгруппировать все векторы потока в соответствии с углом поворота и взвесить в соответствии с их величиной.

Значение принадлежности θ_j к i -му интервалу гистограммы определяется (7):

$$\mu_{ij} = \exp\left(\frac{-(\theta_j - c_i)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (7)$$

где c_i – центр i -го интервала, σ – дисперсия функции принадлежности Гаусса.

Шаг 4. Вычислить гистограмму с количеством интервалов n' на основе векторов оптического потока.

Шаг 5. Преобразовать гистограмму с количеством интервалов n' в грубую гистограмму с меньшим количеством интервалов n .

Величина направления движения θ_j разбивается на подгруппы по n' интервалам точной гистограммы в диапазоне $[-\pi, \pi)$. Затем интервалы точной гистограммы отображаются в интервалы грубой гистограммы.

Различие между алгоритмами вычисления дескрипторов FHOOF и FHOFO заключается в следующем: дескриптор FHOOF учитывает амплитуду и ориентацию вектора оптического потока, описывающего движение между кадрами, FHOFO – только ориентацию вектора оптического потока. Для исследуемых алгоритмов была разработана методика подбора значений параметров, которая позволила достичь диагностической эффективности обнаружения микролицевых движений 98% и 97% соответственно, в то время как диагностическая эффективность при стандартной реализации алгоритмов составляла 95% для FHOOF и 96% для FHOFO.

Исследования времени вычисления дескрипторов FHOOF и FHOFO показали, что скорость вычисления дескриптора FHOFO, учитывающего только ориентацию вектора оптического потока, в два раза выше по сравнению со скоростью вычисления дескриптора FHOOF, учитывающего ориентацию и амплитуду вектора оптического потока, независимо от алгоритма формирования блоков.

Сводные результаты оценки диагностической эффективности обнаружения микролицевых движений и скорости работы предложенных выше модификаций алгоритмов на наборе данных SAMM представлены в таблице 1.

Таким образом, показано, что потенциал методов машинного обучения для решения задачи классификации остается высоким, что делает возможным их дальнейшее использование после оптимизации процедуры выбора областей интереса на изображении и согласования дескрипторов признаков с используемым классификатором. Наилучшие значения диагностической эффективности обнаружения микролицевых движений для всех модифицированных алгоритмов были получены при использовании классификатора MLP. Алгоритмом с наименьшим временем выполнения является FHOFO, но для него диагностическая эффективность обнаружения микролицевых движений меньше по сравнению с алгоритмами LBP-TOP и FHOOF.

Таблица 1 – Результаты экспериментальных исследований модифицированных реализаций алгоритмов вычисления дескрипторов LBP-TOP, FHOOF и FHOFO

Дескриптор Классификатор		LBP-TOP		FHOOF		FHOFO	
		Прямоуг. паралл.	Скользкие блоки	Прямоуг. паралл.	Скользкие блоки	Прямоуг. паралл.	Скользкие блоки
SVM	Linear	89%	92%	76%	79%	74%	84%
	RBF	90%	92%	81%	85%	83%	84%
	Sigmoid	74%	79%	63%	74%	74%	62%
MLP		96%	98%	98%	96%	97%	97%
Среднее время вычисления дескрипторов для всего набора, минуты		95		114		45	

Четвертая глава содержит информацию о перспективах диагностики психоэмоционального состояния человека на основе микровыражений лица, разработанном программном комплексе и его основных функциях, а также о результатах применения программного комплекса на собственном наборе данных.

В диссертационной работе разработан программный комплекс, включающий предложенные модифицированные алгоритмы вычисления дескрипторов признаков LBP-TOP, FHOOF и FHOFO по антропометрическим точкам.

Реализация программного комплекса была выполнена в среде разработки MATLAB® с использованием скриптов, разработанных на языке Python.

Программный комплекс обеспечивает выполнение следующих функций.

1. Загрузка набора данных.
2. Поиск опорных точек на изображениях последовательностей.
3. Вычисление дескрипторов признаков LBP-TOP, FHOOF и FHOFO.
4. Вычисление диагностической эффективности обнаружения микролицевых движений.

Применение программного комплекса реализуется в несколько этапов.

Этап 1. Обнаружение, локализация лица и вычисление антропометрических точек на лице.

На этапе обнаружения и вычисления антропометрических точек на лице используется фреймворк MediaPipe Face Mesh, который позволяет обнаружить 468 точек, из которых выбраны 62 точки, соответствующие областям возможного возникновения микродвижений лица в соответствии со СКЛиД (рисунок 1).

Этап 2. Вычисление дескрипторов признаков.

Вычисление дескрипторов признаков выполняется с помощью одного из модифицированных алгоритмов: LBP-TOP, FHOOF или FHOFO. Программный комплекс позволяет выбрать требуемый алгоритм, заполнить значения параметров и запустить вычисление выбранного пространственно-временного дескриптора признаков.

На рисунке 2 представлены параметры алгоритма дескриптора LBP-TOP со значениями, введенными пользователем, для вычисления дескриптора признаков.

Этап 3. Вычисление диагностической эффективности обнаружения микролицевых движений.

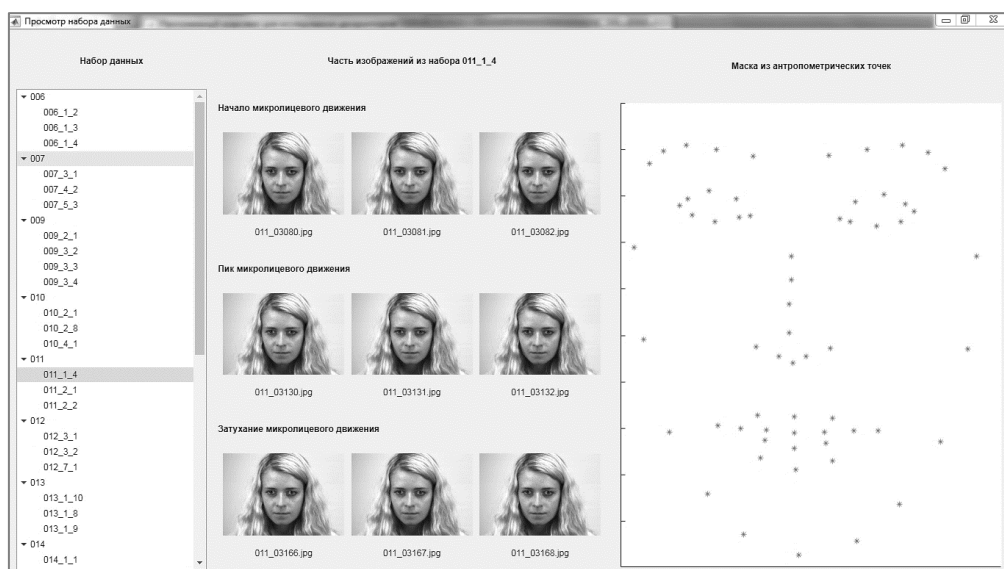


Рисунок 1 – Отображение части изображений из набора данных SAMM и маски для выбранного изображения

2. Вычисление дескрипторов

Алгоритм построения блоков

LBP-TOP FHOOF/FHOFO

Введите значения параметров алгоритма вычисления дескрипторов LBP-TOP

Количество выбранных пикселей: $P =$

Расстояние от центрального пикселя до выбранного пикселя: $R =$

Кoeffициенты деления блоков изображений на блоки меньшего размера

Кoeffициент деления блока по оси X: $nQr =$

Кoeffициент деления блока по оси Y: $nQc =$

Кoeffициент деления блока по оси T: $nQt =$

Кoeffициенты перекрытия блоков между собой

Кoeffициент перекрытия блоков по горизонтали: $rolr =$

Кoeffициент перекрытия блоков по вертикали: $colr =$

Кoeffициент перекрытия блоков по диагонали: $tolr =$

Кoeffициенты размещения выбранных пикселей вокруг центрального пикселя:

Кoeffициент плоскости XT: $coefXT =$

Кoeffициент плоскости YT: $coefYT =$

Рисунок 2 – Параметры для вычисления дескриптора LBP-TOP

Для оценки диагностической эффективности обнаружения микролицевых движений в составе программного комплекса применяются классификаторы SVM и MLP, предварительно обученные на наборе данных SAMM.

С целью оценки способности разработанного программного комплекса фиксировать наличие микродвижений лица в условиях воздействия эмоциональной стимуляции совместно с сотрудниками центра практической психологии ФГБОУ ВО РязГМУ Минздрава России был создан собственный набор последовательностей изображений (примеры кадров из набора приведены на рисунках 3 и 4). При создании набора в качестве эмоционального стимула выступала музыка, которую испытуемый

Для последовательности изображений, представленной на рисунке 4, вычисленный вектор признаков имеет вид:

[0, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1].

Результаты эксперимента показали, что доля выявленных микродвижений антропометрических точек по выбранным последовательностям с эмоциональной окраской составляет в среднем 55% от общего количества антропометрических точек, сгруппированных в областях лица, соответствующих микровыражению, отражающему проявление определенной эмоции, в то время как на последовательностях изображений с подлинно нейтральным выражением лица доля выявленных микродвижений антропометрических точек составляет в среднем 18% от общего количества точек, и их комбинации не соответствуют какому-либо конкретному микровыражению. Таким образом, при наличии сдерживаемых эмоций программный комплекс способен обнаружить антропометрические точки, задействованные в микролицевом движении, и, следовательно, зафиксировать наличие подавляемых эмоций.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе проведены исследование и модификация алгоритмов построения пространственно-временных дескрипторов признаков, разработаны методики подбора параметров, позволяющие повысить диагностическую эффективность обнаружения микролицевых движений.

Получены следующие результаты диссертационной работы.

1. Разработан новый алгоритм обнаружения антропометрических точек вокруг глаз, обеспечивающий в 2,2 раза меньшее среднеквадратичное отклонение вычисленных координат антропометрических точек от искомым по сравнению с алгоритмом модели активной формы.

2. Модифицирован алгоритм вычисления дескриптора локального бинарного шаблона по трем ортогональным плоскостям путем изменения траектории расположения окрестных точек вокруг центрального пикселя с круговой на эллиптическую, и разработана методика подбора параметров данного алгоритма, которые позволили повысить диагностическую эффективность обнаружения микролицевых движений до 98% при использовании на наборе данных SAMM.

3. Разработана методика подбора параметров для алгоритмов дескриптора нечеткой гистограммы направленного оптического потока и дескриптора нечеткой гистограммы ориентаций оптического потока, которая позволила повысить диагностическую эффективность обнаружения микролицевых движений до 98% и 97% соответственно на наборе данных SAMM.

4. Разработан программный комплекс, предоставляющий возможности обнаружения антропометрических точек, задействованных в микролицевых движениях, и проведения исследований оценки влияния настраиваемых параметров пространственно-временных дескрипторов признаков (LBP-TOP, FHOOF, FHOFO) на диагностическую эффективность обнаружения микролицевых движений.

Совокупность предлагаемых в диссертационной работе алгоритмов, методик и программных средств создает предпосылки для разработки автоматизированных систем для объективной оценки эмоциональных реакций на основе обработки видеопоследовательности изображений лица в задачах диагностики нарушений эмоциональной сферы.

ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в научных рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК

1. Мельник О.В., Саблина В.А., Черненко А.Д. Распознавание микровыражений лица с использованием классификаторов на основе машинного обучения // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. №1. С 125-135.
2. Мельник О.В., Саблина В.А., Черненко А.Д. Применение дескриптора признаков FHOOF для обнаружения микролицевых движений // Биомедицинская радиоэлектроника. 2023. Т. 26. № 3. С. 61-70.
3. Мельник О.В., Никифоров М.Б., Саблина В.А., Черненко А.Д. Обнаружение микролицевых движений с помощью пространственно-временных дескрипторов на основе оптического потока // Биомедицинская радиоэлектроника. 2023. Т. 26. №2. С. 5-17.
4. Мельник О.В., Саблина В.А., Черненко А.Д. Программный комплекс для исследования пространственно-временных дескрипторов признаков // Биомедицинская радиоэлектроника. 2024. Т 27. №.4 С. 48-55.

Публикации в изданиях, индексируемые в международных реферативных базах (Web of Science и (или) Scopus)

5. Sergeeva A.D. (Chernenko A.D.), Savin A.V., Sablina V.A., and Melnik O.V. Emotion Recognition from Micro-Expressions: Search for the Face and Eyes // Proceedings of the 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). Budva, Montenegro. – 2019. – Pp. 632-635.
6. Sergeeva A.D. (Chernenko A.D.) and Sablina V.A. Eye Landmarks Detection Technology for Facial Micro-Expressions Analysis // Proceedings of the 9th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). Budva, Montenegro. – 2020. – Pp. 448-451.
7. Melnik O.V., Nikiforov M.B, Sablina V.A., and Chernenko A.D. A Comparative Analysis of the Micro-Facial Movement Detection Accuracy Depending on the Fuzzy Spatio-Temporal Feature Descriptor Selection, the Proceedings of the 2023 Conference on Systems and Technologies of the Digital HealthCare (STDH). Tashkent, Uzbekistan. – 2023. – Pp. 77-80.

Тезисы докладов на конференциях

8. Sergeeva A.D. (Chernenko A.D.), Melnik O.V., and Sablina V.A. Facial Micro Expression Analysis for Deception Detection: Methods and Applications, Proceedings of 3rd ISPRS International Workshop, Photogrammetric and Computer Vision Techniques for Video Surveillance, Biometrics and Biomedicine, ISPRS WG 11/10,11/5 Workshop, 2019, Moscow, State Research Institute of Aviation Systems, 13-15 May 2019. – Pp. 44-45.
9. Саблина В.А., Сергеева А.Д. (Черненко А.Д.) Методы распознавания микровыражений лица: обзор // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2019: сб. тр. II междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.4./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2019. – С. 117-122.
10. Сергеева А.Д. (Черненко А.Д.) Анализ микровыражений на основе системы кодирования лицевых движений // Материалы V научно-технической конференции магистрантов Рязанского государственного радиотехнического университета, 2019. – С. 206.

11. Саблина В.А., Сергеева А.Д. (Черненко А.Д.) Классификация методов обнаружения антропометрических точек лица // Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы – Биомедсистемы-2019: сб. тр. XXXII Всерос. науч.-техн. конф. студ., мол. ученых и спец., 4-6 декабря 2019 г. / под общ. ред. В.И. Жулева. – Рязань: ИП Коняхин А.В. (Book Jet), 2019. – С. 203-206.

12. Саблина В.А., Сергеева А.Д. (Черненко А.Д.) Использование метода ASM для обнаружения антропометрических точек лица // Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства». – Рязань: РГРТУ, 2019. – С. 122-128.

13. Саблина В.А., Черненко А.Д. Распознавание выражений лица с помощью дескриптора локальных бинарных шаблонов по трем ортогональным плоскостям // Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы – Биомедсистемы-2021 [текст]: сб. тр. XXXIV Всерос. науч.-техн. конф. студ., мол. ученых и спец., 8-10 декабря 2021 г. / под общ. ред. В.И. Жулева. – Рязань: ИП Коняхин А.В. (Book Jet), 2021. С. 287–290.

14. Черненко А.Д. Алгоритм вычисления дескриптора локальных бинарных шаблонов по трем ортогональным плоскостям для распознавания микровыражений лица // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2022 [текст]: сб. тр. V междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.4./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2022. – С. 89–94.

15. Chernenko A., Ashapkina M., Sablina V., and Alpatov A. Physical Activity Set Selection for Emotional State Harmonization Based on Facial Micro-Expression Analysis // Proceedings of the 32nd International Conference on Computer Graphics and Vision “GraphiCon”. – 2022. – Pp. 682-691.

16. Саблина В.А., Черненко А.Д. Подготовка набора векторов признаков для обнаружения микролицевых движений// Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы – Биомедсистемы-2022 [текст]: сб. тр. XXXV Всерос. науч.-техн. конф. студ., мол. ученых и спец., 7-9 декабря 2022 г. / под общ. ред. В.И. Жулева. – Рязань: ИП Коняхин А.В. (Book Jet), 2021. – С. 190–192.

17. Никифоров М.Б., Саблина В.А., Черненко А.Д. Применение алгоритмов пространственно-временных дескрипторов признаков для анализа микровыражений лица // 78-я Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио. Сборник материалов. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. – С. 365-370.

18. Мельник О.В., Саблина В.А., Черненко А.Д., Никифоров М.Б., Яковлев Н.В. Видеокомпьютерные технологии для объективной оценки скрытых эмоциональных реакций на основе анализа микровыражений лица // Десятая международная конференция по когнитивной науке: Тезисы докладов. Пятигорск, 26-30 июня 2024 г. В двух частях. Часть I / Отв. Ред. Киреев М.В. – Пятигорск, 2024. – С. 206-207.

19. Мельник О.В., Саблина В.А., Черненко А.Д. Программный комплекс для анализа пространственно-временных дескрипторов признаков микродвижений лица на видеопоследовательности // Труды XVI Международной научной конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ’2024» – Владимир-Суздаль, Россия, Доклады, 2024. – С. 239-243.

20. Черненко А.Д. Перспективы развития современных методов и алгоритмов анализа микровыражений лица// Биотехнические, медицинские и экологические

системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы – Биомедсистемы-2024 [текст]: сб. тр. XXXVII Всерос. науч.-техн. конф. студ., мол. ученых и спец., 4-6 декабря 2024 г. / под общ. ред. В.И. Жулева. – Рязань: ИП Коняхин А.В. (Book Jet), 2024. – С. 109–112.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

21. Программа обнаружения антропометрических точек вокруг глаз на изображении лица. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024665193 / Саблина В.А., Черненко А.Д. // Федеральная служба по интеллектуальной собственности. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 27.06.2024.

22. Программный комплекс вычисления пространственно-временных дескрипторов признаков на основе антропометрических точек для анализа микровыражений лица. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024665164 / Саблина В.А., Черненко А.Д. // Федеральная служба по интеллектуальной собственности. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 27.06.2024.

Черненко Анна Дмитриевна

АЛГОРИТМЫ ПОСТРОЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ДЕСКРИПТОРОВ ПРИЗНАКОВ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ МИКРОЛИЦЕВЫХ ДВИЖЕНИЙ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать . Формат бумаги 60x84 1/16.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет
им. В.Ф. Уткина.

390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.