

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Кузьмина Андрея Игоревича

«Методы обучаемой регуляризации в задачах сопоставления изображений»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по  
специальности 05.13.17 – теоретические основы информатики.

### **Актуальность.**

В диссертации А.И.Кузьмина рассмотрена задача сопоставления изображений в ее наиболее общей постановке, а именно плотное непараметрическое сопоставление. Такая задача является одной из центральных задач машинного зрения и анализа медицинских изображений. Область применения включает в себя бинокулярную стерео-реконструкцию и детекцию движения на дорожных сценах, анализ движения при видеонаблюдении, а также медицинскую ультразвуковую эластографию.

Традиционно, решение задачи сопоставления изображений было основано на постановке оптимизационной задачи. Благодаря развитию глубокого машинного обучения за счет увеличения вычислительных мощностей и появления публичных коллекций размеченных данных, активное развитие получили методы сопоставления изображений на основе сверточных нейросетей. Такие подходы позволяют получать сопоставление высокого качества, но при этом обладают высокой вычислительной сложностью, что не позволяет применять их в режиме реального времени, когда требуется анализировать видео с частотой 25 кадров в секунду и более.

В диссертации А.И. Кузьмина предложена серия моделей на основе глубокого машинного обучения, имеющих низкую вычислительную сложность на этапе исполнения. Общей идеей, связывающей разработанные методы, является обучаемая регуляризация, практическая реализация которой становится возможной благодаря представлению графа вычислений оптимизационных алгоритмов сопоставления изображений в виде слоев сверточной и рекуррентной нейросети.

### **Достоверность результатов.**

Представленные в диссертации А.И.Кузьминым результаты основаны на численных экспериментах с применением коллекций изображений, размещенных в открытом доступе в сети интернет. Эти данные активно используются в литературе для сравнения различных методов сопоставления изображений.

Результаты по сопоставлению ультразвуковых медицинских изображений получены для серии специально изготовленных объектов (фантомов) известной геометрии, что позволило количественно оценить качество сопоставления. Диссертация также содержит сравнения результатов сопоставления на данных, использованных другими авторами в литературе (Rivaz: 2014).

### **Основные результаты и их новизна:**

В рамках диссертационной работы А.И. Кузьминым получены следующие новые результаты:

1. Предложен новый метод сопоставления изображений в приложении к бинокулярной стерео-реконструкции, основанный на комбинации сверточной и рекуррентной нейросети. Разработанная модель имеет меньшую вычислительную трудоемкость по сравнению с моделями, предложенными в литературе. Обучаемая схема агрегирования тензора энергий позволяет избежать трудоемкого сравнения большого количества визуальных дескрипторов, который является основным этапом большинства прочих методов стерео-сопоставления, основанных на глубоком машинном обучении.
2. Разработана новая архитектура нейросети для задачи сопоставления изображений в приложении к задаче вычисления оптического потока. Предложенный метод основан на представлении итераций оптимизационного алгоритма в виде слоев сверточной нейросети, что позволяет получить метод, имеющий более низкую вычислительную трудоемкость по сравнению с методами, предложенными в литературе. Основой предложенной модели является обучение оператора регуляризации, что позволяет улучшить качество по сравнению с использованием фиксированного оператора регуляризации.
3. Предложен новый метод сопоставления серий из трех ультразвуковых снимков в приложении к задаче ультразвуковой эластографии. Метод основан на локальном сопоставлении фрагментов изображения с последующим применением адаптивной регуляризации. Такой подход позволяет получить метод, устойчивый к участкам неверного сопоставления и, при этом, имеющий низкую вычислительную сложность.

### **Содержание работы.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения.

Во введении обосновывается актуальность проводимых исследований, научная и практическая ценность работы, сформулированы цели и задачи, а также сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Вторая глава «Задача плотного сопоставления изображений» содержит постановку задачи сопоставления изображений, обзор вариантов задачи для различных приложений, а описание областей применения.

Третья глава «Бинокулярное стерео-сопоставление» содержит описание метода стерео-сопоставления, разработанного автором. Глава начинается с введения в стерео-реконструкцию: приводится описание эпиполярной геометрии двух видов, излагаются особенности стерео-сопоставления на реальных данных. Также содержится обзор существующих методов на основе постановки задачи оптимизации. Главу продолжает обзор методов фильтрации изображений, использующих нахождение границ объектов. Затем приводится описание методов глубокого машинного обучения для стерео-реконструкции. Основная часть главы содержит описание метода, основанного на комбинации сверточной и рекуррентной нейросети, предложенного автором, а также численные

эксперименты с использованием изображений дорожных сцен из открытых коллекций.

Четвертая глава содержит метод вычисления оптического потока, предложенный А.И.Кузьминым. В начале главы содержится обзор методов вычисления оптического потока, основанных на постановке оптимизационной задачи. Главу продолжает обзор методов, основанных на глубоком машинном обучении. Приводится описание метода, предложенного автором, а также численные эксперименты.

В Пятой главе рассмотрена задача сопоставления изображений ультразвуковой эластографии. Глава начинается с описания методов сопоставления ультразвуковых медицинских изображений. Далее приводится обзор методов эластографии по двум кадрам и многим кадрам. Описание метода, разработанного А.И. Кузьминым, сопровождается численными экспериментами с использованием данных, полученных с помощью численного моделирования, данных с использованием специально изготовленных фантомов известной геометрии, а также ультразвуковых снимков ткани человека. Главу завершает описание задачи сопоставления ультразвуковых сигналов, возникающая в ультразвуковой отражательной томографии, а также описание метода реконструкции, предложенного А.И. Кузьминым.

#### **Теоретическая значимость.**

В диссертации А.И. Кузьмина был разработан ряд моделей для задачи сопоставления изображений: модель для сопоставления изображений в применении к стерео-реконструкции, основанная на сверточечно-рекуррентной нейросети; модель для задачи вычисления оптического потока на основе обучения оператора регуляризации; метод для сопоставления ультразвуковых снимков на основе выпуклой оптимизации с применением адаптивной регуляризации. Все разработанные модели обладают низкой вычислительной сложностью по сравнению с методами, описанными в литературе.

#### **Практическая значимость.**

Методы сопоставления изображений, предложенные А.И. Кузьминым, а также разработанный комплекс программ с применением графических ускорителей позволяет решать задачу сопоставления изображений в режиме реального времени для ряда практически важных задач, таких как стерео-реконструкция и анализ движения на дорожных сценах, обнаружение движения при видеонаблюдении, а также сопоставление медицинских ультразвуковых снимков в применении к эластографии.

#### **Замечания.**

Отмечая актуальность, новизну и значимость диссертационного исследования, следует высказать следующие замечания:

1. В тексте диссертации содержатся незначительные опечатки (с. 6) и переполнения строк (с. 4,10), ссылки 52 и 53 совпадают.
2. Численные эксперименты из главы 2 «Задача вычисления оптического потока» могли бы быть усилены большим количеством сравнений с использованием публичных коллекций данных.

3. Используемые в работе регуляризирующие алгоритмы основаны на использовании функционала полной вариации. Упомянутое в работе обобщение функционала полной вариации носит, в основном, описательный характер, и более полное ее использование в задаче сопоставления изображений представляло бы достаточный интерес.

### **Заключение.**

Указанные замечания не отменяют положительную оценку выполненной автором работы. Диссертация логично построена, ее структура и содержание соответствуют цели и задачам исследования. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации. Основные результаты опубликованы в 5 рецензируемых изданиях из списка ВАК.

Диссертация Кузьмина Андрея Игоревича «Методы обучаемой регуляризации в задачах плотного сопоставления изображений» является самостоятельной законченной научно-квалификационной работой. Диссертация обладает научно-теоретической и практической значимостью, ее результаты имеют существенное значение для развития направлений исследований в области теоретических основ информатики, а именно в исследовании методов машинного зрения и обработки изображений, в т.ч. ультразвуковых медицинских снимков.

Диссертация Кузьмина Андрея Игоревича «Методы обучаемой регуляризации в задачах плотного сопоставления изображений» отвечает всем требованиям пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемых к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присвоения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.17 – теоретические основы информатики.

Официальный оппонент

Доктор физико-математических наук, профессор,  
Крылов Андрей Серджевич,

адрес Ленинские Горы, 1, стр. 52, Москва, 119234  
телефон 495 939-11-29

адрес электронной почты kryl@cs.msu.ru,

профессор факультета вычислительной математики и кибернетики

Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

15.08.2018

Подпись профессора Крылова Андрея Серджевича заверяю,  
Исполняющий обязанности декана факультета ВМК МГУ имени М.В.  
Ломоносова



Кульченков В.Г.