



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный технический университет
имени Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н. Э. Баумана)

ФАКУЛЬТЕТ «Информатика, искусственный интеллект и системы управления»

КАФЕДРА «Программное обеспечение ЭВМ и информационные технологии»

РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

К НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

НА ТЕМУ:

*«Исследование методов распознавания лиц в
видеопотоке»*

Студент ИУ7-56Б
(Группа)

(Подпись, дата)

Мамврийский И. С.
(И. О. Фамилия)

Студент ИУ7-56Б
(Группа)

(Подпись, дата)

Барсков А. Д.
(И. О. Фамилия)

Студент ИУ7-56Б
(Группа)

(Подпись, дата)

Салаев Ю. Д.
(И. О. Фамилия)

Студент ИУ7-56Б
(Группа)

(Подпись, дата)

Зайцев К. А.
(И. О. Фамилия)

Руководитель НИР

(Подпись, дата)

Кострицкий А. С.
(И. О. Фамилия)

2024 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 Метод главных компонент	5
2 Метод опорных векторов	9
3 Метод Виолы-Джонса	12
4 Метод гибкого сравнения на графах	17
5 Классификация методов распознавания лиц	20
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	22
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	25

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, с ростом интереса к развитию технологий идентификации личности, особенно на основе изображений лиц, алгоритмы распознавания лиц приобретают все большее значение. Одним из ключевых направлений в области биометрических методов стало автоматическое обнаружение и идентификация лиц на изображениях, обеспечивая эффективные решения для таких разнообразных областей, как охранные системы, криминалистическая экспертиза, верификация, телеконференции, а также в сфере фотографии для автоматической фокусировки на лице человека.

Технология распознавания лиц на изображениях предоставляет преимущество перед другими биометрическими методами, поскольку не требует физического контакта с устройством. С учетом стремительного развития цифровой техники, она является наиболее приемлемой для массового применения. Однако, несмотря на свою эффективность, алгоритмы распознавания лиц сталкиваются с вызовами, такими как зависимость качества результата от условий освещенности, ракурса и положения лица, что требует постоянного совершенствования и анализа современных методов в данной области.

Цель данной работы — классификация методов распознавания лиц в видеопотоке.

В рамках выполнения работы необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ предметной области;
- провести классификацию подходов к решению;
- провести анализ методов.

1 Метод главных компонент

Определения

Собственный вектор матрицы — ненулевой вектор, умножение квадратной матрицы на который дает тот же вектор с числовым коэффициентом, называемым собственным значением [1].

Ковариационная матрица вектора — квадратная симметрическая матрица, элементами которой являются ковариации — меры связанности всех возможных пар компонент вектора. Ковариация имеет отрицательное значение, если большие значения одной компоненты соответствуют меньшим значениям другой, и наоборот. Ковариация имеет положительное значение, если большие значения одной компоненты соответствуют большим значениям другой, и аналогично для меньших значений. Ковариация компоненты вектора самой с собой равна дисперсии [2]. На (1.1) представлен пример ковариационной матрицы для трех компонент, ковариация обозначена как $\text{Cov}(X_1, X_2)$, дисперсия обозначена как $\text{Var}(X_1, X_2)$.

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \text{Var}(X_1) & \text{Cov}(X_1, X_2) & \text{Cov}(X_1, X_3) \\ \text{Cov}(X_2, X_1) & \text{Var}(X_2) & \text{Cov}(X_2, X_3) \\ \text{Cov}(X_3, X_1) & \text{Cov}(X_3, X_2) & \text{Var}(X_3) \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

Алгоритм метода главных компонент

Метод главных компонент — один из статистических методов уменьшения размерности данных, т. е. числа параметров, которые заданы переменными и необходимы для описания объекта. Такие методы по возможности сохраняют наибольшее количество информации и общую структуру данных [3; 4]. Далее будет изложен алгоритм уменьшения размерности из n в k :

1. Метод главных компонент очень чувствителен к статистическим выбросам и неточностям в данных, поэтому перед применением необходима стандартизация данных — приведение данных к единому масштабу [4; 5]. Это можно сделать вычитанием среднего из каждой переменной и делением полученного на стандартное отклонение [5]:

$$Z_i = \frac{X_i - \bar{X}_i}{\sigma_{X_i}}. \quad (1.2)$$

2. Для уменьшения размерности данных необходимо найти переменные, которые сильно зависимы от значений друг друга, т. е. скоррелированные переменные. Это важно, поскольку такие переменные могут содержать излишнюю информацию, от которой можно было бы избавиться с минимальными потерями полезной информации. Чтобы понять, какие переменные скоррелированы, необходимо найти ковариационную матрицу.
3. Далее необходимо найти главные компоненты — новые переменные, которые получаются после введения новой системы координат таким образом, что каждая следующая главная компонента максимизирует дисперсию данных относительно себя, но не коррелирует с предыдущими главными компонентами, т. е. перпендикулярна им. Таким образом, из n изначальных переменных получится n главных компонент, однако последним главным компонентам будет соответствовать наименьшая дисперсия, т. е. наименьшая изменчивость — это означает, что эти главные компоненты содержат наименьшее количество информации и могут быть отброшены с минимальными потерями. Математически направления осей главных компонент — это собственные векторы ковариационной матрицы, а собственные значения — это коэффициенты, отражающие дисперсию, соответствующую этой главной компоненте. Таким образом, полученные собственные значения необходимо упорядочить по убыванию и выбрать k первых собственных векторов, которые и будут новыми переменными для уменьшения размерности [3—5].

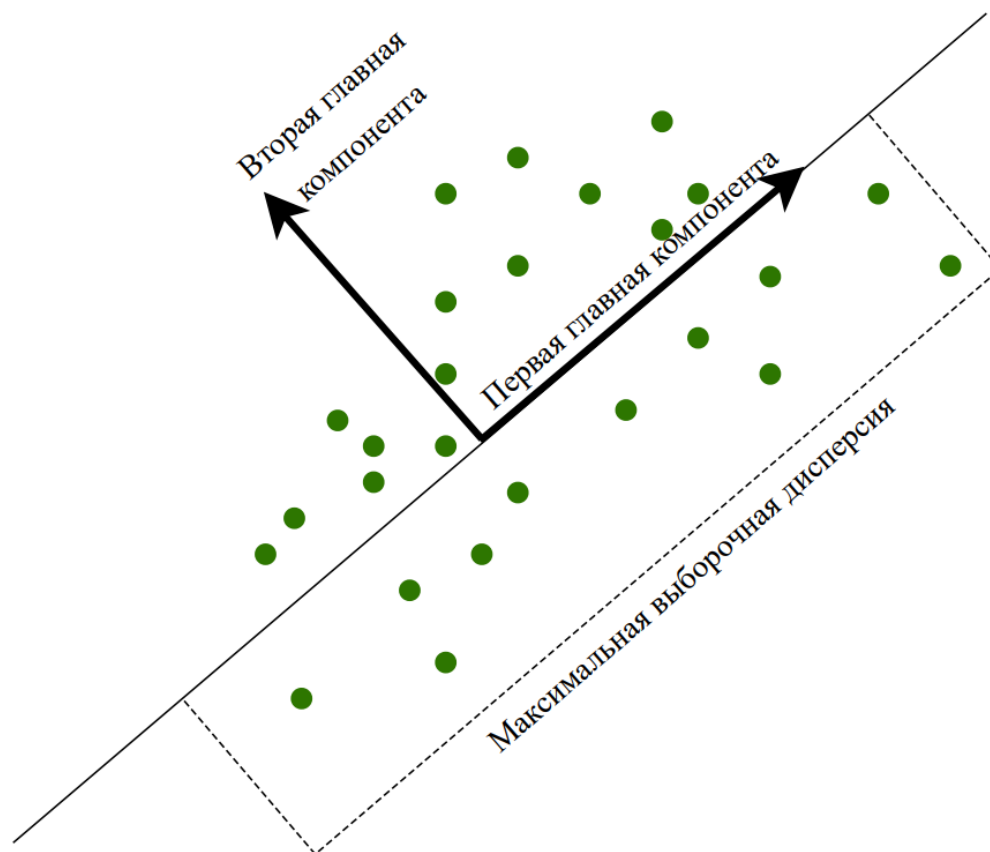


Рисунок 1.1 – Пример ввода первой и второй главных компонент

4. На последнем шаге необходимо преобразовать данные, перейдя от исходных переменных к полученным k главным компонентам. Для этого необходимо умножить транспонированную матрицу исходных данных D на транспонированную матрицу главных компонент PC [5].

$$D^T \cdot PC^T \quad (1.3)$$

Применение метода главных компонент для распознавания лиц

Для задачи распознавания человека по изображению лица метод можно применить следующим образом: входные вектора представляют собой отцентрированные (лицо должно находиться в центре изображения и занимать большую его площадь) и приведённые к единому масштабу черно-белые изображения лица m на n пикселей. Собственные вектора, вычисленные для всего набора изображений лиц, называются собственными лицами (*eigenfaces*). Метод главных компонент в применении к изображениям лиц так же назы-

вают методом собственных лиц. Собственные лица имеют полезное свойство, заключающееся в том, что изображение, соответствующее каждому такому вектору имеет лицеподобную форму [6; 7].

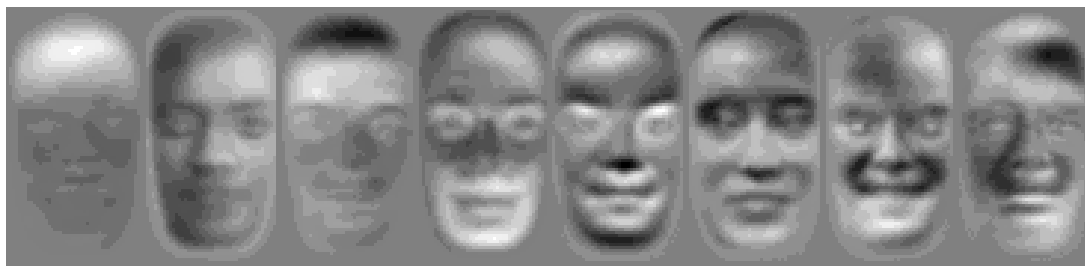


Рисунок 1.2 – Пример собственных лиц [6]

Полученный один раз на обучающей выборке изображений лиц набор собственных векторов используется для кодирования всех остальных изображений лиц, которые представляются взвешенной комбинацией этих собственных векторов [7]. Процесс распознавания заключается в сравнении главных компонент неизвестного изображения с компонентами всех остальных изображений. Для этого обычно применяют какую-либо метрику (простейший случай — Евклидово расстояние) [6].

2 Метод опорных векторов

В данном разделе рассмотрены основные понятия метода опорных векторов и алгоритм его работы. Определения терминов, используемых в данной работе.

1. Гиперплоскость — это $(n - 1)$ -мерная подплоскость в n -мерном евклидовом пространстве, которая разделяет пространство на две отдельные части [8].
2. Ядро — это функция, которая вычисляет точечное произведение двух векторов в высокоразмерном пространстве [9].
3. Радиальные базисные функции — это класс функций, которые используются в нейронных сетях для аппроксимации и интерполяции данных [10].

Принцип работы алгоритма

Метод опорных векторов — линейный алгоритм, который используется в задачах классификации и регрессии. Суть алгоритма — найти линию или гиперплоскость, разделяющую данные на классы.

Изначально метод опорных векторов работает как линейный классификатор, способный решать только задачи, где классы данных можно разделить прямой линией. Однако при использовании нелинейных ядер, метод опорных векторов способен преобразовывать исходные данные в пространство более высокой размерности, где можно найти оптимальную разделяющую гиперплоскость [11]. Некоторые из популярных ядер метода опорных векторов:

- линейное ядро (преобразует данные в ту же размерность без изменений);
- полиномиальное ядро (преобразует данные в более высокую размерность с использованием полиномиальной функции);
- радиальное базисное функциональное ядро (преобразует данные в бесконечно высокую размерность с использованием радиальной базисной функции).

Пример. На рисунке 2.1 изображен набор данных, который необходимо классифицировать и отделить квадраты от треугольников. Существует бесконечное количество линий, способных разделить эти два класса. Основная цель в поставленной задаче — найти оптимальную из них.

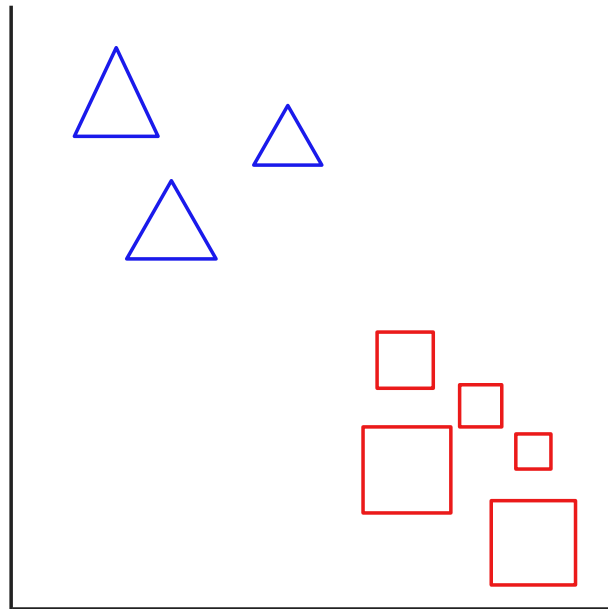


Рисунок 2.1 – Исходные данные

На рисунке 2.2 изображены два варианта разделения на классы.

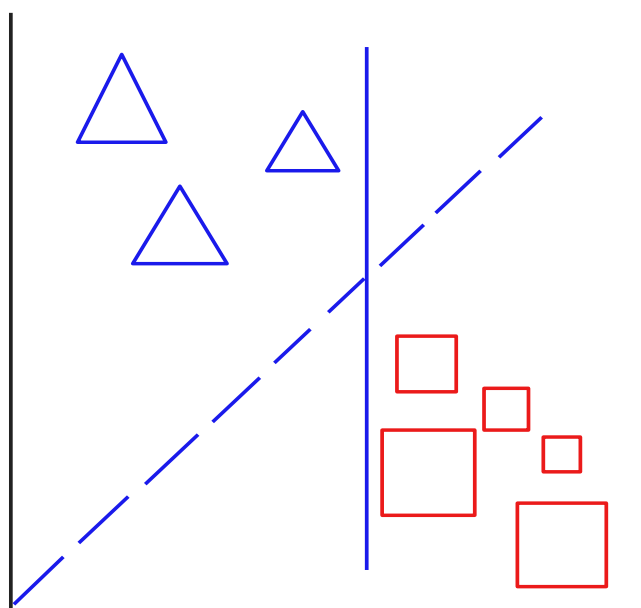


Рисунок 2.2 – Варианты разделяющих линий

Сплошная линия проходит слишком близко к классам треугольников и квадратов. Несмотря на то, что она верно классифицировала все объекты текущего набора данных, она не будет генерализованной, не будет так же хорошо разграничивать незнакомый набор данных. Поэтому в данном случае оптимальные выбор – прерывистая линия [11].

Основные этапы метода опорных векторов:

1. Подготовка обучающего набора данных, состоящего из пар (вектор признаков, метка класса).
2. Выбор ядра и настройка параметров модели.
3. Минимизация функции потерь с использованием оптимизационных методов для нахождения гиперплоскости, максимально разделяющей классы.
4. Нахождение опорных векторов (опорные векторы – точки данных, лежащие на границах зазора между классами).
5. Определение гиперплоскости: гиперплоскость строится для максимизации зазора между классами с учетом опорных векторов и параметров ядра.
6. Оценка обобщающей способности модели на тестовой выборке для проверки ее работоспособности на новых данных.

3 Метод Виолы-Джонса

Метод Виолы-Джонса — алгоритм, позволяющий обнаруживать и распознавать лица на изображениях и видеопоследовательностях в режиме реального времени [12]. Данный метод основан на использовании следующих принципов:

1. Интегральное представление изображения

Представим исходное изображение в виде матрицы, каждый элемент которой содержит значение интенсивности пикселя. Интегральное представление изображения формируется путем создания новой матрицы, размерность которой совпадает с матрицей исходного изображения. В каждом элементе данной матрицы хранится сумма интенсивностей всех пикселей исходного изображения, находящихся левее и выше текущего пикселя в исходной матрице [13], т. е. элементы новой матрицы рассчитываются по следующей формуле:

$$L(x, y) = \sum_{i=0, j=0}^{i \leq x, j \leq y} I(i, j), \quad (3.1)$$

где $I(i, j)$ — значение элемента матрицы исходного изображения, $L(x, y)$ — значение элемента матрицы интегрального изображения.

Особенностью интегрального представления является возможность вычисления суммы интенсивностей пикселей внутри произвольных прямоугольных областей [13]. Рассмотрим следующий пример, где искомой областью является прямоугольник $ABCD$:

Сумма интенсивностей пикселей, лежащих внутри области $ABCD$, будет вычисляться по следующей формуле:

$$F(ABCD) = F(A) + F(D) - F(B) - F(C), \quad (3.2)$$

где $F(X)$ — суммы интенсивностей пикселей внутри прямоугольной области X .

Таким образом, для вычисления суммы интенсивностей пикселей внутри произвольных прямоугольных областей требуется четыре обращения к

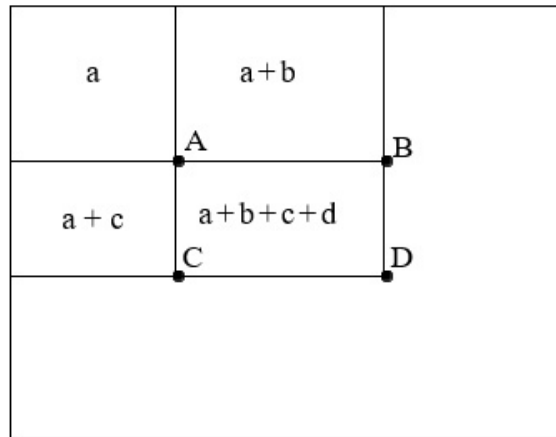


Рисунок 3.1 – Расчет суммы интенсивностей пикселей в прямоугольнике $ABCD$

матрице интегрального представления изображения.

2. Признаки Хаара

Для выделения областей изображения, которые наиболее вероятно содержат нужные объекты, используются признаки Хаара. Признак Хаара — результат сравнения смежных прямоугольных областей изображения путем вычисления разности сумм интенсивностей пикселей соответствующих прямоугольников [14]. В методе Виолы — Джонса используются три вида данных признаков: «два прямоугольника», «три прямоугольника», «четыре прямоугольника» [12] (рис. 3.2 [15]).

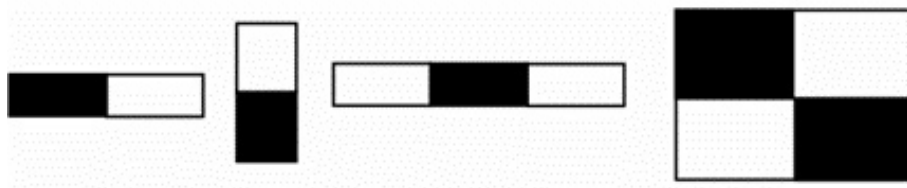


Рисунок 3.2 – Признаки Хаара

Значение каждого признака вычисляется по следующей формуле:

$$F = X - Y, \quad (3.3)$$

где X - сумма интенсивностей пикселей, находящихся в светлой области признака, Y - сумма интенсивностей пикселей, находящихся в темной области признака.

Для вычисления данных сумм интенсивностей пикселей за константное время используется интегральное представление изображения.

3. Алгоритм AdaBoost

Для прогнозирования категории, к которой относится входной объект, в машинном обучении используется модель, называемая классификатором [16]. Слабый (или простой) классификатор — это классификатор, который решающий задачу классификации чуть лучше, чем случайное угадывание [17], т. е. вероятность ошибки меньше 50%.

Для повышения точности аналитических моделей используется бустинг (англ. boosting) — последовательная композиция алгоритмов машинного обучения, в которой каждый следующий алгоритм стремится компенсировать недостатки композиции всех предыдущих алгоритмов [13]. В методе Виолы — Джонса в качестве бустинга выбран алгоритм AdaBoost, в ходе выполнения которого формируется сложный классификатор, состоящий из набора простых и имеющий меньшую вероятность ошибки, чем у каждого слабого классификатора по отдельности:

$$a_s(x) = \sum_{i=1}^n b_i * a_i(x), \quad (3.4)$$

где x — изображение, $a_s(x)$ — сложный классификатор, $a_i(x)$ — слабый классификатор, b_i — весовой коэффициент соответствующего слабого классификатора.

Основные этапы работы алгоритма AdaBoost [12]:

- Инициализация весов объектов обучающего набора одинаковым значением;
- Для каждой итерации алгоритма на основе сравнения ошибок классификации выбирается слабый классификатор, который наилучшим образом разделяет обучающий набор с учетом текущих весов объектов;
- Для каждого выбранного классификатора вычисляется его ошибка и вес, отражающий точность разделения объектов;

- Обновление весов объектов таким образом, чтобы неправильно классифицированные объекты получили больший вес на следующей итерации;
- Формирование сложного классификатора на основе слабых классификаторов и их весов.

Таким образом, в ходе выполнения данного алгоритма путем исключения большинства имеющихся признаков выбираются наиболее подходящие для конкретного объекта, в результате чего формируется классификатор с критическими признаками.

В качестве классификаторов в методе Виолы — Джонса используются вышеописанные признаки Хаара. Для каждого признака выбирается соответствующий порог для бинарной классификации объектов, т. е. для определения того, какие значения признака считаются положительными, а какие — отрицательными. Выбор оптимального порога осуществляется таким образом, чтобы минимизировать ошибку классификации, учитывая веса объектов в процессе обучения алгоритма.

4. Каскадная структура классификаторов - последовательное объединение усложняющихся классификаторов в каскадную структуру (рис. 3.3 [15]) [12]. Данная структура повышает скорость обнаружения объектов, фокусируя свою работу на наиболее информативных областях изображения [13]. Это достигается тем, что каскад пытается отсеять как можно больше отрицательных экземпляров на самом раннем этапе: количество вычисленных признаков для анализа отрицательных областей должно быть значительно меньше, чем количество признаков, вычисленных для положительных областей. Следовательно, более сложные классификаторы применяются только к тем областям, которые уже прошли отсев более простыми классификаторами, что экономит ресурсы и улучшает производительность системы.

5. Сканирующее окно

Для выделения областей, в которых могут находиться нужные объекты, используется сканирующее окно — перемещаемая прямоугольная активная область, в которой осуществляется поиск объектов [18]. Данный

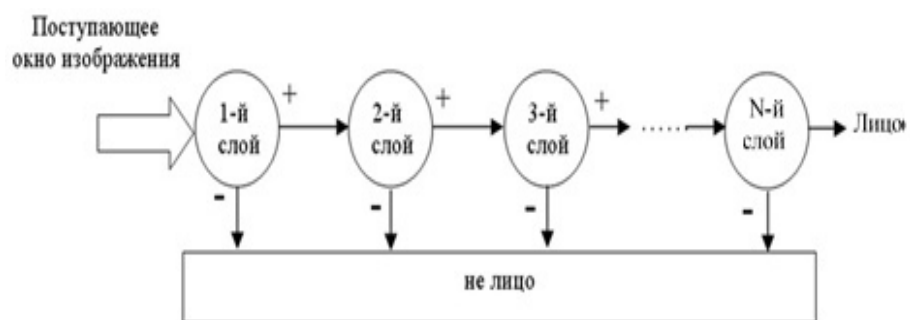


Рисунок 3.3 – Каскадная структура классификаторов

подход включает в себя пошаговый анализ различных прямоугольных подокон изображения, взятых с различными смещениями и масштабами. Впоследствии для каждой такой области применяются вышеописанные каскады классификаторов, которые оценивают, соответствует ли содержимое подокна определенным критериям.

4 Метод гибкого сравнения на графах

Метод гибкого сравнения на графах — метод обработки изображений и распознавания образов, который используется для нахождения соответствия между двумя изображениями, учитывая возможные искажения, изменение масштаба и повороты [19].

Данный метод является одним из способов распознавания лиц. Лица представлены в виде графов со взвешенными вершинами и ребрами [20]. Во время распознавания один из графов — константный (эталонный), в то время как другой изменяется (деформируется) с целью наилучшей подгонки к первому.

В данном методе графы могут представлять собой как прямоугольную решетку (рис. 4.1.а), так и структуру, образованную антропометрическими точками лица (рис. 4.1.б).

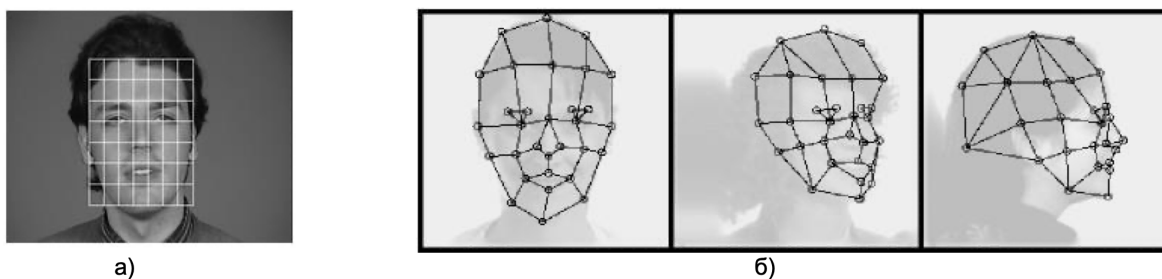


Рисунок 4.1 – Пример структуры графа для распознавания лиц

а) Регулярная решетка;

б) Граф на основе антропометрических точек лица.

Частотное содержимое изображения — характеристика, показывающая насколько быстро меняется яркость или цвет в различных частях изображения [21].

Фильтр Габора — фильтр, который анализирует, присутствует ли какое-либо конкретное частотное содержимое в изображении в различных направлениях в области вокруг точки или области анализа. Данный фильтр представляет собой синусоидальную плоскую волну (рис. 4.2) [22].

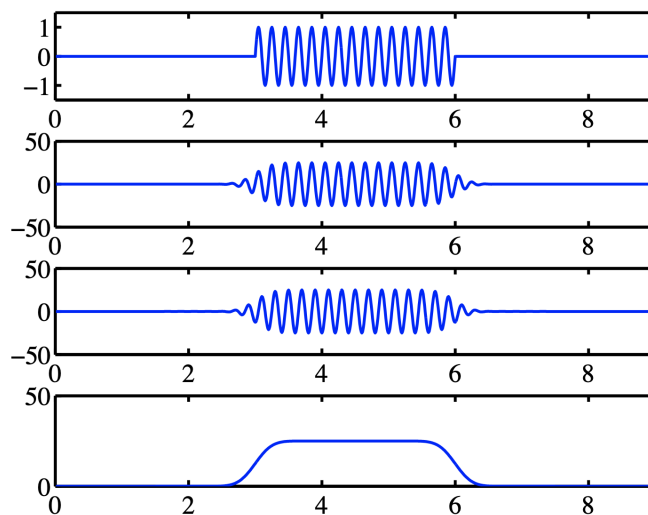


Рисунок 4.2 – Пример синусоидальной плоской волны.

Свертка — операция вычисления нового значения интенсивности, степени яркости светлых пикселей по сравнению с более темными тонами, заданного пикселя, при котором учитываются значения окружающих его соседних пикселей.

В некоторой локальной области вершины графа вычисляют значения путем свертки значений яркости пикселей с набором (рис. 4.3) фильтров Габора (рис. 4.4).

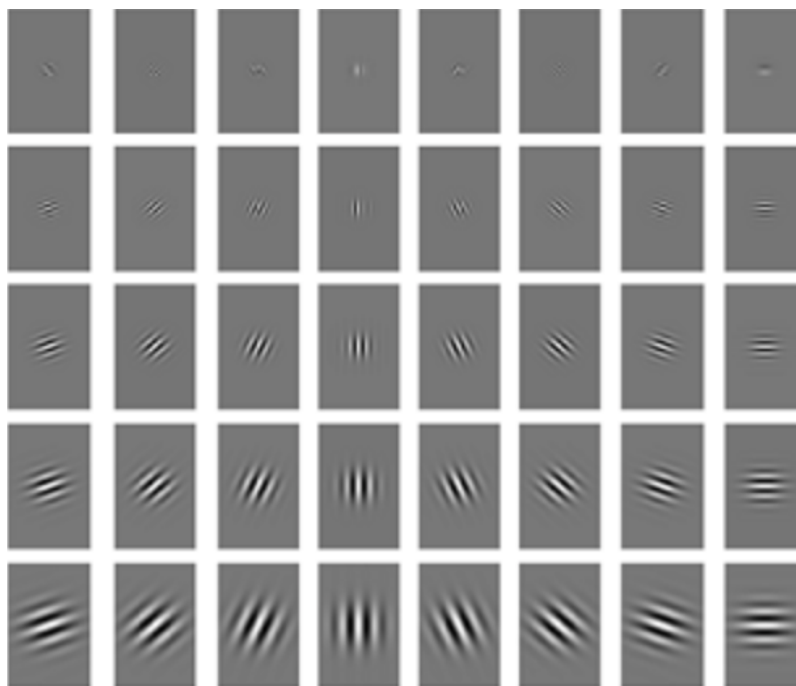


Рисунок 4.3 – Набор фильтров Габора.

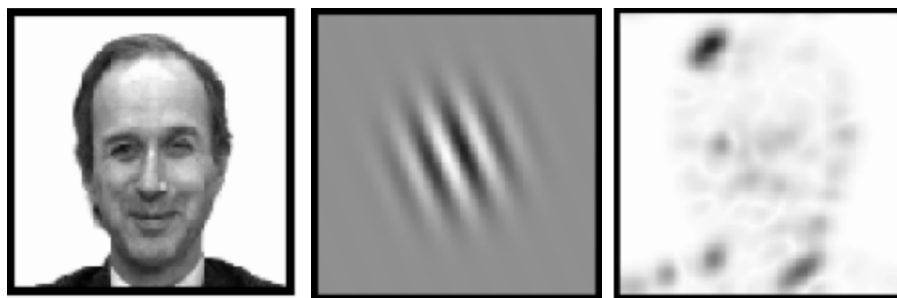


Рисунок 4.4 – Пример свертки изображения лица с фильтрами Габора.

Алгоритм распознавания лица:

1. Происходит деформация графа путем смещения каждой из его вершин на некоторое расстояние в различных направлениях относительно его исходного местоположения (рис. 4.5);
2. Выбирается такая позиция, при которой разница между значениями в вершине деформируемого графа и соответствующей ей вершине эталонного графа будет минимальной;
3. Данная операция выполняется поочередно для всех вершин графа, пока не будет достигнуто наименьшее суммарное различие между признаками этих графов;
4. Данная процедура деформации выполняется для всех эталонных лиц, заложенных в базу данных системы. Результат распознавания – эталон с наименьшим суммарным различием.



Рисунок 4.5 – Пример деформации графа.

5 Классификация методов распознавания лиц

Методы распознавания лиц в видеопотоке можно классифицировать по различным критериям, таким как подход к представлению данных, использование обучения с учителем или без учителя и другие. Ниже представлена классификация рассматриваемых методов:

1. Метод главных компонент:

- **Подход к представлению данных:** Метод главных компонент используется для уменьшения размерности данных путем проецирования их на главные компоненты.
- **Тип обучения:** Без учителя (преобразование данных).
- **Применение в распознавании лиц:** Используется для снижения размерности признакового пространства при работе с изображениями лиц.

2. Метод гибкого сравнения на графах:

- **Подход к представлению данных:** Использует графы для представления структурной информации о лицах.
- **Тип обучения:** В зависимости от реализации, может быть как с учителем, так и без учителя.
- **Применение в распознавании лиц:** Используется при работе с изображениями, где важна структура и отношения между частями лица.

3. Метод опорных векторов:

- **Подход к представлению данных:** Использует векторы признаков для построения гиперплоскости, разделяющей классы.
- **Тип обучения:** С учителем (обучение с классифицированными примерами).
- **Применение в распознавании лиц:** Используется в задачах классификации лиц, особенно в случаях, когда есть различные классы (например, различные люди).

4. Метод Виолы-Джонса:

- **Подход к представлению данных:** Использует характеристики (признаки), основанные на интенсивности пикселей.
- **Тип обучения:** С учителем (обучение на положительных и отрицательных примерах).
- **Применение в распознавании лиц:** Применяется для обнаружения лиц в реальном времени, основываясь на быстрых вычислениях признаков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цель данной работы, которая заключалась в создании классификации методов распознавания лиц в видеопотоке выполнена, также в ходе выполнения данной работы были выполнены следующие задачи:

- провести анализ предметной области;
- провести классификацию подходов к решению;
- провести анализ методов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Канатников А. Н., Крищенко А. П.* Линейная алгебра: Учеб. для вузов. — Москва : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. — С. 336. — (Математика в техническом университете; Вып. IV).
2. *Ширяев А. Н.* Глава 2, §6. Случайные величины II. Т. 1. — Cambridge, New York : МЦНМО, 2004. — С. 301. — Т. 1. 520 с.
3. *Орлов А. И., Луценко Е. В.* Методы снижения размерности пространства статистических данных // Научный журнал КубГАУ. — 2016. — № 119.
4. *Поляк Б. Т., Хлебников М. В.* Метод главных компонент: робастные версии // Автомат. и телемех. — 2017. — № 3. — С. 130—148.
5. *Закария Д.* Пошаговое объяснение анализа основных компонентов (PCA). — 2023. — URL: <https://builtin.com/data-science/step-step-explanation-principal-component-analysis> ; Accessed: 11.11.2023.
6. *Брилюк Д., Старовойтов В.* Распознавание человека по изображению лица и нейросетевые методы. — Минск, 2001.
7. *Паршин С. Е.* Исследование параметров алгоритмов распознавания лиц // Сборник научных трудов НГТУ. — 2019. — 1 (94). — С. 55—70. — DOI: 10.17212/2307-6879-2019-1-55-70.
8. Сборник задач и упражнений по высшей математике для студентов экономических специальностей : учеб.-метод. пособие : в 2 ч. Ч. 1 / А. В. Конюх [и др.]. — Минск : БГЭУ, 2021, 2021. — С. 159.
9. Искусственный интеллект: Введение в метод опорных векторов (SVM) и его применение в реальных задачах. — [Электронный ресурс] Режим доступа: nauchniestati.ru/spravka/metod-opornyh-vektorov-svm/?ysclid=lqjqjwkhik266674310.
10. Использование радиальных базисных функций в нейронных сетях: эффективный подход к обработке данных. — [Электронный ресурс] Режим доступа: nauchniestati.ru/spravka/radialnye-bazisnye-funkczii/?ysclid=lqjsghtklg734833904.

11. *Левчук С., Якименко А.* Исследование характеристик алгоритмов распознавания лиц // Сборник научных трудов НГТУ. — 2018. — Т. 3/4, № 93. — С. 47—49.
12. *Джонс М., Виола П.* Быстрое обнаружение объектов с использованием расширенного каскада простых функций. — 2001. — — Конференция IEEE. по компьютерному зрению и распознаванию образов.
13. *Спицын В., Чанг Б. Т. Т., Хоанг Ф. Н.* Распознавание лиц на основе применения метода Виолы-Джонса, Вейвлет-преобразования и метода главных компонент. — 2012. — — Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.
14. *Левчук С., Якименко А.* Исследование характеристик алгоритмов распознавания лиц. — 2018. — — Сборник научных трудов НГТУ.
15. *Эрман Е., Мохаммед М. М. Г.* Метод обнаружения лиц на изображении с использованием комбинации метода Виолы Джонса и алгоритмов определения цвета кожи. — 2015. — — Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика.
16. *Мерфи К. П.* Машинное обучение: вероятностная перспектива. — 2012. — — Кембридж, Массачусетс. : MIT Press.
17. *Бишоп К. М.* Распознавание образов и машинное обучение. — 2006. — — Прыгун.
18. *Новиков А., Фокин А., Чубукина Т.* Оптимизация распознавания объекта на изображении методом адаптивного движения сканирующего окна. — 2015. — — Известия Тульского государственного университета. Технические науки.
19. *Вискотт Л., Феллоус Д., Крюгер Н.* Интеллектуальные биометрические методы распознавания отпечатков пальцев и лиц. — 1999.
20. Вэньи Чж, Рама Челлап, Распознавание лиц на основе изображений. — [Электронный ресурс] Режим доступа: http://www.face-rec.org/interesting-papers/general/chapter_figure.pdf.
21. Робокрафт. Обработка изображения — свёртка. — [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://robocraft.ru/computervision/427>.

22. Учебное пособие по фильтрам Габора. — [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://web.archive.org/web/20090419123314/http://mplab.ucsd.edu/tutorials/gabor.pdf>.