



Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности

Сайт журнала:

<http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 004.93

СИСТЕМА РАСПОЗНАВАНИЯ ЛИЦ НА МИКРОКОМПЬЮТЕРАХ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ИЗОЛИРОВАННОМ КОНТУРЕ

Шувалов А.К.

ФГАОУ ВО «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ "ВЫСШАЯ ШКОЛА ЭКОНОМИКИ"» (МОСКОВСКИЙ ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОНИКИ И МАТЕМАТИКИ ИМ. А.Н. ТИХОНОВА), г. Москва, Россия (101000, город Москва, Мясницкая ул., д.20), e-mail: mr.sasha.shuv@gmail.com

В работе рассматривается способ реализации системы распознавания лиц на микрокомпьютере с целью использования в изолированном контуре. Работа содержит анализ предметной области с информацией о классических вариантах реализации подобных систем. Также, в работе проводилось исследование различных моделей детектирования, распознавания лиц и способов хранения векторов признаков.

Ключевые слова: Распознавание лиц; микрокомпьютеры; детектирование лиц; хранение векторов; изолированное устройство; машинное обучение.

MICROCOMPUTER-BASED FACIAL RECOGNITION SYSTEM FOR USE IN AN ISOLATED CIRCUIT

Shuvalov A.K.

NATIONAL RESEARCH UNIVERSITY HIGHER SCHOOL OF ECONOMICS (A.N. TIKHONOV MOSCOW INSTITUTE OF ELECTRONICS AND MATHEMATICS), Moscow, Russia (101000, Moscow, Myasnitskaya str., 20), e-mail: mr.sasha.shuv@gmail.com

The paper deals with the method of realization of a face recognition system on a microcomputer for use in an isolated loop. The work contains the analysis of the subject area with information about classical variants of realization of such systems. Also, the paper investigated different detection models, face recognition and ways of storing feature vectors.

Keywords: Face recognition; microcomputers; face detection; vector storage; isolated device; machine learning.

Введение

Системы распознавания лиц являются неотъемлемой частью современной жизни. Они встроены в телефоны, терминалы оплаты, служат для обеспечения безопасности в различных секторах коммерческого блока и государственных предприятий.

По данным компании ResFaces, в период с апреля 2021 года по апрель 2022, спрос на системы распознавания лиц вырос на 80% [1]. Если рассмотреть новые данные, то по информации генерального директора компании NtechLab, с 2021 года число российских регионов, использующих систему распознавания лиц, выросло с 5 до 62 [2]. Данная тенденция четко показывает, что государство и коммерческие компании заинтересованы в данном типе решений.

Однако, если проанализировать описания устройств, которые представлены на рынке, можно заметить, что там не указана возможность работы без передачи видео потока по сети на сервер, для дальнейшего анализа. Такой подход хоть и хорошо себя зарекомендовал, но вносит дополнительные точки отказа в процесс обработки и повышает вероятность атаки со стороны злоумышленника, например, с перехватом и/или подменой трафика. В некоторых случаях, представленные выше угрозы, могут быть критически важными, что подводит к разработке специального устройства, которое будет способно принимать решения об идентификации пользователя без пересылки трафика на сервер.

Преимущества данного подхода:

- Меньше вероятность атаки со стороны нарушителя;
- Устройство легко транспортировать, достаточно просто переставить в новое место.

Недостатки:

- Нет возможности валидации результатов;
- Ограничен выбор моделей, чтобы избежать большого потребления ресурсов.

Чтобы исследование показывало более наглядные результаты, был выбран порог по качеству распознавания лиц в 95%. Данный выбор обусловлен качеством распознавания на различных тестовых датасетах, статистика по которым представлена в открытом доступе.

Анализ предметной области

Для более полного погружения в тему, необходимо определить из чего состоят системы распознавания, для чего и где применяются.

В первую очередь, распознавание лиц – это способ идентификации или подтверждения личности человека по его лицу [3]. Когда же мы говорим про систему распознавания, то это уже ПО, которое реализует распознавание лиц. Сам процесс работы такой системы в базовом варианте состоит из 4 основных шагов [4]:

- Обнаружение лица;
- Преобразования лица в числовую последовательности;
- Уменьшение размерности вектора;
- Поиск совпадений по базе данных.

Существует множество вариантов использования данной технологии для улучшения нашей жизни и обеспечения безопасности:

1. Области применения – зоны пограничного контроля, телефоны, органы правопорядка. Назначение – идентификация пользователей для поиска людей в базе нарушителей, контроль за доступом на территорию;

2. Области применения – банки, магазины. Назначение – анализ черт лица, анализ эмоций от покупки, идентификация пользователя для персонального обслуживания;

3. Области применения – различные коммерческие компании. Назначение – анализ соблюдения техники безопасности на предприятии, контроль рабочего времени, анализ действий сотрудника на рабочем месте.

В работе, используется развертывание на микрокомпьютере. Данный выбор был сделан исходя из анализа решений на рынке, числа актуальных публикация и сравнительного анализа различных вариантов развертывания. Данный анализ представлен в Таблице 1.

Таблица 1. - Плюсы и минусы различных вариантов систем распознавания

Тип развертывания	Плюсы	Минусы
Микрокомпьютеры	Можно использовать как скрытое устройство из-за малых размеров	Ограничение по ресурсам
	Удобство размещения в различных физических местах	
	Возможность работы в изолированном контуре или для снижения нагрузки на сервер	
Сервера/облака	Можно использовать больше вычислительных мощностей, как следствие, мощнее модели и, теоретически, лучше качество распознавания	Выше нагрузка на сеть, так как нужно передавать поток с камер на сервер
		Сложнее разработка, так как нужно балансировать нагрузку и при этом не терять кадры
		Не все компании готовы использовать облачные сервисы, так как надо передавать свои данные другому лицу
		Не все компании обладают вычислительными мощностями для развертывания системы распознавания и ее поддержки
Агент на АРМ	Оперативное реагирование на инциденты ИБ. Например, можно заблокировать АРМ, когда сработало правило по неверному числу идентификации пользователя	Ограничение по ресурсам. Во многих компаниях, АРМ обладают малым числом ОЗУ и слабыми процессорами. Установка слишком больших моделей может привести к невозможности работать за АРМ и, как следствие, неприменимости данного решения

	<p>Снизить нагрузку на сервер, так как можно отправлять только результаты распознавания и/или отправлять на перепроверку часть кадров, чтобы уменьшит число ложно положительных сработок</p>	<p>Необходимо обеспечить повышенную безопасность решения, так как оно может быть скопировано (например, с использованием обфускации) и/или изменено для обхода СЗИ</p> <p>Ограничение на распознавание одного конкретного человека (владельца АРМ)</p> <p>Высокая вероятность появления артефактов в видео:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Плохая камера на АРМ, которую не заменить; • Блики, плохое освещение и так далее. <p>Если камеру для сервера и/или на микрокомпьютере мы можем легко заменить, переставить в место без засветов, то с АРМ пользователя сложнее, так как контролировать место работы, например, удаленного сотрудника затруднительно</p>
--	--	--

Общий подход к построению системы распознавания лиц

В связи с популярностью данного вида решений, существует некий устоявшийся подход к их реализации. Он представлен на Рисунке 1.

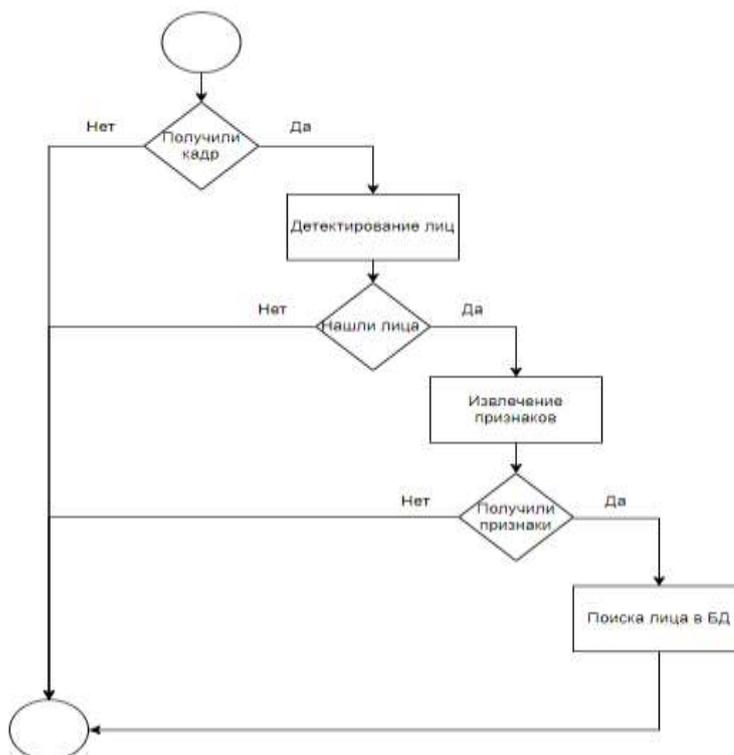


Рисунок 1. - Схема работы системы распознавания

Естественно, что способ реализации может отличаться в зависимости от условий задачи. Например, могут использоваться алгоритмы уменьшения размерности дескрипторов лиц PCA [5], T-SNE [6].

Модели детектирования лиц

Основная задача моделей детектирования лиц, является поиск и выделение лица на переданном изображении. Стоит отметить, что данный тип моделей является подвидом моделей детектирования объектов. Отдельно он выделяется, так как задача по обработке лиц крайне важна во многих решениях и исследованиях.

В работе не рассматривается подробный анализ развития различных моделей детектирования. Однако, для полного понимания можно прочитать специализированные материалы [7]. Также, на Рисунке 2 представлена схема развития детекторов объектов.

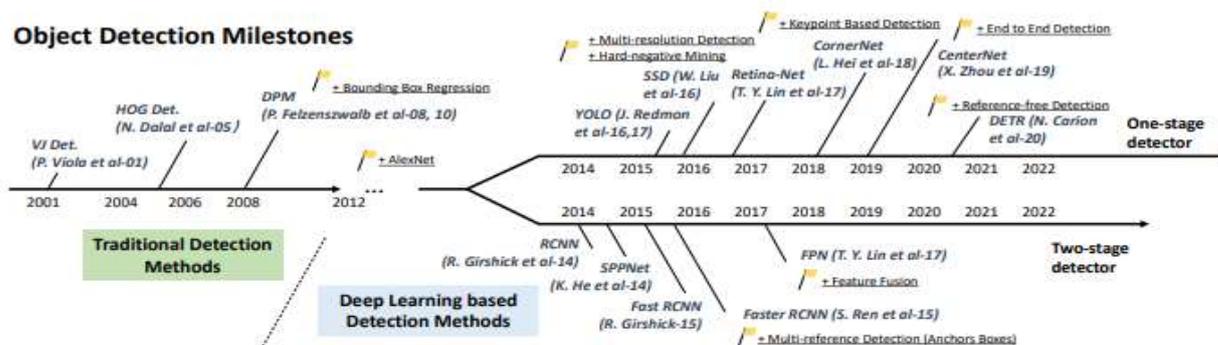


Рисунок 2. - Схема развития моделей детектирования объектов

Выбор же моделей чаще всего можно разделить на ряд этапов:

- Выбор бенчмарка;
- Составление критериев для фильтра моделей;
- Первичная фильтрация;
- Дополнительное тестирование моделей, если не было явного лидера;
- Окончательный выбор моделей.
- При анализе детекторов лиц, был использован такой же процесс.

В качестве бенчмарка был взят датасет WIDER Face (Easy/Medium/Hard) [8]. Метрикой бенчмарка является – средняя точность (AP) (1). Средняя точность – это точность, усредненная по всем значениям полноты между 0 и 1. AP интерпретируется как нахождение площади области ниже кривой точность-полнота [9].

$$AP = \sum_{k=0}^{k=n-1} (R(k) - R(k + 1)) * P(k), (1)$$

где R(k) – полнота в единичный момент времени;

P(k) – точность в единичный момент времени.

Основное отличие метрики AP от mAP, которая чаще используется в работах по детектированию, в том, что для mAP используется дополнительная зависимость по параметру IoU, когда AP зависит только от различий в порогах по уверенности в объекте.

После анализа бенчмарка, были сформированы критерии и произведена первичная фильтрация моделей. Результаты представлен в Таблице 2.

Таблица 2. Список моделей детектирования лиц

Модель	Метрики AP по WIDER Face			Open-source	Размер, Мб	Лицензия
	Easy	Medium	Hard			
YOLOv5n	93.6	91.5	80.5	+	14	GPL-3.0
YOLOv5s	94.3	92.6	83.2	+	54	GPL-3.0
SCRFD-10G	95.2	93.9	83.1	+	15	Apache 2.0
SCRFD-34G	96.1	94.9	85.3	+	38	Apache 2.0
CenterFace	93.2	92.1	87.3	+	8	MIT
YOLOv7-tiny	94.7	92.6	82.1	+	12	GPL-3.0
YOLOv7s	94.8	93.1	85.2	+	8	GPL-3.0

Так как явно определить лидера среди моделей сложно, было проведено дополнительное тестирования на собранном из открытых источников фото людей с различными артефактами на изображениях в офисном домене. Всего было собрано 69 фото, так как основная задача проверить производительность решения из-за высоких показателей качества на бенчмарке среди претендентов.

Ход тестирования представлен на Рисунке 3.

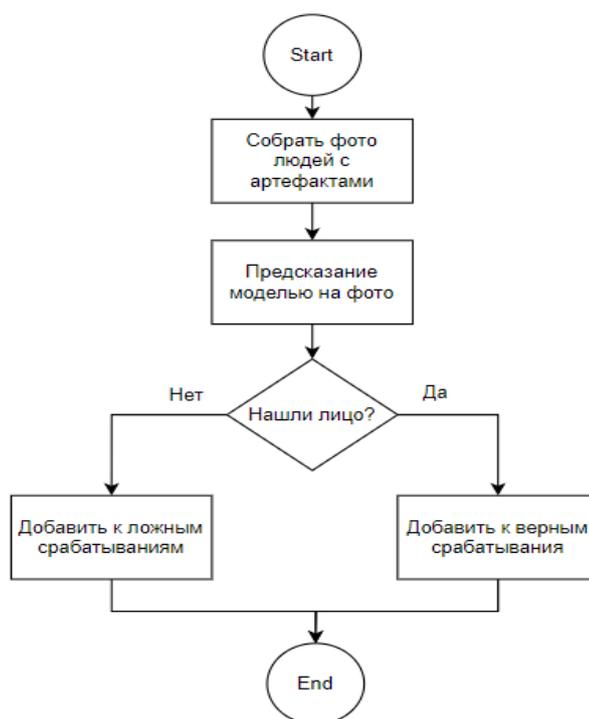


Рисунок 3. - Процесс тестирования модели детектирования лиц

Метрики производительности и числа верных предсказания на тестовом датасете представлены в Таблице 3.

Таблица 3 – Результаты тестов на собранном датасете

Модель	Время среднее, сек.	Доля верных предсказаний, %
SCRFD-10G	0.096	100
SCRFD-34G	0.528	100
CenterFace	0.063	100
YOLOv7-tiny	0.165	100
YOLOv7s	0.240	99

Исходя из анализа таблиц с метриками, был сделан выбор в пользу модели CenterFace [10].

Модель распознавания лиц

Процесс выбора модели распознавания схож с тем, что был описан при выборе детектора лиц. В качестве бенчмарка был взят датасет LFW [11]. Причина в том, что его часто используют для валидации моделей распознавания и как следствие будет получен более полный анализ решений. Однако, при первичном анализе можно заметить, что метрики у данного бенчмарка крайне высокий и делать однозначный выбор на их основе будет затруднительно. В связи с этим был взят датасет из открытых источников [12], он состоит из фото 18 знаменитостей, каждого из которых по 100 штук.

В результате первичного анализа и фильтрации, были выбраны модели распознавания в Таблице 4.

Таблица 4. - Модели распознавания и метрики точности для изолированного устройства

Модель	Точность на LFW	Размер, Мб
AdaFace R-18	0.9953	494
AdaFace R-50	0.9982	668
FaceTransformer Octuplet Loss	0.9973	266
FaceNet	0.9905	111

Перед дополнительным тестированием на датасете было проведено небольшое улучшение алгоритма обработки и детектирования лиц. Данный подход позволяет изменить плоскость лица и привести ее к плоскости рамки лица при детектировании. Пример такого преобразования на Рисунке 4.

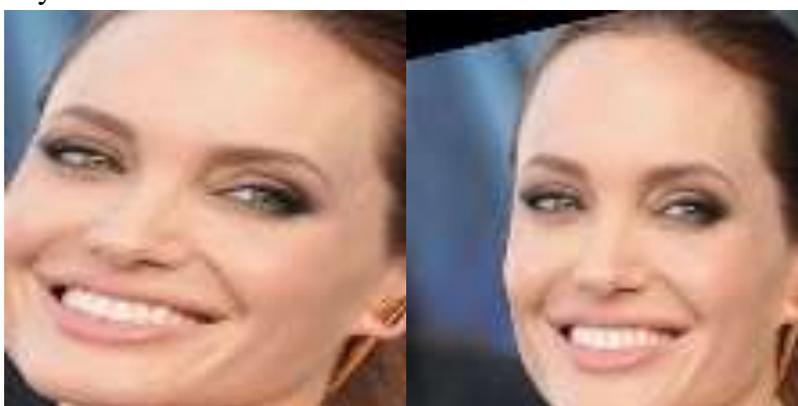


Рисунок 4. -Трансформация лица

Сам процесс тестирования представлен на Рисунке 5:

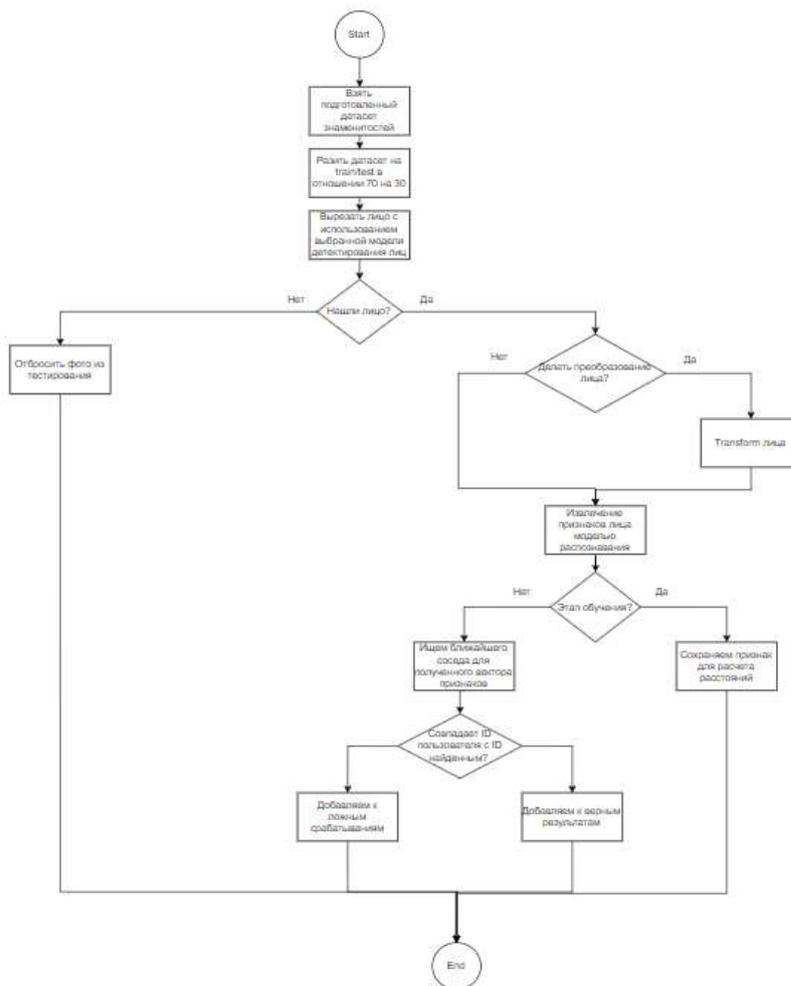


Рисунок 5. - Процесс тестирования

Результаты тестирования в Таблице 5.

Таблица 5. - Результаты тестов на датасете с Kaggle

Модель	Время получения дескриптора, мс		Доля верных предсказаний, % от общего числа фото	
	Без align	С align	Без align	С align
AdaFace R-18	63	65	95	98
AdaFace R-50	124	126	94	98
FaceTransformer Octuplet Loss	162	164	92	99
FaceNet	65	67	99	99

В итоге, была выбрана модель FaceNet [13]. Она обладает лучшей точностью на тестовом датасете и минимальным размером, среди других вариантов.

Также, важный момент при работе с моделями распознавания лиц – найти пороговое значения расстояния между дескрипторами после которого их нельзя сопоставить. Процесс нахождения данного порога одинаков для многих моделей распознавания:

1. Определяем начальное значение порога по расстоянию между векторами. Обычно 0.01;
2. Считаем долю верных предсказания при распознавании;
3. Фиксируем результат качества предсказаний;
4. Увеличиваем порог.

В результате такого итеративного подхода, будет получено пороговое значение, которое дает лучшие показатели качества. В работе использовался такой же алгоритм на тестовом датасете, что позволило получить значение 0.89. Это значит, что если расстояние между дескрипторами больше этого порога, то пользователь неизвестен.

Система хранения дескрипторов лиц

При реализации системы распознавания можно выделить два основных подхода к хранению дескрипторов лиц пользователей:

- Хранение в состояниях самого приложения – вектора можно сохранять в глобальные переменные, а при ошибке записывать в файл;
- Хранение в базе данных – вектора можно хранить в специализированных базах данных/векторных библиотеках.

В Таблице 6 приведено сравнение преимуществ и недостатков этих вариантов.

Таблица 6. - Преимущества и недостатки способов хранения векторов

Способ	Преимущества	Недостатки
В состояниях приложения	Отсутствие дополнительной зависимости	Сложность разработки
	Не тратится время на изучение нового инструмента	Высока вероятность ошибки
	Больше гибкости в реализации	Высока вероятность использования неоптимального решения
В специализированных хранилищах	Основной функционал уже реализован	Дополнительная зависимость
	Быстрая интеграция в систему	

Из анализа таблицы видно, что хранение в уже готовых вариантах стабильнее и их проще интегрировать в систему. В связи с этим, был сделан выбор именно в пользу такого подхода.

Стоит отметить, что популярность хранения векторов с каждым годом все растет, в основном из-за популярности LLM, которые также используют вектора. Основные варианты специализированных хранилищ представлены на Рисунке 6:



Рисунок 6 – Специализированные хранилища векторов

Как видно, их достаточно большое количество, однако, варианты кроме векторных библиотек не подходят для развертывания на микрокомпьютере, так как будут потреблять слишком много ресурсов, в которых ограничено данное устройство.

В результате, был сформирован ряд критериев для векторных библиотек, результаты анализа по которым представлены в Таблице 7.

Таблица 7 – Оценки по критериям 1-5

База данных	Хранение в ОЗУ	Мета информация	Поиск соседей	Open-source	Устанавливается пакетом
Qsgngt	+	-	+	+	+
Glass	+	-	+	+	+
Scann	+	-	+	+	+
Faiss	+	+	+	+	+
Vespa	+	+	+	+	-
Milvus	+	-	+	-	-
N2	+	-	+	+	+
NGT	+	-	+	+	+
Pynndescent	+	-	+	+	+
Vearch	+	+	+	+	-

Из анализа таблицы можно сделать вывод, что лучшим вариантом будет использование Faiss [14]. Сама библиотека предоставляет большой набор различных индексов и способов хранения векторов, которые позволят оптимизировать поиск ближайших соседей.

Результаты

После выбора моделей детектирования и распознавания лиц, а также, способа хранения дескрипторов, было разработано решение, которое разворачивалось на микрокомпьютере Khadas VIM4 [15]. Это достаточно мощная плата с 8 Гб ОЗУ. Отмечу, что выбор оборудования не являлся целью работы, из-за этого использовался вариант, который точно сможет поддерживать систему распознавания. Однако, в рамках работы одним из моментов было уменьшение моделей, чтобы можно было использовать менее мощное решение, что позволит сэкономить средства.

Процесс работы системы распознавания на изолированном устройстве представлен на Рисунке 7:

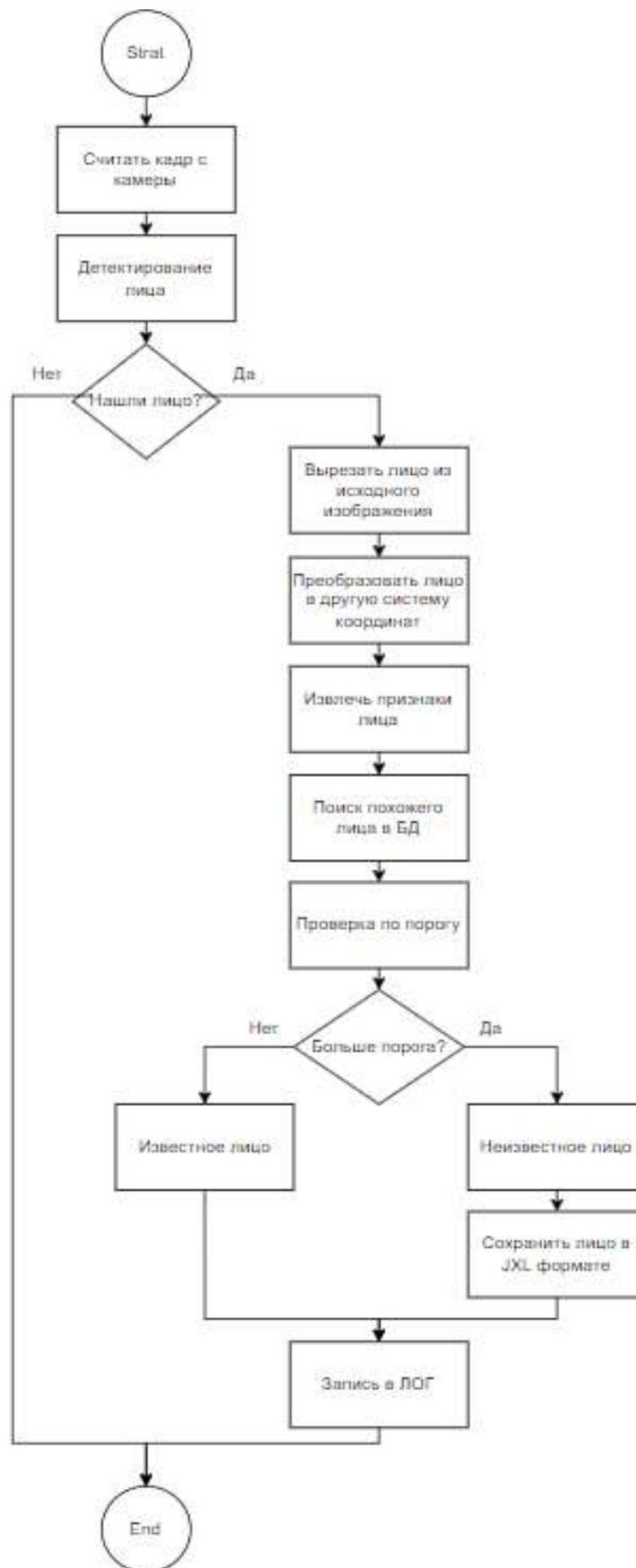


Рисунок 7 – Процесс работы системы распознавания лиц на изолированном устройстве

Единственный момент, который не был описан ранее – использование формата JXL для хранения фото пользователей, которые не прошли идентификацию. Данный формат позволяет сжимать размер изображения примерно в 2 раза без сильной потери качества [16].

После развертывания на микрокомпьютере были проведены повторные тесты качества распознавания, производительности и потребляемых ресурсов. Результаты представлены в Таблице 8.

Таблица 8. - Результат тестирования

Качество распознавания	Потребляемая память, МБ	Время работы, сек
99%	610	0.685

Вывод

В ходе работы была разработана и развернута системы распознавания лиц на микрокомпьютере для работы в изолированном контуре.

- Для реализации были проведены дополнительные исследования таких решений как:
- Модель детектирования лиц;
- Модель распознавания лиц;
- Системы хранения векторов.

При выборе модели детектирования лиц была проведена оценка производительности и дополнительное тестирование на собранном отдельно датасете, что позволило полноценно сопоставить результаты с сформированными критериями, в результате которых, был сделан выбор в пользу модели CenterFace, так как она имеет лучшую производительность среди рассмотренных вариантов, 0.063 секунды на кадр, и не уступает остальным по качеству детектирования лиц, 100 % на тестовом наборе данных.

Аналогичное тестирование было проведено для моделей распознавания лиц, однако, датасет был взят из открытых источников. Для реализации изолированного устройства была выбрана модель FaceNet из-за наилучшей метрики качества распознавания, 99% верных идентификаций, среди остальных решений и средней производительности 0.067 секунд на кадр.

Как было определено в работе, неотъемлемой частью системы распознавания является – система хранения векторов. Различные варианты хранения были рассмотрены в рамках исследования, выделены их плюсы и минусы, и сделано заключение о применимости для текущей реализации.

В результате, были получены решения, которые достигают поставленных в работе целей. Для изолированного устройства – точность распознавания выше 95%.

Список литературы

1. Системы распознавания лиц // TAdviser URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F:%D0%A1%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D1%8B_%D1%80%D0%B0%D1%81%D0%BF%D0%BE%D0%B7%D0%BD%D0%B0%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%8F_%D0%BB%D0%B8%D1%86_\(Facial_recognition\)](https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F:%D0%A1%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D1%8B_%D1%80%D0%B0%D1%81%D0%BF%D0%BE%D0%B7%D0%BD%D0%B0%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%8F_%D0%BB%D0%B8%D1%86_(Facial_recognition)).
2. Более 60 российских регионов внедрили систему распознавания лиц // Газета.ru URL: <https://www.gazeta.ru/tech/news/2023/10/24/21563059.shtml?updated>.

3. Что такое распознавание лиц – определение и описание // Kaspersky URL: <https://www.kaspersky.ru/resource-center/definitions/what-is-facial-recognition>.
4. Что такое распознавание лиц – определение и описание // Kaspersky URL: <https://www.kaspersky.ru/resource-center/definitions/what-is-facial-recognition>.
5. A Tutorial on Principal Component Analysis // CMU School of Computer Science URL: <https://www.cs.cmu.edu/~elaw/papers/pca.pdf>
6. T. Tony Cai, Rong Ma. Theoretical Foundations of t-SNE for Visualizing High-Dimensional Clustered Data // Journal of Machine Learning Research. – 2022. – Vol. 23, No. 301. – P. 1-54.
7. Lohia, Aditya; Kadam, Kalyani Dhananjay; Joshi, Rahul Raghvendra; and Bongale, Dr. Anupkumar M. Bibliometric Analysis of One-stage and Two-stage Object Detection // Library Philosophy and Practice. – 2021. – Vol. 4910.
8. WIDER FACE: A Face Detection Benchmark // Shuo Yang URL: <https://shuoyang1213.me/WIDERFACE/support/paper.pdf>.
9. Как работает инструмент вычислить точность для выявления объектов // ArcGIS Pro URL: <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/3.0/tool-reference/image-analyst/how-compute-accuracy-for-object-detection-works.html>
10. Wan Yan, Genke Yang, Jiliang Luo, Tao Li, and Jianan He CenterFace. Joint Face Detection and Alignment Using Face as Point // Scientific Programming Towards a Smart World. – 2020. – Vol. 2020.
11. Labeled Faces in the Wild // University of Massachusetts URL: <https://vis-www.cs.umass.edu/lfw/>.
12. Celebrity Face Image Dataset // Kaggle URL: <https://www.kaggle.com/datasets/vishesh1412/celebrity-face-image-dataset>.
13. FaceNet: A Unified Embedding for Face Recognition and Clustering // arXiv URL: <https://arxiv.org/abs/1503.03832>.
14. The Faiss library // arXiv URL: <https://arxiv.org/abs/2401.08281>.
15. KHADAS VIM4 // KHADAS URL: <https://www.khadas.com/vim4>.
16. Overview of JPEG XL // JPEG URL: <https://jpeg.org/jpegxl/index.html>.

References

1. Face recognition systems // TAdviser URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F:%D0%A1%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D1%8B_%D1%80%D0%B0%D1%81%D0%BF%D0%BE%D0%B7%D0%BD%D0%B0%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%8F_%D0%BB%D0%B8%D1%86_\(Facial_recognition\)](https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F:%D0%A1%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D1%8B_%D1%80%D0%B0%D1%81%D0%BF%D0%BE%D0%B7%D0%BD%D0%B0%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%8F_%D0%BB%D0%B8%D1%86_(Facial_recognition)).
2. More than 60 Russian regions have implemented a facial recognition system // Газета.ги URL: <https://www.gazeta.ru/tech/news/2023/10/24/21563059.shtml?updated> .
3. What is face recognition – definition and description // Kaspersky URL: <https://www.kaspersky.ru/resource-center/definitions/what-is-facial-recognition> .
4. What is face recognition – definition and description // Kaspersky URL: <https://www.kaspersky.ru/resource-center/definitions/what-is-facial-recognition> .
5. A Tutorial on Principal Component Analysis // CMU School of Computer Science URL: <https://www.cs.cmu.edu/~elaw/papers/pca.pdf>

6. T. Tony Cai, Rong Ma. Theoretical Foundations of t-SNE for Visualizing High-Dimensional Clustered Data // Journal of Machine Learning Research. – 2022. – Vol. 23, No. 301. – p. 1-54.
 7. Lohia, Aditya; Kadam, Kalyani Dhananjay; Joshi, Rahul Raghvendra; and Bongale, Dr. Anupkumar M. Bibliometric Analysis of One-stage and Two-stage Object Detection // Library Philosophy and Practice. – 2021. – Vol. 4910.
 8. WIDER FACE: A Face Detection Benchmark // Shuo Yang URL: <https://shuoyang1213.me/WIDERFACE/support/paper.pdf>.
 9. How the calculate accuracy tool works to identify objects // ArcGIS Pro URL: <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/3.0/tool-reference/image-analyst/how-compute-accuracy-for-object-detection-works.html>
 10. Wan Yan, Genke Yang, Jiliang Luo, Tao Li, and Jianan He CenterFace. Joint Face Detection and Alignment Using Face as Point // Scientific Programming Towards a Smart World. – 2020. – Vol. 2020.
 11. Labeled Faces in the Wild // University of Massachusetts URL: <https://vis-www.cs.umass.edu/lfw/>.
 12. Celebrity Face Image Dataset // Kaggle URL: <https://www.kaggle.com/datasets/vishesh1412/celebrity-face-image-dataset>.
 13. FaceNet: A Unified Embedding for Face Recognition and Clustering // arXiv URL: <https://arxiv.org/abs/1503.03832>.
 14. The Faiss library // arXiv URL: <https://arxiv.org/abs/2401.08281>.
 15. KHADAS VIM4 // KHADAS URL: <https://www.khadas.com/vim4>.
 16. Overview of JPEG XL // JPEG URL: <https://jpeg.org/jpegxl/index.html>.
-