

Разработка интеллектуальной системы для распознавания лиц на основе нейронных сетей

Е.Е. Истратова, Д.Н. Достовалов, Е.А. Бухамер

Аннотация— Системы идентификации личности нашли широкое применение в повседневной жизни. Существует множество методов для выделения лиц на исходном изображении, наиболее перспективным из которых является применение алгоритмов на основе нейронных сетей. Целью исследования являлось проектирование и тестирование интеллектуальной системы для распознавания лиц на основе данной технологии. В ходе предварительного анализа методов машинного обучения для решения поставленной задачи было установлено, что наиболее целесообразно использовать методы машинного обучения, основанные на анализе микродвижений лица с последующим построением карты точек. На основе полученных данных была выполнена разработка системы идентификации лиц с использованием технологии компьютерного зрения, в основе которой был заложен метод создания сложных архитектур с использованием различных признаков с дополнительными алгоритмами. Отличительной особенностью разработанной интеллектуальной системы является возможность анализа нескольких кадров, подтверждающих микродвижения головой или моргание. В результате тестирования полученной системы с помощью алгоритма градиентного бустинга деревьев регрессии была получена карта из 68 точек лица, на основании которой осуществлялась идентификация человеческих лиц с объектами из базы данных.

Ключевые слова— интеллектуальная система, нейронные сети, распознавание лиц, микродвижения лица, компьютерное зрение, видеопоток, видеонаблюдение, координаты лица.

I. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день технологии компьютерного зрения используются во многих сферах человеческой деятельности. Причем наиболее активно данный инструмент применяется в сфере обеспечения безопасности. Однако, помимо биометрической идентификации, компьютерное зрение также используется для распознавания эмоций. В области маркетинга распознавание эмоций человека является приоритетным направлением, поскольку позволяет получить обратную связь, в том числе без активного участия со стороны пользователя, что позволяет снизить агрессивное воздействие на потенциального потребителя товаров и услуг.

II. АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ И РАСПОЗНАВАНИЯ ЛИЦ

Анализ источников литературы в сфере современных подходов к процессу распознавания эмоций и лиц позволил выделить отдельные направления исследований в данной области. Так, часть литературных источников посвящена вопросам проектирования систем искусственного интеллекта. Задачами исследования [1] являлись поиск и определение человеческого лица в качестве слабоконтрастного объекта на основе систем кибернетического зрения. В публикациях [2,3,4] рассмотрена задача разработки и внедрения системы искусственного интеллекта в области образования, приведены результаты использования сенсорного электронного устройства с видеонаблюдением и распознаванием образов с последующим сбором статистических данных. В работе [5] предложена автоматическая система обнаружения лиц на основе сверхточной нейронной сети, которая может быть использована в машинном обучении, в автоматических системах распознавания лиц, речи и элементов жестовых языков. В статье [6] предлагаются методы построения платформ прототипирования высокопроизводительных систем, приводятся результаты работы алгоритмов компьютерного зрения с использованием нейросетевых технологий.

В ряде других литературных источников акцент перемещен на методики распознавания и их математическую оценку. В исследовании [7] проанализированы разнообразные методы распознавания лиц и эмоций, приведены принципы и особенности их работы, указаны преимущества и недостатки, влияющие на эффективность процесса распознавания. В работе [8] был описан метод термографического распознавания лиц, а также предложен комбинированный принцип распознавания лиц в видимом и инфракрасном диапазоне. В статье [9] рассматриваются актуальные методы и этапы, выполняемые программным обеспечением для идентификации человеческих лиц в видео потоке. В исследовании [10] приводится способ применения алгоритма поиска лиц на изображении с использованием каскадов Хаара вместо алгоритма встроенного в библиотеку dlib, что позволяет сократить процесс поиска в пятнадцать раз. На основе использования нейронных сетей в источнике [11] дается описание методов обучения нейронной сети на примере загруженной выборки, и приводятся результаты анализа эмоциональной реакции от предложенной рекламы в зависимости от пола и возраста.

□Статья получена 2 февраля 2021.

Е.Е. Истратова ФГБОУ ВПО НГТУ (e-mail: istratova@mail.ru)

Д.Н. Достовалов ФГБОУ ВПО НГТУ (e-mail: dostovalov.dmitr@mail.ru)

Е.А. Бухамер ФГБОУ ВПО НГТУ (e-mail: bukhamer.egor92@yandex.ru)

В других исследованиях представлены результаты разработки специального программного обеспечения, позволяющего изучить изображение объекта и сопоставить его с уже имеющимся в базе данных. Все изученные публикации подтверждают актуальность рассматриваемой тематики, а также необходимость структурирования и обработки собираемых массивов данных. В статье [12] приводится описание программно-аппаратного решения на основе технологии создания умных камер для семантического анализа изображений. Предлагаемое решение планируется использовать для анализа эмоционального состояния людей в общественных местах. Исследование [13] посвящено способам реализации функции распознавания лиц, принципам разработки информационной системы для обеспечения безопасности. В статье [14] приведены результаты разработки программного обеспечения для обнаружения и распознавания лиц на базе применения каскадов Хаара. Основными достоинствами предлагаемого программного продукта являются его низкая стоимость и возможность масштабируемости за счет увеличения количества подключенных видеокамер. В публикации [15] описана реализация системы распознавания лиц, применяемая для повышения надежности систем контроля и управления доступом. Разработка выполнена на языке программирования Python с помощью библиотеки `face_recognition`, также приведены результаты тестирования и оценки готовой системы. Ряд исследований [16,17] охватывает вопросы проектирования программных продуктов, основанных на идентификации человека по лицу и используемых для учета посещения общественных мест.

В настоящее время применяется достаточно большое количество методик по распознаванию лиц и эмоций, из которых наиболее распространенными и зарекомендовавшими себя являются следующие:

- активные модели внешнего вида;
- опорные векторы;
- информация о текстуре;
- локальные бинарные шаблоны;
- ключевые точки;
- нейронные сети.

Техническая реализация процессов сбора и обработки статистических данных для дальнейшего распознавания эмоций может быть решена двумя основными способами. В качестве первого метода применяется установленное на сервере специальное программное обеспечение. При этом оборудование для видеонаблюдения используется только с целью формирования видеопотока, настраивается и управляется удаленно. Второй метод распознавания эмоций реализуется за счет установки программно-аппаратных комплексов, уже содержащих встроенные механизмы анализа данных, расположенные либо на видеорегистраторе, либо на видеокамере [18,19].

Комбинированный подход, включающий достоинства и незначительные недостатки распространенных методов, незначительно влияющие на результаты распознавания,

на сегодняшний день является наиболее перспективным. В результате, он был положен в основу модели интеллектуальной системы для идентификации человеческих лиц при помощи компьютерного зрения. Целью статьи являлось проектирование интеллектуальной системы для распознавания лиц на основе технологии компьютерного зрения. потребителя товаров и услуг.

III. ВЫБОР МЕТОДА МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

В задачах компьютерного зрения лучшие результаты неизменно показывают алгоритмы машинного обучения, основанные на глубоких нейронных сетях, демонстрируя при этом более точные результаты при решении задач классификации по сравнению с возможностями человека.

Чтобы распознать лицо, необходимо произвести определение местоположения объекта заранее заданного класса, определить его координаты. Задачу определения местоположения объекта в кадре можно назвать «детектированием».

Существует множество подходов к детектированию лица, каждый из которых отражается в архитектуре нейронной сети. Некоторые архитектуры, такие как, например, Faster R-CNN, включают две нейросети. Одна из них предсказывает регион интереса объектов на изображении, в котором, скорее всего, будет лицо, а другая нейронная сеть является классификатором и определяет, что внутри региона присутствует объект нужного класса. В проведенном исследовании данная архитектура была переработана и улучшена.

Чтобы реализовать алгоритм распознавания лиц, который был бы устойчивым к попыткам злоумышленников воспользоваться несовершенством системы аутентификации и подменить свои биометрические данные, выдав себя за другого человека, необходимо проанализировать все доступные алгоритмы. В настоящее время существует множество способов обмануть алгоритм распознавания, например, предъявить вместо своего лица распечатанную цветную фотографию или изображение лица другого человека на дисплее мобильного устройства, телефона или планшета.

На данный момент область исследования в рамках компьютерного зрения, занимающаяся решением проблем неустойчивости алгоритмов к обману, называется *face anti-spoofing*. Попытка обмана системы называется *spoofing attack*, а комплекс защитных мер против такого рода атак, реализованный в алгоритме распознавания, называется *anti-spoofing*.

Одним из распространенных методов борьбы со *spoofing attack* является анализ нескольких кадров видеопотока на предмет наличия движений: повороты, моргания, мимика лица. Пользователю может быть предложено совершить случайный набор действий, а затем последовательность действий анализируется, заранее подготовиться к ней злоумышленнику непросто, что увеличивает устойчивость системы.

При печати картинки или демонстрации фотографии на дисплее в кадре возможно обнаружить особенности ухудшения качества изображения, локальные паттерны. Таким образом, в общем виде алгоритм сводится к расчету интенсивностей пикселей, затем последовательно берется каждый пиксель изображения и восемь его соседей, после чего сравнивается их интенсивность. По полученным последовательностям строится попиксельная гистограмма, которая подается на вход SVM (support vector machine) - классификатора.

Помимо классических подходов машинного обучения, существует крупная область anti-spoofing подходов, в которой используются нейронные сети. Решение проблемы распознавания лиц может быть решено путем ансамблирования нейросетей или создания сложных архитектур с использованием различных признаков с дополнительными алгоритмами. При этом получают достаточно убедительные результаты с высокой точностью.

Одной из разновидностей данного подхода является анализ микродвижений лица, в результате которого можно определить повороты и смещения головы, что приводит к изменению углов относительных расстояний между признаками на карте лица. При смещении лица по горизонтали угол между носом и ухом увеличивается, что можно зафиксировать. А если на вход алгоритму распознавания будет подано поддельное изображение или фотография, то при повороте мобильного устройства, углы изменяться практически не будут.

Таким образом, для идентификации лиц целесообразно использовать методы машинного обучения, основанные на анализе микродвижений лица с последующим построением карты точек.

IV. РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ЛИЦ

Техническая реализация процессов сбора и обработки статистических данных в системе для дальнейшего распознавания лиц была решена следующим образом. В качестве основного звена было применено установленное на сервере специальное программное обеспечение. При этом оборудование для видеонаблюдения использовалось только с целью формирования видеопотока, настраивалось и управлялось удаленно. В качестве ядра проектируемой информационной системы был использован инструмент для глубокого обучения TensorFlow, обладающий достаточным функционалом для решения необходимых задач компьютерного зрения.

Для испытания разработанной интеллектуальной системы использовался одноплатный компьютер Jetson Nano и USB веб-камеры Logitech HD Webcam моделей C310 и C525, а также Logitech Brio. Освещение помещений в зоне испытаний осуществлялось при помощи люминесцентных ламп. Эксплуатационная освещенность помещений составляла не менее 200 лк в

соответствии с ГОСТ Р 55710-2013 «Освещение рабочих мест внутри зданий». Для работы с декодирование видеопотока использовалась библиотека языка Python – OpenCV.

В качестве базы данных пользователей в исследовании была применена объектно-реляционная система управления базами данных с открытым исходным кодом PostgreSQL. В базу данных были записаны предоставленные пользователями данные и векторы, описывающие их лица, а также данные о камерах и потоках видео.

В ходе проведения исследования было выполнено предварительное обучение моделей нейронных сетей. Для обучения модели детектора с архитектурой MobileNetV2 использовался набор данных Open Images V4. Для обучения модели детектора с архитектурой ResNet34 использовались наборы данных FaceScrub, VGG-Face. Обучение модели в обоих случаях производилось при помощи библиотеки машинного обучения Tensorflow, в качестве вспомогательных библиотек использовались numpy, OpenCV.

После осуществления обучения моделей нейронных сетей, выполняется анализ результатов их работы. Первым этапом анализа работы системы после декодирования видеопотока является детектирование объекта, то есть лица. Для решения данной задачи была применена нейронная сеть с архитектурой MobilenetV2. В качестве входных данных использовался тензор изображения 640x480x3, где первое значение — это ширина, второе — высота, третье - число цветовых каналов (RGB). Размер тензора был ниже размера кадра камеры для увеличения скорости работы детектора. На выходе нейронной сети были получены координаты объекта (лица) на изображении и вероятность его нахождения в этих координатах.

Для дальнейшей работы системы были отобраны координаты объектов с вероятностью более 70%, что позволило отбросить ложные обнаружения объектов (лиц). Далее осуществлялась проверка занимаемой лицом площади кадра по отношению ко всей его площади. Данная величина не должна быть меньше 12-15 %, что позволяет исключить из дальнейшей обработки изображения лиц далеко стоящих объектов. В качестве объекта идентификации выбиралось лицо, занимающее наибольшую площадь кадра.

Параллельно производилось декодирование объекта (лица) с помощью нейронной сети с архитектурой ResNet34. На выходе были получены векторы, описывающие лица размерностью 128. После захвата данных производится расчет евклидова расстояния между векторами: полученными в ходе исследования и собранными ранее из предоставленных фотографий объекта идентификации. При расстоянии, меньше порогового, считается, что объект в кадре и объект на ранее предоставленных фото – один и тот же человек.

Только при соответствии всех кадров условиям идентификации происходит срабатывание системы распознавания. Для повышения точности распознавания

системы и исключения ложных срабатываний подобное сопоставление осуществляется около 10-20 раз.

Анализ микродвижений предполагает, что объект в процессе распознавания лица совершит микродвижение, например, поворот головы. С помощью алгоритма градиентного бустинга деревьев регрессии была получена карта, состоящая из 68 точек лица, то есть лицевых ориентиров. На основании полученных данных был определен угол между крайними боковыми точками лица и серединной точкой, при поворотах головы изменения значений данного угла варьировались в пределах до 120 градусов, в то время, как в стандартном положении этот показатель составляет около 70 градусов. Таким образом, было установлено, что возможно настроить угол и получить точные координаты лица, что позволяет определить угол поворота лица по отношению к камере интеллектуальной системы.

Для предотвращения возможности обмана системы путем подмены объекта исследования (лица человека) статичным изображением, например, фотографией, интеллектуальная система учитывает моргание. Для этого из карты опорных точек лица – лицевых ориентиров, анализируются точки по периметру глаз. При моргании в зоне, расположенной внутри линии данных точек, изменяется средний цвет пикселей. Это свидетельствует о динамичном характере изображения.

В. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате была разработана интеллектуальная система для идентификации лиц, основанная на анализе микродвижений лица с построением карты точек. Отличительной особенностью разработанной интеллектуальной системы является то, что в процессе распознавания лица анализируются несколько кадров, подтверждающих микродвижения головой или моргание, причем каждое движение определяется соответствующим коэффициентом. Если значение суммы коэффициентов достигает определенной величины, то интеллектуальная система исключает факт подмены объекта (лица) и увеличивает значение счетчика, тем самым набирая статистику.

БИБЛИОГРАФИЯ

[1] Ванжа Т. В. Статистический анализ современных методов распознавания лиц и эмоций // Информатика и кибернетика. - №2 (16). - 2019. - С. 64-70. - <https://elibrary.ru/item.asp?id=41142230>.

[2] Леонтьев А. В. Российское программно-аппаратное решение распознавания эмоционального состояния людей для интеллектуальных экосистем / А.В. Леонтьев, А.В. Шершаков, Е.С. Янакова // Наноиндустрия. - S96-1. - 2020. - С. 125-128. - <https://elibrary.ru/item.asp?id=43004721>.

[3] Гречаный С. А. Распознавание лиц в современных системах видеонаблюдения на примере оборудования ТМ / С.А. Гречаный, Н.Ю. Федина, М.В. Храмыков // Охрана, безопасность, связь. №5-1. - 2020. - С. 63-68. - <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43050522&>.

[4] Останина Е. А. О некоторых аспектах технологии распознавания лиц // Человеческий капитал. - №5 (137). - 2020. - С. 142-152. - <https://elibrary.ru/item.asp?id=42661637>.

[5] Тагиров Т. Р. Система учета контроля посещения помещений // Молодежный вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. - №2 (23). - 2020. - С. 124-126. - <https://elibrary.ru/item.asp?id=42965587>.

[6] Катгис П. Г. Обработка изображений в системах распознавания лиц // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: естественные и технические науки. - №1. - 2020. - С. 92-95. - <https://elibrary.ru/item.asp?id=42632331>.

[7] Кряжев А. С. Исследование возможностей реализации модуля распознавания лиц для систем контроля и управления доступом. Материалы IV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Фундаментальные и прикладные исследования молодых ученых". - 2020. - С. 356-360. - <https://elibrary.ru/item.asp?id=42731597>.

[8] Родишев Д. Д. Использование технологий идентификации человека по лицу для учета посещения учебных заведений. - Материалы 27-й Региональной научной студенческой конференции "Интеллектуальный потенциал Сибири". - 2019. - С. 69-70. - <https://elibrary.ru/item.asp?id=41410656>.

[9] Ерсултанова З. П. Интеллектуальная информационная система в образовании. - Материалы VIII Международной научно-практической конференции "Современные тенденции естественно-математического образования: школа - вуз". - 2019. - С. 49-52. - <https://elibrary.ru/item.asp?id=37273922>.

[10] Рудешко Н. А. Интеллектуальная система распознавания лиц школьников / Н.А. Рудешко, Ю.В. Дубенко. - Материалы VIII Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов "Проблемы автоматизации. региональное управление. связь и автоматика (Паруса-2019)". - 2019. - С. 271-276. - <https://elibrary.ru/item.asp?id=41879198>.

[11] Айтбенова А. А. Интеллектуальная информационная система в образовании / А.А. Айтбенова, Г.Б. Даулетбаева // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. - №1. - 2019. - С. 30-35. - <https://elibrary.ru/item.asp?id=41602667>.

[12] Филиппенко В. А. Обзор методов распознавания лиц в видеопотоке. Сборник научных статей 4-й международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых "Наука молодых - будущее России". - 2019. - С. 188-191. - <https://elibrary.ru/item.asp?id=41703985>.

[13] Рюмин Д. А. Автоматическое обнаружение лиц для человеко-машинного взаимодействия / Д.А. Рюмин, А.А. Аксёнов, А.А. Карпов. Материалы XLVIII научной и учебно-методической конференции Университета ИТМО. - 2019. - с. 33-37. - <https://elibrary.ru/item.asp?id=42151824>.

[14] Катин О. И. Исследование способов повышения быстродействия системы распознавания лиц / О.И. Катин, К.И. Горянина, Д.Ю. Донской // Научное обозрение. педагогические науки. - №3-3. - 2019. - С. 45-47. - <https://elibrary.ru/item.asp?id=38506301>.

[15] Барашко Е. Н. Новые системы поиска и распознавания лиц / Е.Н. Барашко, К.Д. Кружилин // Общество. - №2 (13). - 2019. - С. 21-23. - <https://elibrary.ru/item.asp?id=39131066>.

[16] Вай Ян Мин. Применение статистической обработки данных для повышения эффективности распознавания лиц с помощью метода главных компонент / Вай Ян Мин, Ю.П. Лисовец, Тхет Наинг Вин // Электронные информационные системы. - №2 (21). - 2019. - С. 33-42. - <https://elibrary.ru/item.asp?id=38566109>.

[17] Martins P. Gradient Shape Model / P. Martins, J.F. Henriques, J. Batista // Int J Comput Vis 128, 2828-2848 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11263-020-01341-y>.

[18] Cevikalp N. Video Based Face Recognition by Using Discriminatively Learned Convex Models / N. Cevikalp, G.G. Dordinejad // Int J Comput Vis 128, 3000-3014 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11263-020-01356-5>.

[19] Nakane T. Application of evolutionary and swarm optimization in computer vision: a literature survey / T. Nakane, N. Bold, H. Sun // IPSJ T Comput Vis Appl 12, 3 (2020). <https://doi.org/10.1186/s41074-020-00065-9>.

Development of an intelligent system for face recognition based on neural networks

E.E. Istratova, D.N. Dostovalov, E.A. Bukhamer

Abstract— Personal identification systems are widely used in everyday life. There are many methods for extracting faces in the original image, the most perspective of which is the usage of algorithms based on neural networks. The aim of the study was to design and test an intelligent system for face recognition based on this technology. In the course of a preliminary analysis of machine learning methods for solving the problem, it was found that it is most appropriate to use machine learning methods based on the analysis of facial micromotions with the subsequent construction of a map of points. Based on the data obtained, the development of a face identification system using computer vision technology was carried out, which was based on the method of creating complex architectures using various features with additional algorithms. A distinctive feature of the developed intelligent system is the ability to analyze several frames that confirm micromovements of the head or blinking. As a result of testing the resulting system using the algorithm of gradient boosting of regression trees, a map of 68 face points was obtained, on the basis of which human faces were identified with objects from the database.

Keywords— intelligent system, neural networks, face recognition, facial micromovements, computer vision, video stream, video surveillance, face coordinates.

REFERENCES

- [1] Vanzha T.V. Statistical analysis of modern methods of recognition of faces and emotions // Informatics and Cybernetics. - № 2 (16). - 2019. - P. 64-70. - <https://elibrary.ru/item.asp?id=41142230>.
- [2] Leontiev A.V. Russian software and hardware solution for recognizing the emotional state of people for intelligent ecosystems. A.V. Leontiev, A.V. Shershakov, E.S. Yanakova // Nanoindustry. - S96-1. - 2020. - P. 125-128. - <https://elibrary.ru/item.asp?id=43004721>.
- [3] Grechany S.A. Face recognition in modern video surveillance systems using the example of TM equipment / S.A. Grechany, N.Yu. Fedina, M.V. Khramykov // Security, security, communication. № 5-1. - 2020. - P. 63-68. - <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43050522&>.
- [4] Ostanina E.A. On some aspects of face recognition technology // Human capital. - № 5 (137). - 2020. - P. 142-152. - <https://elibrary.ru/item.asp?id=42661637>.
- [5] Tagirov T.R. System of registration of control of visiting premises // Youth Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University. - № 2 (23). - 2020. - P. 124-126. - <https://elibrary.ru/item.asp?id=42965587>.
- [6] Katys P.G. Image processing in face recognition systems // Modern science: actual problems of theory and practice. Series: natural and technical sciences. - № 1. - 2020. - P. 92-95. - <https://elibrary.ru/item.asp?id=42632331>.
- [7] Kryazhev A.S. Study of the possibilities of implementing the face recognition module for access control and management systems. Materials of the IV International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists "Fundamental and Applied Research of Young Scientists". - 2020. - P. 356-360. - <https://elibrary.ru/item.asp?id=42731597>.
- [8] Rodishev D.D. Use of technologies for identification of a person by face to record visits to educational institutions. - Materials of the 27th Regional Scientific Student Conference "Intellectual potential of Siberia". - 2019. - P. 69-70. - <https://elibrary.ru/item.asp?id=41410656>.
- [9] Ersultanova Z.P. Intellectual information system in education. - Materials of the VIII International Scientific and Practical Conference "Modern Trends in Natural and Mathematical Education: School - University". - 2019. - P. 49-52. - <https://elibrary.ru/item.asp?id=37273922>.
- [10] Rudeshko N.A. Intelligent face recognition system for schoolchildren / N.A. Rudeshko, Yu.V. Dubenko. - Materials of the VIII All-Russian Scientific Conference of Young Scientists, Postgraduates and Students "Problems of Automation, regional administration, communication and automation (Sails-2019)". - 2019. - P. 271-276. - <https://elibrary.ru/item.asp?id=41879198>.
- [11] Aytbenova A.A. Intellectual information system in education / A.A. Aitbenova, G.B. Dauletbaeva // Mathematical and software systems in industrial and social spheres. - № 1. - 2019. - P. 30-35. - <https://elibrary.ru/item.asp?id=41602667>.
- [12] Filippenko V.A. Review of methods of face recognition in a video stream. Collection of scientific articles of the 4th international scientific conference of promising developments of young scientists "Science of the young - the future of Russia." - 2019. - P. 188-191. - <https://elibrary.ru/item.asp?id=41703985>.
- [13] Ryumin D.A. Automatic face detection for human-machine interaction. D.A. Ryumin, A.A. Aksenov, A.A. Karpov. Materials of the XLVIII scientific and educational-methodical conference of ITMO University. - 2019. - P. 33-37. - <https://elibrary.ru/item.asp?id=42151824>.
- [14] Katin O.I. Research of ways to improve the performance of the face recognition system / O.I. Katin, K.I. Goryanin, D.Yu. Donskoy // Scientific Review. pedagogical sciences. - № 3-3. - 2019. - P. 45-47. - <https://elibrary.ru/item.asp?id=38506301>.
- [15] Barashko E.N. New systems of search and face recognition / E.N. Barashko, K.D. Kruzhillin // Society. - № 2 (13). - 2019. - P. 21-23. - <https://elibrary.ru/item.asp?id=39131066>.
- [16] Wai Yang Ming. Application of statistical data processing to improve the efficiency of face recognition using the method of principal components / Wai Yang Ming, Yu.P. Lisovets, Thet Naing Vin // Electronic Information Systems. - № 2 (21). - 2019. - P. 33-42. - <https://elibrary.ru/item.asp?id=38566109>.
- [17] Martins P. Gradient Shape Model / P. Martins, J.F. Henriques, J. Batista // Int J Comput Vis 128, 2828-2848 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11263-020-01341-y>.
- [18] Cevikalp H. Video Based Face Recognition by Using Discriminatively Learned Convex Models / H. Cevikalp, G.G. Dordinejad // Int J Comput Vis 128, 3000-3014 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11263-020-01356-5>.
- [19] Nakane T. Application of evolutionary and swarm optimization in computer vision: a literature survey / T. Nakane, N. Bold, H. Sun // IPSJ T Comput Vis Appl 12, 3 (2020). <https://doi.org/10.1186/s41074-020-00065-9>.