

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

УДК 004.93'1:611.92

На правах рукописи

СТАРОВОЙТОВ
Алексей Игоревич

СЛЕЖЕНИЕ ЗА КЛЮЧЕВЫМИ ТОЧКАМИ ЛИЦА В ВИДЕОПОТОКЕ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание степени
магистра техники и технологий

по специальности 1-39 81 01 – Компьютерные технологии
проектирования электронных систем

Минск 2019

Работа выполнена на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель: **АЛЕКСЕЕВ Виктор Федорович**,
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Рецензент: **ДРИГО Александр Леонидович**,
директор унитарного предприятия «ИЦТ Горизонт»

Защита диссертации состоится «28» июня 2019 года в 9⁰⁰ часов на заседании Государственной экзаменационной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 408, тел. 293-20-80, e-mail: kafpiks@bsuir.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

ВВЕДЕНИЕ

Область применения компьютерного зрения расширяется параллельно с тем, как оптимизируются алгоритмы, на основе которых решаются прикладные задачи компьютерного зрения. В то же время, по мере того как повышается производительность компьютерного оборудования, становятся актуальными известные ранее алгоритмы, применение которых до недавнего времени было проблематичным. Именно поэтому в последнее время наиболее бурно развиваются те алгоритмы, что работают на основе машинного обучения: отчасти из-за скачка производительности доступного оборудования, а отчасти за счет появления больших массивов данных (в том числе маркированных).

Вопрос производительности алгоритмов компьютерного зрения является краеугольным во многих прикладных задачах: моделирование, биометрическая аутентификация, поиск, кодирование и даже помощь в сборе и автоматической маркировке массивов данных для моделей, не связанных напрямую с компьютерным зрением.

Современные исследования свидетельствуют о существовании целого набора подходов к решению задач компьютерного зрения, используя алгоритмы машинного обучения. Однако, несмотря на значительное количество исследований в этом направлении, отсутствует детальная информация о сравнении различных алгоритмов для решения задачи обнаружения опорных точек лица, и о оптимальной реализации подобных моделей.

Благодаря слежению за движением можно отслеживать движение объекта, а затем применять эти данные применительно к движению другого объекта, например, другого слоя или контрольной точки эффекта, что позволяет создавать композиции, в которых изображения и эффекты следуют движению. Можно также стабилизировать движение. В этом случае данные отслеживания используются для анимации отслеживаемого слоя для компенсации движения объекта на этом слое. Можно привязать свойства к данным отслеживания, используя выражения, что позволяет задействовать различные сценарии применения.

В диссертационной работе рассмотрены различные подходы к решению задачи слежения за опорными точками лица в видеопотоке, а также спроектирован и обучен ряд моделей распознавания точек в индивидуальных кадрах на основе алгоритмов машинного обучения. В процессе поиска оптимальной модели был рассмотрен ряд методологий и принципов построения, обучения и регуляризации математических моделей на основе искусственных нейронных сетей. В работе был использован общедоступный массив маркированных данных, который послужит опорной отметкой для оценки производительности

каждой исследуемой модели, и выборе наиболее производительной. Особенное внимание было уделено анализу и оценке моделей, для детального обоснования конечного выбора.

Рассматриваемая в диссертационной работе прикладная задача способна сделать вклад в исследования, не связанные с ней напрямую, но которые используют схожие механизмы и принципы.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время задача распознавания и слежения за опорными точками лица является критически важной для функционирования целого ряда программных и аппаратных систем в самых различных областях и практических задачах, начиная от развлекательных приложений и заканчивая обеспечением безопасности.

Обнаружение набора опорных лицевых точек на изображении – это технически и математически сложная задача. Разработка интеллектуальной системы, способной решать подобную задачу требует не только углубленного изучения предметной области, но и длительных экспериментов с целью поиска оптимального подхода ее решения: начиная с выбора класса, типа и конкретной архитектуры алгоритма, и заканчивая нахождением оптимальных гиперпараметров модели, а также последующего ее обучения.

Таким образом, разработка новых и улучшение существующих программных средств распознавания опорных точек на изображении является актуальной и важной областью исследований, которая может быть полезной для целого ряда областей и практических задач.

Степень разработанности проблемы

Современные исследования свидетельствуют о существовании целого набора подходов к решению задач компьютерного зрения, используя алгоритмы машинного обучения.

Анализ научных работ по данному направлению исследований показал, что задача поиска объекта изучается многими исследователями Т. Анштедт, И. Келлер, Х. Лутц, Guoshen Yu, P. Viola, M.J. Jones, Соколов С. М., Богуславский А.А., Потапов А.С. и др., но, несмотря на это задача не является полностью решённой. Процесс поиска объекта осложняется аффинными, проективными искажениями, перекрытием объекта другими объектами и шумом при-

ёмника (датчика). Для реальных практических приложений задача должна обрабатывать видеопоследовательность в реальной скорости получения потока данных.

Несмотря на значительное количество исследований в этом направлении, отсутствует детальная информация о сравнении различных алгоритмов для решения задачи обнаружения опорных точек лица, и о оптимальной реализации подобных моделей.

Цель и задачи исследования

Цель диссертационной работы состоит в выборе, анализе и реализации алгоритма обнаружения опорных лицевых точек в видеопотоке, обеспечивающих поиск заданного объекта в реальном масштабе времени.

Для выполнения поставленной цели в работе были сформулированы **следующие основные задачи:**

1. Провести анализ подходов к решению задач компьютерного зрения алгоритмами машинного обучения и выбрать алгоритмы для сравнения.
2. Провести анализ исходных данных и подготовить план мероприятий по эффективному проектированию, реализации, обучению и регуляризации оцениваемых моделей.
3. На основе проделанного анализа разработать ряд моделей на основе искусственных нейронных сетей для решения задачи поиска опорных точек лица на изображении, используя различные архитектуры, оценить работу каждой и выбрать модель, показывающую лучшую производительность.

Область исследования

Содержание диссертации соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) ОСВО 1-39 81 01-2012 специальности 1-39 81 01 «Компьютерные технологии проектирования электронных систем».

Теоретическая и методологическая основа исследования

В основу работы легли исследования ученых в таких областях, как математическая статистика, машинное обучение, математический анализ, численные методы, методы оптимизации и разработка программного обеспечения.

Информационная база исследования сформирована на основе литературы, открытой информации, сведений из электронных ресурсов, а также материалов научных конференций и семинаров.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в проектировании, разработке и сравнительном анализе математических моделей на основе искусственных нейронных сетей для обнаружения опорных точек лица на изображении.

Теоретическая значимость заключается в детальном анализе процесса выбора типа и архитектуры искусственной нейронной сети в задачах компьютерного зрения, процесса обучения, регуляризации и оценки работы модели.

Практическая значимость диссертации заключается в том, что итоговая модель может быть использована в разработке программных и аппаратных систем, требующих обнаружение опорных точек лица в видеопотоке с высокой точностью.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Обоснование выбора архитектур моделей на базе искусственных нейронных сетей, предназначенных для обнаружения опорных лицевых точек на изображении.

2. Сравнительный анализ производительности моделей на основе различных архитектур для выбора оптимальной.

3. Разработка и реализация процесса обучения исследуемых моделей наиболее эффективным образом, с целью выявления их отличительных признаков и сравнительного анализа.

Апробация и внедрение результатов исследования

Результаты исследований по теме диссертации докладывались и обсуждались на XXIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (г. Рязань, Российская Федерация, 2018 г.), 55-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (г. Минск, Республика Беларусь, 2019 г.), публиковались в рецензируемом научном журнале «Доклады БГУИР» (г. Минск, Республика Беларусь, 2018 г.), рецензируемом международном научном журнале «Pattern Recognition and Image Analysis» (г. Москва, Российская Федерация, 2018 г.).

Публикации

Основные положения диссертации и результаты исследования изложены в 6 печатных работах. В их числе 2 статьи в сборнике материалов научной конференции, 2 тезиса докладов на научных конференциях, 2 статьи в рецензируемых научных журналах.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, трех глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений.

В первой главе рассмотрены и проанализированы существующие подходы, а также принципы, особенности и приемы оптимизации алгоритмов машинного обучения, которые станут ключевыми при проектировании и обучении итоговой модели. Например, инициализация обучаемых переменных, использование переменного темпа обучения, обучение с импульсом, исключение нейронов, разбиение исходного массива данных на партии и прочие.

Во второй главе проведен анализ используемого массива маркированных данных, который послужил опорной отметкой для оценки производительности каждой исследуемой модели, а также были описаны используемые в работе программные комплексы и библиотеки.

В третьей главе спроектирован и обучен ряд математических моделей на основе методов машинного обучения для непосредственного решения задачи распознавания точек лица в исследуемом массиве данных. Каждая из моделей была исследована и оценена с точки зрения точности решения поставленной задачи.

В приложении представлены публикации автора, акт внедрения, справка на антиплагиат и графический материал, иллюстрирующий основные результаты диссертационной работы.

Общий объем диссертационной работы составляет 104 страницы. Из них 50 страниц основного текста, 17 иллюстраций на 7 страницах, 4 таблицы на 2 страницах, 25 листингов программного кода на 16 страницах, библиографический список из 55 наименований на 4 страницах, список собственных публикаций соискателя из 6 наименований на 1 странице, 4 приложения на 37 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрено современное состояние алгоритмов компьютерного зрения на для обнаружения опорных точек на изображениях, а также представлено обоснование актуальности темы диссертации.

В **общей характеристике** работы показана актуальность проводимых исследований, степень разработанности проблемы, сформулированы цель и задачи диссертации, обозначена область исследований, научная (теоретическая и практическая) значимость исследований, а также апробация работы.

В **первой** главе рассмотрены и проанализированы существующие подходы к задаче обнаружения опорных точек на изображении. Для решения поставленной задачи были выбраны алгоритмы на основе искусственных нейронных сетей, которые активно применяются в задачах компьютерного зрения, и демонстрируют высокую точность в практических задачах, схожих с поставленной. Обозначен набор архитектур, которые смогут показать необходимую точность решения поставленной задачи: модель на основе неглубокой нейронной сети с одним слоем, модель на основе глубокой сверточной сети и модель на основе ансамбля сверточных сетей. Принято решение реализовать и опробовать набор различных архитектур с целью поиска оптимальной модели для решения поставленной задачи

Рассмотрены ключевые моменты разработки модели на основе искусственных нейронных сетей, такие как построение архитектуры сети, выбор целевой функции и метода оптимизации. В качестве оптимизирующей функции был выбран импульсный метод Нестерова, демонстрирующий быструю сходимость в схожих задачах.

Во **второй** главе проведен анализ используемого массива маркированных данных, который послужил опорной отметкой для оценки производительности каждой исследуемой модели. Пример исходных данных с маркированными опорными точками представлен на рисунке 1.

Основываясь на особенностях данных для обучения, был обозначен набор гиперпараметров моделей, оптимизация которых поможет добиться необходимого уровня точности и производительности. Выбранный массив исходных данных полезен также и тем, что он демонстрирует типичную проблему при обучении моделей на основе алгоритмов машинного обучения – нехватку данных. Практически всегда точность модели напрямую зависит от тренировочных данных, на которых она обучается. И даже незначительное расширение объема входных данных может оказать существенное влияние на то, насколько точно работает модель в реальных условиях. Для этого составлен потенциальный план мероприятий по регуляризации процесса обучения в виде аугментации исходных тренировочных данных. В качестве главного метода аугментации было выбрано случайное зеркальное отражение изображения, хотя возможно применения и ряда других методов, таких как применение фильтров и трансформаций, не меняющих семантическое содержание исходного маркированного изображения.

Рассмотрен инструментарий для разработки, построения и обучения моделей на основе искусственных нейронных сетей в виде программной библиотеки TensorFlow, а также ряд практик по реализации и организации процесса

обучения данных моделей наиболее эффективным образом, такие как организация переменных графа состояний при помощи пространств имен и областей их действия.



Рисунок 1 – Пример исходных данных с маркированными опорными точками

Рассмотрены ключевые понятия реализации и обучения математических моделей на основе нейронных сетей при работе с программным пакетом TensorFlow, такие как граф состояний, сессии, оптимизаторы и прочее.

В третьей главе разработаны некоторые модели на основе искусственных нейронных сетей для решения задачи обнаружения опорных точек лица в видеопотоке. Были реализованы модели на основе следующих нейронных сетей:

- неглубокая нейронная сеть с одним скрытым слоем;
- глубокая сверточная нейронная сеть;
- ансамбль глубоких сверточных сетей.

Была выбрана метрика оценки моделей, основываясь на точности их предсказаний при работе с незнакомыми данными – фактически, способность

к обобщению. В качестве точности рассматривается значение целевой функции, а точнее, функции ошибки. Точность работы модели оценивается как значение функции ошибки – чем оно меньше, тем точнее работает рассматриваемая модель. Используя данные метрики, работа каждой из моделей была оценена с точки зрения точности решения поставленной задачи, в результате чего была выбрана модель, показавшая лучшую производительность.

Модель на основе неглубокой нейронной сети с одним скрытым слоем (или перцептрон) использовала архитектуру, представленную на рисунке 2.

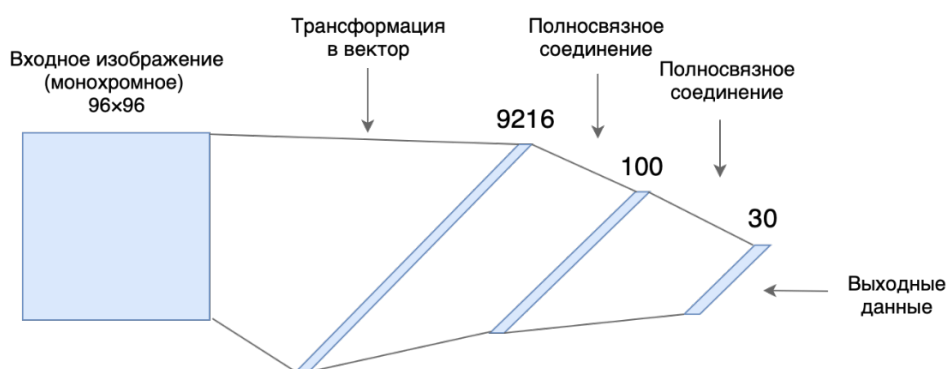


Рисунок 2 – Архитектура модели на основе неглубокой сети с одним слоем

Точность прогнозов данной модели не очень плоха в целом, но тем не менее оставляет желать лучшего на отдельных примерах – несмотря на то, что, исходя из наблюдений за процессом обучения, она достигает максимума своих возможностей усвоения информации.

Модель на основе глубокой сверточной сети использовала архитектуру, представленную на рисунке 3.

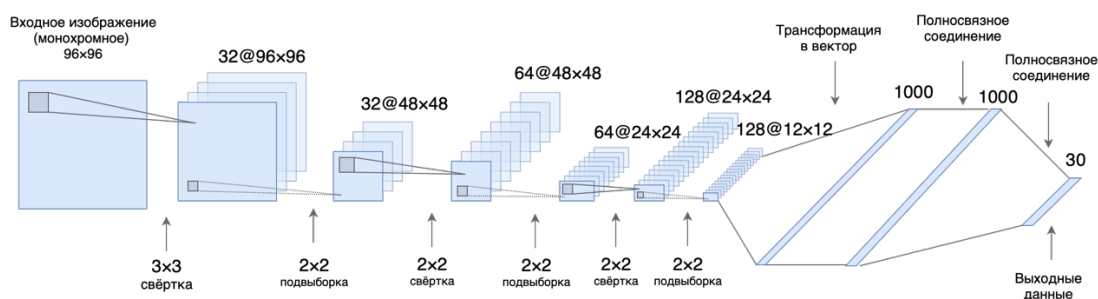


Рисунок 3 – Архитектура модели на основе сверточной нейронной сети

Это более сложная модель, обладающая значительно большим количеством обучаемых параметров, а соответственно, и большей вместимостью зна-

ний. При обучении данной модели пришлось воспользоваться целым комплексом мер по регуляризации процесса обучения с целью лучшего обобщения знаний модели. Например, в реализацию процесса обучения были добавлены такие методы регуляризации, как исключение и аугментация тренировочных данных.

Данная модель продемонстрировала значительно более высокую точность, чем предыдущая, хотя процесс обучения и стал более громоздким и долгим. Точность работы модели на ранее не использованных данных повысилась более, чем в два раза по сравнению с предыдущей моделью на основе неглубокой нейронной сети с одним скрытым слоем.

На следующем этапе анализа была выбрана модель на основе ансамбля сверточных нейронных сетей. Из-за особенностей исходных данных, повышение точности работы возможно за счет обучения отдельных сверточных нейронных сетей для распознавания отдельных групп искомым опорных точек, в чем и состоит суть обучения так называемого ансамбля специалистов. Каждый специалист в модели имеет одинаковую архитектуру, представленную на рисунке 4.

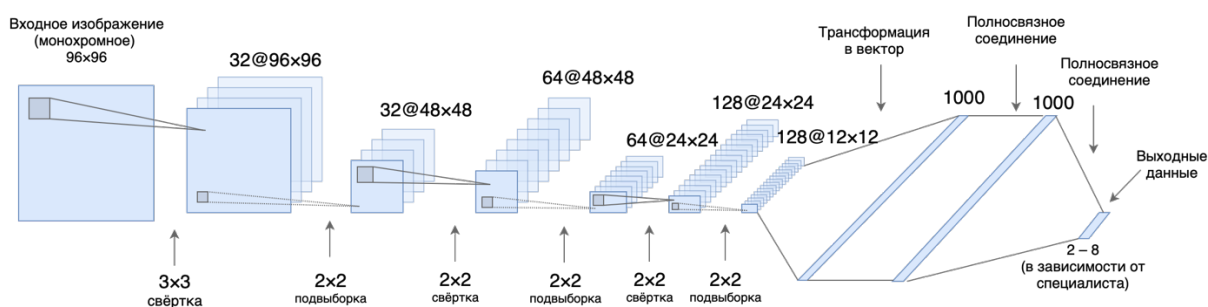


Рисунок 4 – Архитектура одной сверточной сети из ансамбля моделей

Это еще более сложная модель, чем в предыдущем случае, и при ее обучении пришлось воспользоваться дополнительным набором мероприятий по оптимизации и регуляризации процесса обучения, с целью лучшего обобщения знаний модели и более быстрого обучения. Например, в реализацию процесса обучения были добавлены такие приемы, как ранняя остановка и предобучение, или переносимость знаний сверточных нейронных сетей. Также были задействованы методы регуляризации, введенные ранее: исключение, аугментация, обучение с импульсом и прочие.

Модель на основе ансамбля сетей показала наилучший результат точности предсказаний, хоть и потребовала значительное время для полного обучения всех специалистов.

Рассмотренные архитектуры модели возрастали по сложности, а с повышением сложности архитектуры возрастало и количество параметров, которые модель наполняла знаниями в процессе обучения. Повышение вместимости, как правило, ведет к усложнению и замедлению процесса обучения, а также к снижению способности модели к обобщению полученных знаний на примерах, не представленных в процессе обучения.

Для предотвращения этих негативных эффектов рассмотрен применен ряд мероприятий по регуляризации и оптимизации процесса обучения. Эти мероприятия также усложнялись и принимали все более точечный и детальный характер от архитектуры к архитектуре. Их применение принесло ожидаемые результаты, и конечная информационная модель отлично справляется с точным обнаружением опорных лицевых точек даже на изображениях, которые не участвовали в процессе обучения.

Таблица 1 – Оценка работы моделей на основе различных архитектур нейронных сетей

| Архитектура модели | Значение ошибки на валидационном наборе данных |
|--------------------------------------|--|
| Нейронная сеть с одним скрытым слоем | 2.72522×10^{-3} |
| Глубокая сверточная сеть | 1.12052×10^{-3} |
| Ансамбль сверточных сетей | 7.9437×10^{-4} |

Как видно из таблицы 1, наименьшее значение ошибки (и, соответственно, наивысшую точность) показала модель на основе группы сверточных нейронных сетей, предсказывающих индивидуальные наборы опорных лицевых точек.

Обученная итоговая модель на основе ансамбля сверточных нейронных сетей демонстрирует высокую точность распознавания искомым опорных точек и готова к внедрению в программные и аппаратные системы, обеспечивающие распознавание и слежение за точками лица.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Рассмотрены алгоритмы на основе машинного обучения, которые активно применяются в практических задачах компьютерного зрения. Выбран ряд алгоритмов на основе искусственных нейронных сетей для дальнейшей

оценки и использования при решении поставленной задачи. Рассмотрены ключевые моменты разработки модели на основе искусственных нейронных сетей, выбрана целевая функция и метод оптимизации при обучении моделей.

2. Проанализирован исходный массива данных, используемый для обучения моделей. Составлен план мероприятий по регуляризации процесса обучения. Рассмотрен инструментарий для разработки, построения и обучения моделей на основе искусственных нейронных сетей, а также ряд практик по реализации и организации процесса обучения данных моделей наиболее эффективным образом.

3. Разработан ряд отдельных моделей на основе искусственных нейронных сетей для решения поставленной практической задачи. Выбрана метрика оценки моделей, основываясь на точности их предсказаний при работе с неизвестными данными, иными словами, способность к обобщению. Работа каждой из моделей оценена с точки зрения точности решения поставленной задачи, в результате чего выбрана модель, показавшая лучшую производительность.

Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученные результаты внедрены в учебный процесс на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» при изучении дисциплины «Технология видеоаналитики».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в рецензируемых журналах

1. Staravoitau, A. Traffic Sign Classification with a Convolutional Network / Pattern Recognition and Image Analysis (28). – 2018. – P. 155–162.
2. Alexeev, V.F. End to End Learning for a Driving Simulator / Victor F. Alexeev, Aliaksei I. Staravoitau, Gennady A. Piskun, Dzmitry V. Likhacheuski // Доклады БГУИР 2 (112), 2018. – С. 85–91.

Тезисы конференций

3. Staravoitau, A. Visualising computer vision datasets // Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании: материалы XXIII-й Всерос. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов (2). – Рязань, 2018. – С. 198–200.
4. Staravoitau, A. Computation graphs in TensorFlow // Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании: материалы

XXIII-й Всерос. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов (1). – Рязань, 2018. – С. 278–280.

5. Staravoitau, A. Calibrating camera data // Компьютерное проектирование и технология производства электронных систем: сборник тезисов 55 научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 22–26 апреля 2019 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; отв. ред. Раднёнок А. Л. – Минск, 2019. – в печати.

6. Staravoitau, A. Extracting features for edge detection // Компьютерное проектирование и технология производства электронных систем: сборник тезисов 55 научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 22–26 апреля 2019 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; отв. ред. Раднёнок А. Л. – Минск, 2019. – в печати.

РЭЗІЮМЭ

Старовойтаў Аляксей Ігаравіч

Сачэнне за ключавымі кропкамі твару ў відэастромені

Ключавыя словы: машыннае навучанне, кампутарны зрок, нейронная сетка

Мэта працы: выбар, аналіз і рэалізацыя алгарытму выяўлення апорных кропак твару ў відэастромені з дапамогай машыннага навучання.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: выкананы аналіз падыходаў да выяўлення апорных кропак твару ў відэастромені, ці адвольнай выяве, алгарытмамі кампутарнага зроку з дапамогай машыннага навучання. Праведзены аналіз зыходных дадзеных, і падрыхтаваны план імпрэз па эфектыўным праектаванні, рэалізацыі, навучанні і рэгулярызацыі мадэляў на грунце нейронавых сетак. Нарэшце, распрацаваны шэраг матэматычных мадэляў якія выкарыстоўваюць абраныя архітэктурныя, для якіх праведзены параўнальны аналіз. Выніковая навучаная мадэль можа быць скарыстана ў распрацоўцы праграмных і апаратных сістэм, што патрабуюць выяўленне апорных кропак твару ў відэастромені з высокай дакладнасцю..

Ступень выкарыстання: вынікі інтэграваны ў навучальны працэс на кафедры праектавання інфармацыйна-камп'ютэрных сістэм установы адукацыі «Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт інфарматыкі і радыёэлектронікі» і могуць быць ужытымі пры выкладанні дысцыпліны «Тэхналогія відэааналітыкі».

Вобласць ужывання: машыннае навучанне, кампутарны зрок.

РЕЗЮМЕ

Старовойтов Алексей Игоревич

Слежение за ключевыми точками лица в видеопотоке

Ключевые слова: машинное обучение, компьютерное зрение, нейронная сеть.

Цель работы: выбор, анализ и реализация алгоритма обнаружения опорных лицевых точек в видеопотоке на основе машинного обучения.

Полученные результаты и их новизна: проведен детальный анализ подходов к решению задачи обнаружения опорных точек лица в видеопотоке, или произвольном изображении, алгоритмами компьютерного зрения на основе машинного обучения. Проведен анализ исходных данных, и подготовлен план

мероприятий по эффективному проектированию, реализации, обучению и регуляризации моделей на основе нейронных сетей. Наконец, разработан ряд математических моделей на основе выбранных архитектур, для которых проведен сравнительный анализ. Итоговая обученная модель может быть использована в разработке программных и аппаратных систем, требующих обнаружение опорных точек лица в видеопотоке с высокой точностью.

Степень использования: результаты внедрены в учебный процесс на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» при преподавании дисциплины «Технология видеоаналитики».

Область применения: машинное обучение, компьютерное зрение.

SUMMARY

Staravoitau Aliaksei Iharavich

Tracking facial keypoints in a video stream

Keywords: machine learning, computer vision, neural network.

The object of study: selection, analysis and implementation of a machine learning algorithm for detecting facial keypoints in a video stream.

The results and novelty: analysis of existing approaches for detecting keypoints in an arbitrary frame or image has been carried out, specifically for algorithms based on machine learning. Dataset, which has been used for training and evaluating the model, has also been analyzed, and results of this analysis taken into account when planning the actual implementation, training and regularisation of models based on neural networks. Finally, a set of mathematical models has been implemented, based on the selected architectures. Those models have been evaluated and compared, and the final, best performing model, can now be used in development of software and hardware solutions requiring facial keypoints detection with high accuracy.

Degree of use: results were integrated into the educational process at the department of design of information and computer systems of the educational institution «Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics» in the training course « Video analytics technology»

Sphere of application: machine learning, computer vision.