

**СБОРНИК ТЕЗИСОВ
ЛУЧШИХ ВЫПУСКНЫХ
КВАЛИФИКАЦИОННЫХ РАБОТ
ФАКУЛЬТЕТА ВМК МГУ 2020 ГОДА**

Оглавление

Кафедра математической физики	9
<i>В. С. Матвееенко</i>	
Исследование математической модели деионизации водных растворов	9
<i>Д. А. Шульмин</i>	
Улучшение численных гарантированных оценок множеств решений систем обыкновенных дифференциальных уравнений	10
<i>А. В. Косов</i>	
Адаптивный метод сегментации гистологических изображений . . .	12
<i>О. С. Володина</i>	
Нелинейные методы подавления шума на изображениях	14
<i>А. В. Кочкарев</i>	
Метод автоматического анализа минерального состава руд по фотографиям аншлифов	15
<i>Д. А. Кононыхин</i>	
Метод анализа движения субклеточных структур на микроскопических изображениях	17
<i>В. А. Тихонова</i>	
Метод сегментации изображений радужной оболочки глаза	19
Кафедра вычислительных технологий и моделирования	20
<i>В. И. Кириллов</i>	
Сравнение методов граничных интегральных уравнений со слабой и сильной особенностями в задачах электромагнитного рассеяния . .	21
Кафедра вычислительных методов	22
<i>И. Г. Уваркин</i>	
Разработка метода шаблонов для выявления патологий в кровеносной системе	23
<i>Н. А. Балобанова</i>	
Исследование возможности определения инфракрасных изображений, формируемых при отражении от пластика или стекла	24

<i>Е. В. Кочетов</i>	
Исследование возможностей применения методов искусственного интеллекта к результатам моделирования кровеносной системы . . .	25
<i>М. А. Филиппова</i>	
Разрывный метод частиц для двумерного нелинейного переноса . .	27
<i>Д. А. Козьякин</i>	
Восстановление табличных данных вариационным методом с учетом ошибок	28
Кафедра автоматизации научных исследований	29
<i>С. Д. Процеров</i>	
Сегментация зашумлённых речевых сигналов	29
Кафедра общей математики	30
<i>В. А. Усов</i>	
Алгоритм, проверяющий *-конгруэнтность заданных комплексных матриц	30
Кафедра нелинейных динамических систем и процессов управления	32
<i>А. С. Вылегжанин</i>	
Методы идентификации динамических систем с возмущениями при помощи нейронных сетей	32
<i>Г. А. Яременко</i>	
Синтез расширенного фильтра Калмана для датчиков на сегменте трубопровода с капельной жидкостью	35
Кафедра системного анализа	37
<i>В. В. Абрамова</i>	
О задачах управления и наблюдения для осциллирующей цепи . . .	37
<i>И. А. Кулешов</i>	
Рекуррентные уравнения для функции Беллмана в задаче суперхеджирования бинарных опционов с дискретным временем . .	39
<i>А. Н. Ашабоков</i>	
Пример решения задачи оптимального управления для мембран . .	41
Кафедра математической статистики	43
<i>А. А. Наволоцкий</i>	
Оценивание нейромышечных ошибок спортсменов при выполнении двигательных упражнений	43
<i>А. О. Маргасов</i>	
О нейронных обыкновенных дифференциальных уравнениях и их применениях	43

Кафедра математических методов прогнозирования	45
<i>Н. С. Королев</i>	
Методы повышения обобщающей способности, основанные на построении многослойных ансамблей	45
<i>Д. П. Петренко</i>	
Расстояния, параметризованные размерами, и их аппроксимация	47
<i>Г. В. Кормаков</i>	
Разработка алгоритмов работы с матрицами и системами линейных алгебраических уравнений в обратимых схемах	49
<i>А. О. Устюжанин</i>	
Повышение разнообразия результатов стилизации изображений	51
<i>Д. А. Коптелов</i>	
Метод скелетизации бинарного изображения на основе плоского заметания	52
<i>М. А. Еремеев</i>	
Ранжирование текстовых документов на основе оценок когнитивной сложности текста	53
Кафедра математической кибернетики	55
<i>Е. Д. Купраш</i>	
Исследование сложности умножителей в одной модели программируемых логических схем	55
<i>М. А. Лопунов</i>	
О тестах относительно некоторых неисправностей входов схем	57
<i>С. С. Стешин</i>	
Khnum: быстрая open-source программа для расчета метаболических потоков с использованием ¹³ C-углерода	58
Кафедра информационной безопасности	60
<i>Е. А. Шляхтина</i>	
Схема групповой аутентификации на основе доказательства с нулевым разглашением	60
<i>А. М. Резникова</i>	
Логический криптоанализ кодовой криптосистемы, построенной на основе квазициклических кодов Хэмминга	62
<i>Г. О. Дороднов</i>	
Реализация сетевой атаки по побочным каналам на кэш последнего уровня	63
<i>И. В. Лысаков</i>	
Исследование свойств асимметричных криптографических схем, основанных на теории решеток	65

<i>К. С. Гуртова</i>	
Исследование методов и алгоритмов разработки нового поколения технологий аутентификации, авторизации и учета для индустрии приложения «Интернет вещей»	67
Кафедра интеллектуальных информационных технологий	68
<i>Ю. А. Васильев</i>	
Выявление структуры и тематической направленности интернет сообществ с использованием методов машинного обучения	69
<i>Е. Д. Складов</i>	
Разработка метода оценки качества систем облачного кодирования видеотрансляций	71
<i>А. Д. Калякина</i>	
Прогнозирование появления новых связей и анализ структуры сетевых сообществ	72
<i>А. Ю. Бабичев</i>	
Методы синтеза текстур по образцу	74
<i>А. В. Стоцкий</i>	
Усовершенствование методов глубокого обучения для компьютерной диагностики в проекционной рентгенографии	76
<i>В. Д. Борисов</i>	
Вероятностные прогнозы фотометрических красных смещений астрономических объектов в рентгеновских обзорах неба с использованием методов машинного обучения	78
Кафедра автоматизации систем вычислительных комплексов	79
<i>А. А. Маркобородов</i>	
Трансляция таблицы потоков коммутатора программно-конфигурируемой сети в язык ассемблера сетевого процессора	80
<i>М. Г. Гонопольский</i>	
Исследование алгоритмов оценки времени отклика задач в многопроцессорных системах с интервальной неопределенностью длительности выполнения работ	81
<i>А. В. Антипина</i>	
Разработка и исследование метода предотвращения атак распределённого отказа в обслуживании на контроллер в программно-конфигурируемых сетях на основе оценки поведения хостов	83
Кафедра суперкомпьютеров и квантовой информатики	85
<i>Д. А. Домрачева</i>	
Определение изменений коммуникационных свойств параллельных программ при помощи анализа трафика InfiniBand	85

<i>К. С. Мокров</i>	
Разработка метода прогнозирования слабой масштабируемости суперкомпьютерных приложений	87
<i>А. А. Худолеева</i>	
Моделирование влияния агента системы мониторинга производительности на работу пользовательских задач	88
<i>Г. И. Закиров</i>	
Исследование предельных значений процессорных датчиков, используемых для анализа производительности суперкомпьютерных приложений	90
Кафедра алгоритмических языков	91
<i>С. Ю. Бурдуковская</i>	
Модификация алгоритма привязки координат поезда к графу железных дорог	91
<i>Д. И. Пташник</i>	
Методы и программные инструменты генерации аккомпанемента к нотным записям	93
<i>М. П. Зяблова</i>	
Методика построения специализированной анкеты по ограниченному набору вопросов	94
<i>Д. И. Франтовская</i>	
Разработка рекомендательной системы в области юриспруденции	96
<i>Е. Д. Шамаева</i>	
Синтаксический анализатор по моделям управления	98
<i>Н. А. Решетник</i>	
Выделение полиномиального слагаемого из решений линейных дифференциальных уравнений с полиномиальными коэффициентами и правыми частями	100
<i>А. В. Пославский</i>	
Кроссплатформенное приложение для распознавания шахматных партий в режиме реального времени	101
<i>А. Д. Телегина</i>	
Методы распознавания паронимии для построения компьютерного словаря русских паронимов	103
<i>А. С. Шпитальник</i>	
Применение нейронных сетей к задаче определения наводящих вопросов	104

Кафедра системного программирования	106
<i>И. О. Пеганова</i>	
Автоматическое построение описания для результатов поиска научных статей	106
<i>А. В. Черемнов</i>	
Алгоритм доставки страничных нарушений в мониторе виртуальных машин	108
<i>А. Р. Самохина</i>	
Контекстно-зависимая рекомендация статей на основе истории поиска	109
<i>И. И. Шляпин</i>	
Средство автоматического тестирования корректности работы аппарата виртуальной памяти	111
<i>А. М. Муинова</i>	
Автоматическое реферирование документов с учётом поискового запроса	112
<i>В. Н. Корчагин</i>	
Автоматизированное преобразование последовательных Си программ для их распараллеливания	114
Именной указатель	116

Исследование математической модели деионизации водных растворов

Работа удостоена диплома I степени

Матвеев Валерий Сергеевич

Кафедра математической физики

e-mail: valmat07@yandex.ru

Научный руководитель — д.ф.-м.н. проф. Денисов Александр Михайлович

В работе рассматривается метод емкостной деионизации — менее энергоемкий и экономичный метод опреснения воды в сравнении с методами обратного осмоса и дистилляции.

Суть метода емкостной деионизации подробно рассмотрена в работе [1]. Он заключается в пропускании водного раствора через электрохимическую ячейку между двумя пористыми электродами, в качестве которых обычно используются углеродные электроды с высокой удельной поверхностью, между которыми задается определённая разность потенциалов. Теоретический подход сводится к представлению аэрогелных электродов, как поверхности конденсатора большой емкости [2] собирающего ионы из промежутка между электродами, по которому происходит движение раствора.

В работе [3] предложены уравнения, начальные и краевые условия, описывающие деионизацию водных растворов, также построен алгоритм количественного расчета условий равновесия, переноса и диффузии ионов.

Выпускная квалификационная работа посвящена численному исследованию математических моделей емкостной деионизации и численному решению, в рамках этих моделей, некоторых обратных задач.

В работе рассмотрены две математические модели процесса деионизации водного раствора, представляющие собой начально-краевые задачи для системы уравнений в частных производных. Модели различаются разным описанием процесса поглощения ионов. Так была рассмотрена упрощенная модель поглощения и модель более приближенная к реальной работе установки. Для каждой модели предложен и программно реализован численный метод, позволяющий вычислять концентрацию ионов в канале и порах. Численно исследована зависимость выходной концентрации ионов от различных параметров моделей. Рассмотрены обратные задачи состоящие в нахождении неизвестных кинетических коэффициентов, определяющих процесс поглощения ионов. Предложен и численно реализован метод поиска кинетических коэффициентов по интегральной выходной концентрации ионов.

Литература

- [1] Al Marzooqi F. A., Al Ghaferi A. A., Saadat I., Hilal N. // Desalination. 2014. Vol. 342. P. 3–15
- [2] Iozzo D. A. B., Tong M., Wu G., Furlani E. P. // J. Phys. Chem. C. 2015. Vol. 119. N 45. P. 25235–25242.

- [3] Тихонов Н. А., Токмачев М. Г. Исследование процесса деионизации растворов электросорбцией на аэрогельных электродах посредством математического моделирования // Сорбционные и хроматографические процессы. 2017. Т. 17, № 6. С. 893–906.

**Улучшение численных гарантированных оценок
множеств решений систем обыкновенных
дифференциальных уравнений**

Работа удостоена диплома III степени

Шульмин Денис Александрович

Кафедра математической физики

e-mail: dnssh@mail.ru

Научный руководитель — к.т.н. с.н.с. Евстигнеев Николай Михайлович

Одной из перспективных и активно развивающихся в настоящее время областей математики являются доказательные вычисления (ДВ) — вычисления, направленные на доказательство новых фактов и теорем и основанные на совместном применении численных и аналитических методов. ДВ подразумевают построение гарантированных оценок множеств решений рассматриваемых задач, что может быть достигнуто средствами интервальной арифметики и интервального анализа. Следует упомянуть выдающийся результат совместного использования ДВ и интервальной арифметики в области динамических систем, полученный У. Такером и заключающийся в решении 14-й проблемы Смейла (одной из 18-ти наиболее значительных нерешенных математических задач 21-го века, список которых составил Стивен Смейл в 2000 году). Такер доказал существование в системе уравнений Лоренца при классических значениях параметров робастного (устойчивого к малым возмущениям) странного аттрактора.

Для ДВ, связанных с доказательством существования и построением решений ОДУ и систем ОДУ, могут быть использованы методы, основанные на интервальных моделях Тейлора (ТМ). ТМ — дуплет, состоящий из векторного полинома и векторного интервала, называемого остатком. Детальному и формальному изложению вопроса применения ТМ к интегрированию ОДУ и их систем, а также доказательству существования периодических траекторий в системах ОДУ посвящены работы [1, 2]. Данная работа является логичным продолжением работ [1, 2] и связана с дальнейшим развитием методов на основе ТМ.

В работе показано, что при решении интервальной задачи Коши для модельного уравнения Далквиста с помощью алгоритма, основанного на применении ТМ с полиномом второй степени, наблюдается устойчивая тенденция к расхождению численного и аналитического решений, независимо от шага интегрирования. При этом основной вклад в ошибку вносит последовательное (от итерации к итерации) расширение остатка ТМ. Для корректировки данного поведения алгоритма предложен подход, включающий замену ТМ, полученной

на очередном шаге интегрирования, на ТМ, описывающую то же множество решений, но имеющую нулевой остаток. Данная замена названа модификацией, а полученная в результате ТМ — модифицированной. При включении данного шага в исходный алгоритм получается достаточно точно описать множество решений поставленной задачи.

В случае одномерной ТМ модификация интуитивно понятна и может быть без труда выполнена. Для многомерной ТМ способ модификации не так очевиден. Целью данной работы является построение алгоритмов модификации ТМ произвольной размерности и обоснование возможности использования данных ТМ при интегрировании систем ОДУ.

Для осуществления модификации ТМ предложено два подхода. Первый подход основан на замене образа исходной ТМ на образ её полиномиальной части, расширенный в определенное число раз. Второй подход базируется на применении интервальной внешней оценки исходной ТМ для построения модифицированной. В работе построены соответствующие алгоритмы, а также сформулировано и доказано (для двух алгоритмов) утверждение о включении образа исходной ТМ в образ модифицированной. Данное утверждение гарантирует, что при использовании модифицированных ТМ для интегрирования систем ОДУ будет построена гарантированная оценка на решение исходной задачи.

Далее в работе построен алгоритм интегрирования систем ОДУ с помощью модифицированных ТМ, сформулировано и доказано утверждение, обосновывающее возможность использования данного алгоритма при интегрировании систем ОДУ.

Сравнение алгоритмов интегрирования проведено на примере построения периодической траектории решения системы уравнений Ван дер Поля. При этом использовались ТМ с полиномом второй степени. Показано, что алгоритм, не включающий модификацию ТМ, и алгоритм с модификацией по первому способу не позволяют описать множество решений задачи даже за один период (наблюдается экспоненциальное расширение множества решений при движении по траектории). Траекторию решения задачи за один период позволяет описать только алгоритм, включающий модификацию ТМ по второму способу. Кроме того, при движении по траектории, множество решений, описываемых ТМ, сужается, что косвенно может быть использовано при доказательстве существования периодического решения в системе Ван дер Поля и в перспективе в более сложных системах.

Литература

- [1] Евстигнеев Н. М., Рябков О. И. К вопросу о применении интервальных моделей Тейлора к вычислительному доказательству существования периодических траекторий в системах обыкновенных дифференциальных уравнений // Дифференциальные уравнения. 2018. Т. 54, № 4. С. 530–543.
- [2] Евстигнеев Н. М., Рябков О. И. Об алгоритмах построения изолирующих множеств фазовых потоков и вычислительных доказательствах с приме-

нением интервальных моделей Тейлора // Дифференциальные уравнения. 2019. Т. 55, № 9. С. 1242–1260.

Адаптивный метод сегментации гистологических изображений

Работа удостоена диплома II степени

Косов Александр Владимирович

Кафедра математической физики

e-mail: mos.cap14@yandex.ru

Научный руководитель — Хвостиков Александр Владимирович

За последнее десятилетие удалось достичь значительного снижения смертности от колоректального рака. Немалую роль в этом сыграло появление автоматизированных систем сегментации и исследования гистологических изображений, позволяющих в короткие сроки получить точные результаты для большого объема данных.

Целью дипломной работы является проектирование и последующая реализация адаптивного метода сегментации гистологических изображений желез, а также проверка эффективности реализации на наборе реальных данных.

В качестве материала для исследования используются изображения набора данных Warwick-QU [1, 2]. В ней собраны 165 снимков тонких срезов тканей толстой кишки, полученных с помощью микроскопа Zeiss MIRAX MIDI, а также эталонная разметка, подготовленная специалистами для каждого из изображений.

Железистые структуры преимущественно имеют эллипсовидную форму. Границы желез выражено темного цвета, что является основным критерием при их обнаружении.

Для выделения желез на гистологических изображениях был предложен адаптивный алгоритм, состоящий из двух этапов. На начальном этапе на изображение наносится равномерная сетка, после чего в каждый из ее узлов помещается центр шаблона, представляющего из себя круг, равномерно разбитый на кольцевые секторы. По данному шаблону строится граф, состоящий из вершин лежащих на лучах. Каждому из кольцевых секторов соответствует вершина, лежащая на соответствующем сектору луче. Веса вершин вычисляются как среднее значение интенсивности пикселей изображения, лежащих в соответствующем кольцевом секторе:

$$W_{ij} = \frac{1}{|\Omega_{ij}|} \sum_{u,v \in \Omega_{ij}} I(u, v)$$

На следующем шаге в графе ищется замкнутый цикл, имеющий наименьший вес. Данный цикл, перенесенный на шаблон, соответствует предполагаемому прохождению границ желез для данного узла.

Информация от каждого узла суммируется, тем самым формируя карту вероятностей расположения желез. Эта карта используется как карта высот для получения начальной сегментации с помощью алгоритма Watershed [3].

Начальная сегментация строится без учета принадлежности областей к классу желез, поэтому необходимо отсеять неподходящие области. Отсев неподходящих областей происходит на втором этапе.

Каждая из областей начальной сегментации подается на вход обученной нейронной сети, оценивающей вероятность того, что данная область — железа. На основании полученной информации строится окончательная сегментация путем отсева областей, не принадлежащих классу желез.

Нейронная сеть состоит из трех сверточных блоков, а также из двух полносвязных слоев. Два первых сверточных блока служат для выделения признаков на изображении. Третий сверточный блок служит для отсева незначимых признаков. Полносвязные слои используются непосредственно для преобразования полученных признаков в вероятность принадлежности области классу желез. В качестве оптимизатора используется оптимизатор Адама.

Данная архитектура показала наилучшие результаты среди нескольких опробованных в ходе разработки алгоритма архитектур, имеющих в своей основе два или три сверточных блока.

Основная часть алгоритма была реализована на языке программирования `python 3.7`, нейронная сеть была построена и обучена при помощи фреймворка глубокого обучения `Tensorflow`. Алгоритм успешно прошел проверку на тестовой части базы и показал свою применимость к реальным изображениям. По результатам тестирования можно утверждать, что точность алгоритма составила в среднем 82.5%, а метрика `IoU` в среднем составляет 0.66. В дальнейшем планируется тестирование алгоритма на наборе изображений `PATH-DT-MSU` [4]

Литература

- [1] Sirinukunwattana K., et al. Gland segmentation in colon histology images: The glas challenge contest // *Medical image analysis*. 2017. Vol. 35. P. 489–502.
- [2] Sirinukunwattana K., Snead D. R. J., Rajpoot N. M. A stochastic polygons model for glandular structures in colon histology images // *IEEE Transactions on medical imaging*. 2015. Vol. 34. N. 11. P. 2366–2378.
- [3] Roerdink J. B. T. M., Meijster A. The watershed transform: definitions, algorithms and parallelization strategies // *Fundamenta informaticae*. 2000. Vol. 41. N. 1, 2. P. 187–228.
- [4] Khvostikov A., et al. Automatic mucous glands segmentation in histological images // *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*. 2019.

Нелинейные методы подавления шума на изображениях

Работа удостоена диплома I степени

Володина Ольга Сергеевна

Кафедра математической физики

e-mail: olya.volodina@gmail.com

Научный руководитель — д.ф.-м.н. проф. Крылов Андрей Серджемич

Задача шумоподавления — одна из основных задач в области обработки изображений. Цель — убрать шум, потеряв при этом минимум информации.

Идея шумоподавления рассматриваемого алгоритма основана на том, что шум случаен, а фрагменты деталей похожи. Все похожие блоки на изображении имеют одинаковую базовую структуру и лежат в пространстве малой размерности. Как результат, задача подавления шума преобразуется в задачу восстановления матрицы малого ранга. В [1] используется следующая функция:

$$\hat{\mathbf{X}} = \arg \min_{\mathbf{X}} \frac{1}{s^2} \|\mathbf{Y} - \mathbf{X}\|_F^2 + \|\mathbf{X}\|_{\omega,*} \quad (1)$$

где \mathbf{X} , \mathbf{Y} — матрицы блоков эталонного и зашумленного изображений соответственно s^2 — дисперсия шума на изображении, $\|\mathbf{X}\|_{\omega,*} = \sum_i |\omega_i \sigma_i(\mathbf{X})|_1$, где ω_i — неотрицательный весовой коэффициент, σ_i — сингулярное значение \mathbf{X} .

Для автоматического подбора параметров был использован метод, ранее использованный в [2]. Данный метод определяет степень коррелированности пикселей на разностном кадре между зашумленным и очищенным изображениями. В идеальном случае на разностном изображении должен остаться только случайный шум. Если на нем появляются структуры, то они были стерты с исходного изображения в процессе шумоподавления.

Метод был протестирован на изображениях базы TID2013 и показал хорошие результаты по автоматическому поиску оптимальных параметров. Получаемая ошибка между оптимально очищенным изображением и изображением с автоматическим выбором параметров, практически отсутствует. Показано также, что данный метод позволяет более качественно удалять шум, чем метод Перона—Малика, основанный на использовании анизотропной диффузии [2]. Данная работа показала, что параметры алгоритма взвешенной ядерной нормы могут быть автоматически и эффективно подобраны алгоритмом, который анализирует наличие структур от исходного изображения на разностном кадре.

Литература

- [1] Gu S., Zhang L., Zuo W., Feng X. Weighted nuclear norm minimization with application to image denoising // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2014. P. 2862–2869.
- [2] Nasonov A. V., Mamaev N. V., Volodina O. S., Krylov A. S. Automatic choice of denoising parameter in Perona—Malik model // CEUR Workshop Proceedings (CEUR-WS.org). 2019. Vol. 2485. P. 144–147.

Метод автоматического анализа минерального состава руд по фотографиям аншлифов

Работа удостоена диплома III степени

Кочкарев Алексей Вячеславович

Кафедра математической физики

e-mail: kochkarev.alexey@gmail.com

Научный руководитель — д.ф.-м.н. проф. Крылов Андрей Серджевич

Анализ минерального состава руд и вмещающих пород – важная задача рудной геологии. Он используется в автоматизации разработки способов обогащения и в геолого-поисковых работах для выявления промышленного типа месторождения. На данный момент единственным доступным способом изучения минерального состава является оптический, то есть исследование подготовленных шлифов и аншлифов под микроскопом. Аншлиф представляет из себя небольшой каменный образец руды или рудного прожилка, отполированный до зеркального блеска с одной стороны.

В данной работе разработан и программно реализован алгоритм, позволяющий проводить сегментацию (сопоставление каждому пикселю изображения метки соответствующего класса) с целью определения минерального состава аншлифа [1]. Проведилась сегментация классов пирит (Py), сфалерит (Sh), галенит (Gl), остальные классы и неразмеченные области объединены в один класс — фон (Background).

Существующие алгоритмы диагностики минералов основываются на статистическом анализе изображений [2, 3]. В данной работе используется метод сегментации изображений аншлифов, основанный на применении сверточных нейронных сетей. В качестве нейросетевой модели для осуществления сегментации изображений используется сверточная нейронная сеть U-Net [4], модифицированная так, чтобы она могла работать с меньшим количеством обучающих данных и делала более точную сегментацию.

В качестве набора для обучения и тестирования используются изображения, предоставленные кафедрой геологии, геохимии и экономики полезных ископаемых геологического факультета МГУ. В работе используется искусственное расширение данных — аугментация.

Данная задача характерна несбалансированностью исходных данных, так как процентное соотношение минералов составляет: Background 33.7%, Sh 29.3%, Py 30.2%, Gl 6.7%.

Ввиду того, что на каждом шаге в нейронную сеть подается набор из случайно вырезанных блоков (патчей), число пикселей наиболее редких минералов может составлять менее 3% от общего числа пикселей. Такая несбалансированность приведет к тому, что нейронная сеть будет хуже предсказывать наиболее редкие минералы.

В данной ВКР был разработан алгоритм, позволяющий уравнивать количество пикселей для каждого класса, среди данных, поступающих на вход нейросети.

Основная идея заключается в том, чтобы выбирать блок не произвольным образом, а так, чтобы процентное соотношение пикселей каждого минерала было сбалансированно. Для этого на каждом изображении строится карта вероятностей выбора патча для каждого класса. «Горячие» области на этой карте показывают те зоны, при выборе левого верхнего угла патча в которых, получится захватить наибольшее количество пикселей данного класса. Алгоритм балансировки состоит из трех шагов:

1. Строится карта расстояний до каждого класса при помощи Distance Transform [5].
2. По полученной карте расстояний строится интегральное изображение [6].
3. При помощи интегрального изображения вычисляется сумма значений в каждой прямоугольной области и нормируется.

В результате использования разработанного алгоритма удалось добиться равного соотношения пикселей для каждого из классов (по 25%) на каждый среди данных, подающихся на вход нейросети.

Метод реализован на языке Python 3 с использованием фреймворка Tensorflow. Средний процент правильной сегментации на тестовых изображениях составил 92.4%, а среднее значение меры IoU по тестовой выборке составляет 0.76.

Работа проводилась в сотрудничестве с геологическим факультетом МГУ. Реализованный метод сегментации может быть использован для анализа минерального состава руд по фотографиям аншлифов.

Литература

- [1] Martínez-Martínez J., Benavente D., Del Cura M. A. G. Petrographic quantification of brecciated rocks by image analysis. Application to the interpretation of elastic wave velocities // Engineering geology. 2007. Vol. 90, N 1-2. P. 41–54.
- [2] Berrezueta E., et al. Ore petrography using optical image analysis: application to Zaruma–Portovelo deposit (Ecuador) // Geosciences. 2016. Vol. 6, N 2. P. 30.
- [3] Catalina J. C., et al. Use of multi-spectral analysis for automatic identification of ores // Geogaceta. 2009. Vol. 46. P. 47–50.
- [4] Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation // International Conference on Medical image computing and computer-assisted intervention. Springer, Cham, 2015. P. 234–241.
- [5] Fabbri R., et al. 2D Euclidean distance transform algorithms: A comparative survey // ACM Computing Surveys (CSUR). 2008. Vol. 40, N 1. P. 1–44.
- [6] Bradley D., Roth G. Adaptive thresholding using the integral image // Journal of graphics tools. 2007. Vol. 12, N 2. P. 13–21.

Метод анализа движения субклеточных структур на микроскопических изображениях

Работа удостоена диплома II степени

Кононыхин Данил Александрович

Кафедра математической физики

e-mail: danil.kononyhin@mail.ru

Научный руководитель — к.ф.-м.н. с.н.с. Сорокин Дмитрий Васильевич

За работу мышц отвечают два сократительных белка — актин и миозин. Чтобы характеризовать мутации, ведущие к нарушениям функции мышц, необходимо понять, что происходит в мышцах на молекулярном уровне.

Исследовать взаимодействие актина и миозина в самих мышцах не представляется возможным. Однако можно провести анализ их подвижности в искусственной подвижной пробе (*in vitro motility assay*, IVMA). Молекулы миозина иммобилизуются на стекле микроячейки, в которую добавляют флуоресцентно окрашенные актиновые филаменты. В результате их взаимодействия, актиновые филаменты движутся и за ними можно наблюдать с помощью микроскопа (рис. 1). Это позволяет измерять скорость движения филаментов, анализируя которую можно изучать эффекты различных мутаций сократительных белков и их роль в развитии мышечных заболеваний. Для определения скорости филаментов, их сначала необходимо отследить (осуществить трекинг). Данная работа посвящена разработке алгоритма трекинга актиновых филаментов на серии микроскопических изображений.

Трекинг состоит из двух шагов: детекции и соотнесения данных.

Для этапа детекции применяется метод Канни [2] для выделения хребтовых структур с некоторыми модификациями: на первом этапе детекции признаков используется поворачивающийся фильтр, а один из порогов для гистерезиса выбирается автоматически методом Отцу. После этого производится скелетонизация полученного бинаризованного изображения, чтобы сделать толщину выделенных филаментов в 1 пиксель. В результате пересечения филаментов во время их движения после скелетонизации возникают следующие проблемы: разорвавшиеся филаменты (которые нужно склеить) и склеенные филаменты (их, наоборот, нужно разделить). Для решения вышеобозначенных проблем используется информация с нескольких кадров, а для анализа получившихся агрегированных изображений применяется метод FIRE [4]. Были разработаны два алгоритма для борьбы с упомянутыми выше проблемами.

Для соотнесения данных был выбран жадный метод ближайшего соседа, где расстояние между филаментами считается как расстояние между центрами масс. Проводится дополнительная фильтрация по длине филаментов.

Алгоритм был протестирован на данных, предоставленных НИИ Механики МГУ и Институтом Иммунологии и Физиологии УрО РАН. На вручную размеченных данных разработанный метод показал себя лучше, чем существующий

метод трекинга филаментов FAST [1], по точности детекции (измерялась с помощью характеристики MOTA [3]).

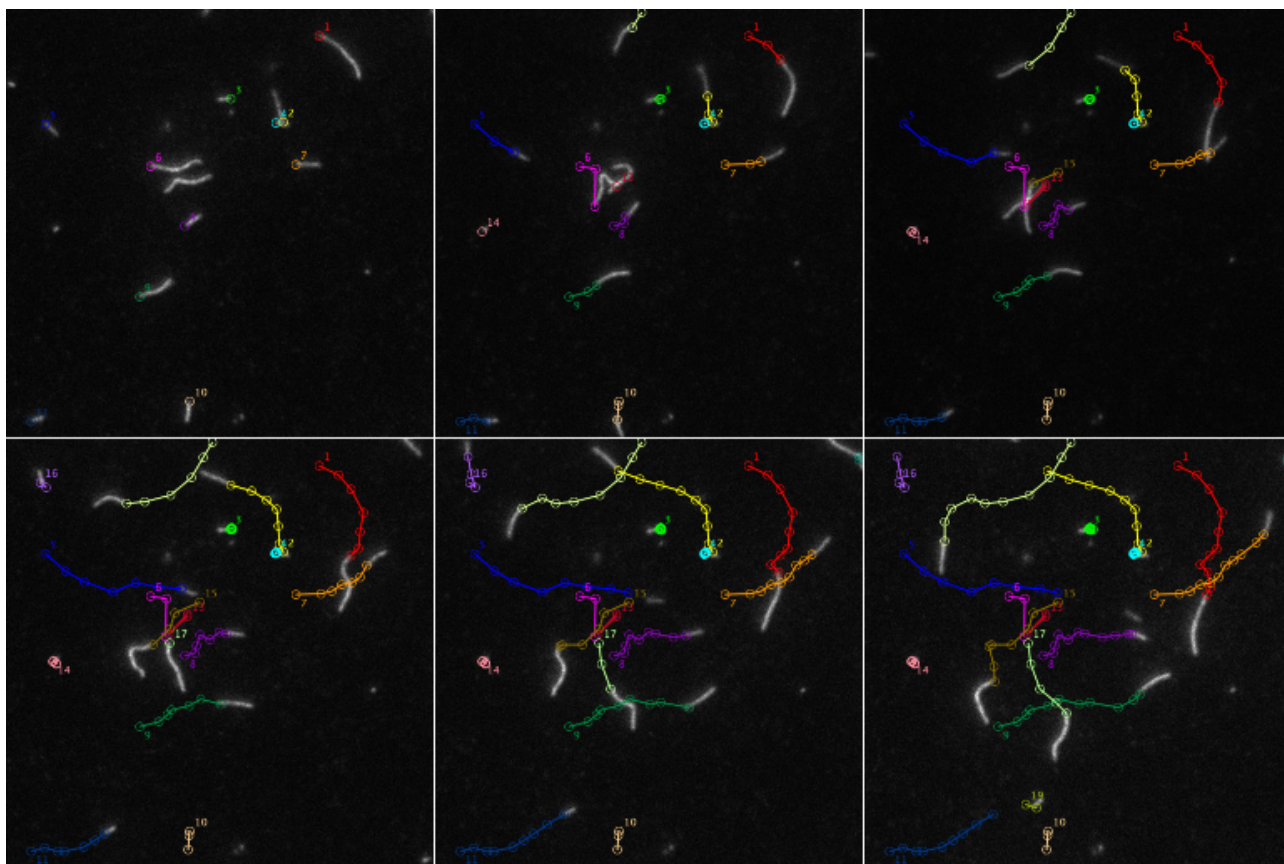


Рис. 1: Результат трекинга филаментов. Слева направо сверху вниз показано каждое третье изображение последовательности. Отслеживались хвосты филаментов.

Литература

- [1] Aksel Tural, et al. Ensemble force changes that result from human cardiac myosin mutations and a small-molecule effector // Cell reports. 2015. Vol. 11. P. 910–920.
- [2] Jacob M., Unser M. Design of steerable filters for feature detection using canny-like criteria // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2004. Vol. 26, N 8. P. 1007–1019.
- [3] Bernardin Keni, Stiefelhagen Rainer Evaluating multiple object tracking performance: The CLEAR MOT metrics // EURASIP Journal on Image and Video Processing. 2008. Vol. 2008. P. 1–10.
- [4] Andrew Stein, David Vader, Louise Jawerth, et al. An algorithm for extracting the network geometry of 3D collagen gels // Journal of microscopy. 2009. Vol. 232. P. 463–75.

Метод сегментации изображений радужной оболочки глаза

Тихонова Варвара Андреевна

Кафедра математической физики

e-mail: mellinae@yandex.ru

Научный руководитель — к.ф.-м.н. Павельева Елена Александровна

Распознавание по радужной оболочке глаза — это один из наиболее точных методов биометрической идентификации человека на сегодняшний день. Для того, чтобы выделить на изображении глаза необходимые для идентификации человека признаки, нужно выполнить сегментацию изображения: выделить внутреннюю и внешнюю границы радужной оболочки, определить области наложения век и ресниц. Результатом сегментации является маска — бинарное изображение, на котором выделена не закрытая веками и ресницами область радужной оболочки глаза.

В работе разработан метод сегментации изображений радужной оболочки глаза на основе применения нейронных сетей и классических математических методов. Для нахождения внутренней и внешней границ радужной оболочки глаза используется модифицированный интегро-дифференциальный метод Даугмана [1]. В методе Даугмана происходит поиск внутренней и внешней границ радужной оболочки глаза в виде окружностей по формуле:

$$\max_{(r, x_0, y_0)} \left| G_{\sigma}(r) * \frac{\partial}{\partial r} \oint_{r, x_0, y_0} \frac{I(x, y)}{2 \cdot \pi \cdot r} \right|,$$

где $*$ — оператор свёртки, $G_{\sigma}(r)$ — функция Гаусса с параметром σ , $I(x, y)$ — функция интенсивности изображения. Интегрирование ведётся по окружности радиуса r с центром в точке (x_0, y_0) .

Поскольку границы радужной оболочки не всегда имеют форму окружностей, а также могут быть перекрыты бликами, веками и ресницами, метод был модифицирован (рис. 1g): интегрирование при поиске внешней границы велось не по всей окружности, а по областям с учётом их суммарной интенсивности, а внутренняя граница впоследствии уточнялась с помощью применения алгоритма Канни.

На следующем этапе с помощью нейронной сети на основе архитектуры Unet [2] определяется маска радужной оболочки глаза (рис. 1b). Обученная на исходных изображениях нейронная сеть плохо выделяет тонкие ресницы, поэтому в работе для уточнения тонких ресниц и их концов применена вторая нейронная сеть, обученная на увеличенных изображениях (рис. 1c).

Чтобы уточнить области ресниц и связать предсказанные нейронными сетями маски, используется модифицированный метод кривизн [3]: изображение представляется в виде трёхмерной поверхности, на которой исследуются направления и величины кривизн, задаваемые собственными векторами и собственными значениями матрицы Гессе. Поэтапно двигаясь из точек ресниц на исходном изображении и точек, найденных с помощью нейронных сетей,

по направлению минимальной кривизны на расстояние, пропорциональное значению максимальной кривизны, находятся другие точки ресниц. На рисунке 1d–f представлены результаты применения этапов метода кривизн.

Результат работы предложенного метода представлен на рисунке 1h. Метод был протестирован на изображениях тестовой базы данных Casia Iris V4 [4] и показал хорошую точность.

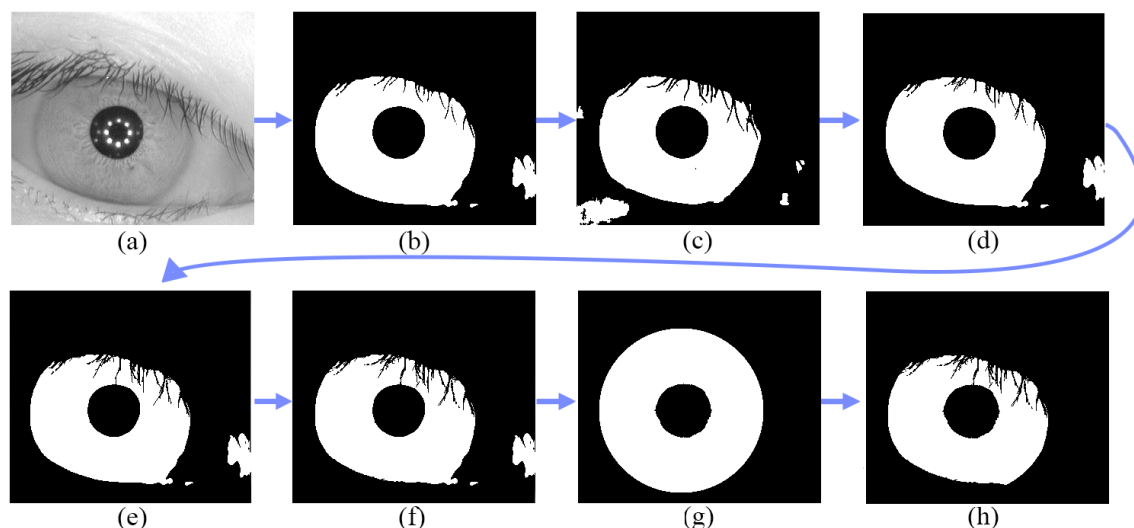


Рис. 1: (a) — исходное изображение; (b) — маска, предсказанная первой нейронной сетью; (c) — маска, предсказанная второй нейронной сетью; (d)–(f) — результаты применения метода кривизн; (g) — границы радужной оболочки, определённые модифицированным методом Даугмана; (h) — результат работы метода.

Литература

- [1] Daugman J. G. High confidence visual recognition of persons by a test of statistical independence // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. 1993. T. 15, N 11. P. 1148–1161.
- [2] Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation // International Conference on Medical image computing and computerassisted intervention. 2015. P. 234–241.
- [3] Choi J. H., Song W., Kim T., Lee S. R., Kim H. C. Finger vein extraction using gradient normalization and principal curvature // Image Processing: Machine Vision Applications II. International Society for Optics and Photonics, 2009. Vol. 7251. P. 725111.
- [4] CASIA Iris Image Database. URL: <http://idealtest.org/dbDetailForUser.do?id=4>

Сравнение методов граничных интегральных уравнений со слабой и сильной особенностями в задачах электромагнитного рассеяния

Работа удостоена диплома II степени

Кириллов Вячеслав Игоревич

Кафедра вычислительных технологий и моделирования

e-mail: sl.kirilloff@gmail.com

Научный руководитель — д.ф.-м.н. проф. Сетуха Алексей Викторович

Введение. В работе рассматривается приложение метода граничных интегральных уравнений к задаче рассеяния электромагнитной волны на идеально проводящих телах. Реализован численно метод, основанный на представлении вторичного электромагнитного поля через так называемые эквивалентные магнитные токи на поверхности тела и сведении задачи к граничному интегральному уравнению Фредгольма второго рода со слабо сингулярным ядром [1]. В работе также представлено сравнение этого метода с альтернативным методом, описанным в работе [2] и основанным на сведении задачи к граничному гиперсингулярному интегральному уравнению.

Основные теоретические сведения. Вторичное электрическое поле можно представить через магнитные токи на поверхности тела Σ с помощью формулы $\vec{E}(x) = R[\Sigma, \vec{j}](x)$, где оператор в правой части имеет вид:

$$R[\Sigma, \vec{j}](x) = \int_{\Sigma} \text{rot}_y[\vec{j}(y)\Phi(x-y)]d\sigma_y = \int_{\Sigma} \vec{j}(y) \times \text{grad}_y\Phi(x-y)d\sigma_y, \quad (1)$$

где $\Phi(x-y) = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{e^{ik(x-y)}}{x-y}$, а k — волновое число для падающей волны. Из граничного условия об отсутствии касательной компоненты полного электрического поля на поверхности тела возникает интегральное уравнение Фредгольма второго рода:

$$\frac{1}{2}\vec{j}(x) + \vec{n} \times R[\Sigma, \vec{j}](x) = -\vec{n} \times \vec{E}_{ent} = \vec{f}, \quad (2)$$

где $x \in \Sigma$, \vec{E}_{ent} — падающее электрическое поле.

Численная схема решения задачи дифракции. Численное решение интегрального уравнения (2) основано на методе кусочно-постоянных аппроксимаций и коллокаций. Поверхность тела разбивается на ячейки σ_i . На каждой ячейке выбирается точка коллокации x_i , вектор нормали \vec{n}_i , и вектора \vec{e}_i^1 и \vec{e}_i^2 , причем вектора \vec{n}_i , \vec{e}_i^1 и \vec{e}_i^2 образуют на каждой ячейке локальную ортонормированную систему векторов. Таким образом, если векторное поле $\vec{j}(x)$ аппроксимировать набором значений в точках коллокации $\vec{j}(x_i) = \vec{j}_i$, то оператор (1) приближенно будет иметь вид:

$$R[\Sigma, \vec{j}] = \sum_{i=1}^n R[\sigma_i, \vec{j}_i] \quad (3)$$

Интегралы в (3) под знаком суммы предлагается вычислять по формулам типа прямоугольников с доразбиением ячеек σ_i и сглаживанием особенности в ядре [3]. В результате получаем систему операторных уравнений

$$\frac{1}{2}\vec{j}_i + \sum_{k=1}^n \vec{n}_i \times R[\sigma_k, \vec{j}_k](x^i) = \vec{f}^i. \quad (4)$$

Система (4) сводится к системе линейных алгебраических уравнений, решая которую можно получить неизвестные магнитные токи на поверхности тела.

Расчет диаграммы направленности. В результате численного решения задачи имеется возможность определять распределение электромагнитного поля в ближней и дальней зонах и строить диаграмму рассеяния. Для этого для каждого вектора τ , задающего направление в пространстве, вводится эффективная площадь рассеяния в направлении этого вектора:

$$\sigma(\tau) = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E(R\tau)|^2}{|E_{ent}|^2}, \quad (5)$$

где E_{ent} — напряженность падающего электрического поля, а $E(R\tau)$ — напряженность отраженного электрического поля в точке с радиус вектором $R\tau$.

Результаты сравнения численных методов. Для сравнения результатов, полученных с помощью метода слабо сингулярных интегральных уравнений, с результатами, полученными с помощью метода гиперсингулярных интегральных уравнений в работе [2], были выполнены тестовые расчеты диаграмм рассеяния для идеально проводящей сферы на различных сетках разбиения тела (450, 1250 и 5400 ячеек), а также для различных значений волнового числа падающей волны ($k = 4.1$ и $k = 10$).

Результаты сравнения показали, что для волнового числа $k = 4.1$ оба метода на всех сетках дают диаграмму рассеяния, близкую к теоретической. Для волнового числа $k = 10$, метод гиперсингулярных уравнений при грубых разбиениях показывает значительно лучшие результаты, однако он медленно сходится к теоретической кривой при повышении числа ячеек разбиения.

Литература

- [1] Хёйл Х., Мауэ А., Веспфаль К. Теория дифракции. М. : Мир, 1964. 428 с.
- [2] Захаров Е. В., Рыжаков Г. В., Сетуха А. В. Численное решение трехмерных задач дифракции электромагнитных волн на системе идеальнопроводящих поверхностей методом гиперсингулярных интегральных уравнений // Дифференциальные уравнения. 2014. Т. 50, № 9. С. 1253–1263.
- [3] Захаров Е. В., Сетуха А. В., Безобразова Е. Н. Метод гиперсингулярных интегральных уравнений в трехмерной задаче дифракции электромагнитных волн на кусочно-однородном диэлектрическом теле // Дифференциальные уравнения. 2015. Т. 51, № 9. С. 1206–1219.

Разработка метода шаблонов для выявления патологий в кровеносной системе

Работа удостоена диплома I степени

Уваркин Илья Геннадьевич

Кафедра вычислительных методов

e-mail: lyuha1504@yandex.ru

Научный руководитель — д.ф.-м.н. проф. Мухин Сергей Иванович

Патологии кровотока являются одной из самых частых причин проблем со здоровьем. Своевременное и корректное обнаружение этих патологий может помочь при постановке диагноза и назначении дальнейшего лечения для пациента. Возможность определения по данным, полученных при помощи медицинских приборов, на «периферии» человеческого организма (например, конечности) наличия или отсутствия той или иной патологии кровотока во внутренних органах (например, печени) сильно облегчает задачу, если эта возможность имеется.

Зачастую приходится иметь дело с неточными, искаженными данными с сосудов кровеносной системы в силу погрешности измерения параметров кровотока медицинскими приборами. В работе предложен и описан общий алгоритм возможного метода определения наличия или отсутствия патологии по искаженным данным с сосудов. В рамках работы метод называется методом шаблонов.

Были предприняты первые шаги к реализации медицинского «паспорта» человека, по которому можно решить поставленную задачу. Программный комплекс CVSS позволяет проводить вычислительные эксперименты (ВЭ) с графом кровеносных сосудов с получением всех необходимых данных с любого сосуда графа [1,2]. Пусть в результате ВЭ генерируется файл с данными, полученными с некоторого подмножества сосудов этого графа на некотором временном отрезке. Данные представляют собой значения некоторых функций параметров кровотока в сосудах, зависящие от времени. Данные могут быть как «чистые», т. е. вычисленные CVSS непосредственно, так и искаженные, т. е. с искажениями, имитирующими неточности при измерении медицинскими приборами. Файл, в который были записаны «чистые» данные, будем называть шаблоном, а файл, в который были записаны искаженные данные, будем называть зашумленным файлом.

Задача состоит в определении наличия или отсутствия патологии кровотока по искаженным данным (рассматриваемому зашумленному файлу) и шаблонам, соответствующим графам с патологией и без нее.

Описан признак (признак близости), по которому зашумленному файлу ставится в соответствие тот или иной шаблон. Введено понятие пригодных для метода множества сосудов, т. е. множества таких сосудов, по которому, с применением данного признака близости, метод шаблонов корректно определяет наличие или отсутствие патологии кровотока.

Помимо описания общего алгоритма метода шаблонов в работе описаны требования к работе метода для приближения его к возможному практическому применению.

Также рассматривается частный случай метода. В настоящей работе проанализирована его работа на решении модельной задачи выявления поражения печени [3], приводящего к портальной гипертензии [4], получены пригодные множества для рассмотренных случаев.

Литература

- [1] Математические модели квази-одномерной гемодинамики / В. Б. Кошелев, С. И. Мухин, Н. В. Соснин, А. П. Фаворский // М. : МАКС Пресс, 2010. 116 с.
- [2] Математическая модель гемодинамики сердечно-сосудистой системы / М. В. Абакумов, К. В. Гаврилюк, Н. Б. Есикова, А. В. Лукшин, С. И. Мухин, Н. В. Соснин, В. Ф. Тишкин, А. П. Фаворский // Дифференц. уравнения. 1997. Т. 33, № 7, С. 892–898.
- [3] Математическое моделирование кровотока в системе сосудов печени / Т. Р. Жалеев, В. А. Кубышкин, С. И. Мухин, А. Ф. Рубина, А. Б. Хруленко.
- [4] Карман А. Д., Казушик В. Л. Портальная гипертензия: учеб.-метод. пособие // Минск : БГМУ, 2014. 40 с.

Исследование возможности определения инфракрасных изображений, формируемых при отражении от пластика или стекла

Балобанова Надежда Алексеевна

Кафедра вычислительных методов

e-mail: nadiadality@gmail.com

Научный руководитель — д.ф.-м.н. проф. Трофимов Вячеслав Анатольевич

В современном мире исследование инфракрасных изображений получило широкое распространение в различных областях. Одним из новых применений инфракрасной фотографии является обнаружение предметов за некоторыми препятствиями с помощью снимка в инфракрасном диапазоне, включая их расположение внутри тела человека и под одеждой человека. Впервые такие исследования были выполнены в [1] и [2, 3] соответственно.

В настоящей работе проводились эксперименты с целью исследования возможности использования инфракрасных камер для обнаружения объекта за стеклянным, пластиковым или деревянным материалом, а также при отражении инфракрасного отражения от них. Съемка проводилась при одних и тех же температурных условиях без использования кондиционера в случае наличия электрического освещения предметов, либо в темноте, либо подсветкой светом от диодного фонаря (холодный свет) в темноте. Инфракрасные изображения, полученные инфракрасной камерой FLIR T620, переводились в режим серых тонов и подвергались обработке фильтрами свертки для улучшения качества.

Результаты экспериментов **впервые демонстрируют возможность обнаружение некоторых предметов за пластиковым листом и за деревянной дверью шкафа**. В частности, показано, что можно прочесть название книги, расположенной за деревянной дверью. При этом отраженное излучение от пластика или деревянной двери позволяют полностью увидеть предмет.

Предметы, расположенные за стеклом, обнаружить к настоящему времени не удалось (что вполне объяснимо) и это представляет собой предмет будущих исследований. Однако, эксперименты по обнаружению человека за пластиковым листом и стеклом впервые показывают принципиальную возможность обнаружения человека, находящегося за стеклом.

Для достижения полученных результатов было показано, что необходимо специальным образом устанавливать температурный диапазон съемки, определяемый температурой комнаты. Автоматический температурный интервал, выбранный камерой, не дает положительного результата. Следует также подчеркнуть, использование широко распространенных фильтров обработки видеоизображений не дает заметного улучшения качества инфракрасных изображений, получаемых в условиях данных экспериментов. Поэтому имеется необходимость дальнейшей разработки специальных методов обработки данного класса изображений.

Литература

- [1] Trofimov V. A., Trofimov V. V. Observation of temperature trace, induced by changing of temperature inside the human body, on the human body skin using commercially available IR camera // Proceedings of SPIE. 2015. Vol. 9485. Paper number 94851H.
- [2] Trofimov V. A., Trofimov V. V., Shestakov Ivan L., Blednov R. G. About possibility of temperature trace observing on a human skin through clothes by using computer processing of IR image // Proceedings of SPIE. 2017. Vol. 10214. P. 102140E. DOI: 10.1117/12.2263637.
- [3] Trofimov V. A., Kovalev V. Yu., Trofimov V. V. Efficiency of IR camera using for detection of hidden objects on human body // Proceedings of SPIE. 2018. Vol. 10661. Paper number 1066112.

Исследование возможностей применения методов искусственного интеллекта к результатам моделирования кровеносной системы

Работа удостоена диплома II степени

Кочетов Егор Владимирович

Кафедра вычислительных методов

e-mail: zikilor@yandex.ru

Научный руководитель — д.ф.-м.н. проф. Мухин Сергей Иванович

В данной работе осуществлено исследование возможности совместить средства классического математического моделирования гемодинамики и средства

искусственного интеллекта (нейронные сети) для взаимного дополнения и развития. Рассматривалась хорошо зарекомендовавшая себя модель [3] системы кровообращения, используемая для моделирования явления печеночной гипертензии — существенного изменения кровотока организма при поражениях печени. Данная модель позволяет рассчитывать параметры кровотока в любой точке системы сосудов человека, как в норме, так и патологии (при различных степенях поражения печени). Результаты этих расчетов на большом количестве (порядка нескольких тысяч) графов систем сосудов, отличающихся своими параметрами (некий аналог рассмотрения различных пациентов на практике) рассматриваются как обучающая выборка для достаточно простой однослойной нейросети. Создание этой сети, исследование ее свойств и реализации при различных функциях активации и значениях параметров подробно описаны в работе. Задачей нейросети является диагностика указанного заболевания по тестовой выборке, также полученной путем математического моделирования. Математическое моделирование осуществлялось с помощью программного комплекса CVSS [1, 2]. Целью работы являются исследование возможности такой диагностики и выбор параметров течения крови и мест их измерений для достаточно точного диагностирования.

Результаты многочисленных вычислительных экспериментов показали, что реализованная однослойная нейронная сеть с линейной функцией активации для бинарной классификации достаточно успешно решала поставленную задачу. В частности, показано, что некоторые модификации архитектуры сети позволяли осуществлять правильную диагностику заболевания в 97.19% случаях по данным небольшого количества сосудов правой руки. Из исследований, приведенных в работе, следует, что, применительно к результатам математического моделирования, с помощью достаточно простой нейронной сети можно диагностировать рассмотренную патологию кровотока по косвенным данным в сосудах, доступных для не инвазивного снятия параметров кровотока.

Литература

- [1] Ашметков И. В., Буничева А. Я., Лукшин В. А. и др. Математическое моделирование кровообращения на основе программного комплекса cvss // Компьютерные модели и прогресс медицины. М. : Наука, 2001. С. 194–218.
- [2] Буничева А. Я., Мухин С. И., Соснин Н. В., Хруленко А. Б. Математическое моделирование квазиодномерной гемодинамики /// Журнал вычислительной математики и математической физики. 2015. Т. 55, № 8. С. 1417–1428.
- [3] Жалеев Т. Р., Кубышкин В. А., Мухин С. И. и др. Математическое моделирование кровотока в системе сосудов печени // Прикладная математика и информатика: Труды факультета ВМК МГУ имени М.В. Ломоносова / Под ред. В. И. Дмитриева. М.: МАКС Пресс. 2019. № 61. С. 42–56.

Разрывный метод частиц для двумерного нелинейного переноса

Филиппова Мария Анатольевна

Кафедра вычислительных методов

e-mail: mariyaph17@gmail.com

Научный руководитель — д.ф.-м.н. проф. Богомолов Сергей Владимирович

Разработка различных вариантов метода частиц имеет большую историю [1]. Изначально метод применялся для решения задач газодинамики, но позже стал ведущим методом для решения задач физики плазмы. В данной работе исследуется разрывный метод частиц [2] в применении к уравнениям Хопфа и Бюргерса. Эти уравнения являются модельными для изучения явлений, описываемых уравнениями Навье—Стокса. Разрывный метод частиц хорошо обрабатывает разрывы, он не требует гладкости решения, так как является способом получения обобщённого решения и экономичен для многомерных задач, поскольку число уравнений, описывающих поведение частиц, пропорционально числу измерений.

Метод частиц основан на микроскопической постановке задачи. В настоящей работе для одномерного линейного переноса продемонстрирован микро-макро переход, показывающий связь с представлениями сплошной среды. Описан алгоритм разрывного метода частиц, который строится как предиктор-корректор с особым способом восстановления плотности распределения частиц. Найдено численное решение задачи Коши для уравнения Хопфа с различными начальными данными, сравнение которого с точными решениями показало, что разрывный метод частиц прекрасно передает аналитическое решение, а именно, сглаживает разрыв только на одну частицу. Для уравнения Бюргерса реализован способ монотонизации решения путём введения процессов рождения и гибели частиц. Численное решение уравнения Бюргерса показало, что представленный способ подавляет появление немонотонностей решения.

Далее, разрывный метод частиц реализован для численного решения системы двумерных квазилинейных уравнений переноса. Описан алгоритм с расщеплением с новым способом выбора взаимодействующих частиц по значению прицельного параметра. Численные эксперименты с помощью развитого алгоритма показали, что разрывный метод частиц, как и в одномерном случае, сглаживает разрыв только на частицах, находящихся на фронте движущегося разрыва. В случае начальной функции в виде пирамиды проведено сравнение численных решений, полученных разрывным методом частиц и с помощью разностной схемы уголок, которое показало несомненное преимущество нашего метода частиц.

Литература

- [1] Хокни Р., Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц. М. : Мир, 1987. 640 с.

- [2] Баев А. Ж., Богомолов С. В. Об устойчивости разрывного метода частиц для уравнения переноса // Математическое моделирование. 2017. Т. 29. № 9. С. 3–18.

Восстановление табличных данных вариационным методом с учетом ошибок

Работа удостоена диплома III степени

Козьякин Денис Аркадьевич

Кафедра вычислительных методов

e-mail: dkozyaikin@gmail.com

Научный руководитель — к.ф.-м.н. доц. Терновский Владимир Владимирович

В работе рассматривается проблема восстановления табличных данных, заданных в виде вещественной двумерной матрицы. Исходные данные искажены добавочным шумом или искажающей функцией. Идея метода основана на экспериментальном факте увеличении площади поверхности данных под воздействием помех. Метод опирается на матрицу с искаженными данными и численный параметр задачи.

Вариационный принцип может быть формализован таким образом: пусть восстанавливаемая функция лежит на поверхности так, чтобы поверхность проходила внутри доверительных интервалов и имела минимально возможную площадь [1]. Неизвестная функция определяется задачей минимизации на условный экстремум функционала площади

$$u = \arg \min_{u(x,y) \in U} \iint_{\Omega} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2} dx dy;$$

На множество допустимых значений функции наложено ограничение в виде объединения неравенств

$$U = \left\{ \bigcup_{i,j=1}^{N,M} |u(x_i, y_j) - a_{ij}| \leq \sigma_{ij} \right\}$$

σ_{ij} — уровень ошибки в узле (x_i, y_j) расчетной сетки, покрывающей расчетную область Ω . Уровень ошибки может быть определен из погрешности измерения устройства, сгенерировавшего искаженные данные. В случае отсутствия информации об уровне ошибок σ воспринимается как численный параметр задачи, который необходимо варьировать от больших значений к меньшим для изменения доверительных интервалов и улучшения качества восстановления данных. Если σ больше максимального значения добавочного шума, тогда решение экстремальной задачи вырождается в плоскость ($\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial y} = 0$), $S = \text{mes}(\Omega)$, и эксперимент по восстановлению следует повторить с меньшим значением σ . По терминологии академика А.Н. Тихонова, рассматриваемая задача минимизации является некорректной [2]. Если неизвестны ошибки σ_{ij} , тогда возможно провести бесконечно много поверхностей, и ни «точно», ни

приближенно решить задачу не получится. Минимизация функционала проводится методом, избегающим попадание в локальный экстремум. Значения интегралов, входящих в состав экстремальной задачи и выражения для значения восстанавливаемой функции, вычисляются по кубатурным и квадратурным формулам. Веса квадратурной формулы следует менять при вычислении значения функции в каждом новом узле подобно методу обратного распространения ошибки. Правило изменения весов формулы зависят от искажающей функции.

Рассматриваемый метод позволяет заранее оценить результаты эксперимента. В случае вырождения результата восстановления в плоскость эксперимент прерывается и повторяется с меньшим значением численного параметра. В вычислениях не используется численное дифференцирование, что позволяет избежать накопления ошибки. Также данный подход не использует метод наименьших квадратов для определения восстанавливаемой функции и представление ее в виде функционального ряда, что позволяет избежать регуляризацию метода в случае плохой обусловленности системы уравнений, определяющей коэффициенты функционального ряда [3].

Работа включает в себя разработанную на языке Python 3.8 программу для визуализации и моделирования аддитивных искажений и последующего восстановления таблиц вещественных данных. Также была разработана программа для моделирования зашумления цветных изображений и дальнейшего применения описанного метода для восстановления исходного изображения. Для ускорения восстановления изображения использовалась параллелизация алгоритма по каждой компоненте цветовой палитры при помощи модуля multiprocessing для языка Python 3.8.

Литература

- [1] Терновский В. В., Хапаев М. М. Поверхность данных физического эксперимента // Доклады академии наук. 2012. Т. 445, № 4. С. 393–395.
- [2] Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М: Наука. 1986. С. 288.
- [3] Ерохин В. И., Волков В. В. О регуляризованном методе наименьших квадратов А. Н. Тихонова // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2017. № 1.

Сегментация зашумлённых речевых сигналов

Работа удостоена диплома III степени

Процеров Сергей Дмитриевич

Кафедра автоматизации научных исследований

e-mail: sergey.protserov@gmail.com

Научный руководитель — д.ф.-м.н. проф. Шишкин Алексей Геннадиевич

Одной из наиболее важных задач в области цифровой обработки речевых сигналов является обнаружение голосовой активности во входном акустическом сигнале для отделения активной речи от фонового шума или тишины.

Решение данной задачи имеет ряд очень важных практических приложений, таких как анализ речи в голосовых командных системах или передача акустических данных по сети. Использование высокоэффективного механизма сегментации речи и пауз дает возможность не только избавиться от ошибок, связанных с интерпретацией речевой активности, но и позволяет экономить на передаче данных по каналу связи благодаря отказу от оцифровки и кодирования пауз между речью. Однако большинство имеющихся систем автоматического анализа речевых сигналов плохо справляются с этой задачей при малых отношениях сигнал/шум и помимо этого требуют индивидуальной настройки в зависимости от уровня шума. Вследствие этого становится невозможной полностью автоматическая сегментация входных акустических сигналов на участки речи и пауз.

В настоящей работе рассмотрена задача построения системы автоматической сегментации речевых сигналов, искажённых аддитивным шумом разного рода и разной интенсивности (50 видов шума, в том числе: смех, звуки бытовой техники, звуки животных, шум дождя, звук работы двигателя). Построена система сегментации речи на основе двух различных архитектур глубоких сверточных нейронных сетей, одна из которых принимает на вход исходный речевой сигнал, а другая — его спектрограмму. Набор данных для обучения нейронных сетей был синтезирован на основе записей, собранных в рамках проекта Mozilla Common Voice. Сгенерированный набор состоит из 36000 элементов, каждый из которых представляет собой зашумлённую запись произношений нескольких отдельных слов, размещённых в случайных позициях без наложений. Используется шум разного рода и разной интенсивности. Анализ полученных результатов показал, что разработанная система способна с высокой эффективностью автоматически определять участки речи и пауз в зашумлённых сигналах в широком диапазоне значений соотношения сигнал/шум и для различных видов шума.

Алгоритм, проверяющий *-конгруэнтность заданных комплексных матриц

Работа удостоена диплома III степени

Усов Виталий Александрович

Кафедра общей математики

e-mail: vitaliy7usov@gmail.com

Научный руководитель — д.ф.-м.н. проф. Икрамов Саидхаким Дододжанович

В настоящее время не известен рациональный алгоритм, позволяющий проверить конгруэнтность произвольных комплексных матриц A и B . В данной работе предложен рациональный алгоритм проверки, работающий при менее обременительных условиях, чем все условия, известные к настоящему времени. Под рациональным алгоритмом понимается конечный вычислительный процесс, использующий только арифметические операции.

Мы называем комплексные $n \times n$ -матрицы A и B конгруэнтными, если

$$B = S^* A S$$

для некоторой невырожденной матрицы S . Сам переход от A к B (или обратный переход от B к A) называется конгруэнтным преобразованием или конгруэнцией.

С каждой невырожденной матрицей A можно связать матрицу

$$C_A = A^{-*}A,$$

называемую коквадратом матрицы A .

Первым шагом алгоритма является проверка подобия кокквадратов исходных матриц A и B .

Теорема 1. *Для конгруэнтности невырожденных матриц A и B необходимо, чтобы их кокквадраты C_A и C_B были подобны.*

Подобие квадратных матриц может быть проверено рациональным вычислением. Далее выполняем проверку на наличие унимодулярных чисел в спектре одного из кокквадратов.

Теорема 2. *Пусть A и B — невырожденные матрицы, кокквадраты которых подобны. Если в спектре этих кокквадратов отсутствуют унимодулярные числа, то A и B конгруэнтны.*

Отсутствие унимодулярных собственных значений тоже можно проверить рационально. Предлагаемый алгоритм допускает присутствие в спектре кокквадрата единственного унимодулярного числа λ , и это допущение является его главным отличием от ранее предложенных методов. Число λ может иметь произвольную алгебраическую кратность k , но на сопутствующую жорданову структуру накладываются следующие ограничения:

- 1) λ может быть простым (при $k = 1$) либо полупростым (при $k > 1$) собственным значением кокквадратов, или
- 2) в жордановой форме кокквадратов числу $\lambda = 1$ соответствует единственная жорданова клетка порядка k ($k > 1$).

В зависимости от того, какое из этих двух условий выполнено, производится расщепление кокквадратов посредством преобразований подобия и сопутствующее расщепление исходных матриц посредством конгруэнций. Матрицы A и B конгруэнтны тогда и только тогда, когда конгруэнтны блоки, отвечающие унимодулярным числам в их расщепленных представлениях. Конгруэнтность этих блоков проверяется с помощью известных методов для эрмитовых матриц.

Литература

- [1] Икрамов Х. Д. О конечных спектральных процедурах в линейной алгебре // Программирование. 1994. № 1. С. 56–69.
- [2] Horn R. A., Johnson Ch. R. Matrix Analysis. Second Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.

- [3] Икрамов Х. Д. О конгруэнтном выделении жордановых блоков из вырожденной квадратной матрицы // Сиб. журнал вычисл. матем. 2018. 21. № 3. С. 255–258.
- [4] Krein M. G., Naimark M. A. The method of symmetric and Hermitian forms in the theory of the separation of the roots of algebraic equations // Linear Multilinear Algebra. 1981. 10. N 4. P, 265–308.

Методы идентификации динамических систем с возмущениями при помощи нейронных сетей

Работа удостоена диплома II степени

Вылегжанин Александр Сергеевич

Кафедра нелинейных динамических систем и процессов управления

e-mail: alexander2392v@gmail.com

Научный руководитель — д.ф.-м.н. проф. Фомичев Василий Владимирович

Постановка. В рамках выпускной квалификационной работы стояла задача оценки применимости нейросетевого подхода к задаче идентификации динамических систем. В работе произведена идентификация нескольких динамических систем с применением различных архитектур нейронных сетей к различного вида обучающим данным. Показано, что нейронные сети, обладая только данными о входе и выходе системы, способны хорошо аппроксимировать динамику системы. В работе выявлены сложности и ограничения данного подхода.

Обоснование подхода. Задача идентификации динамической системы заключается в том, чтобы найти её математическое представление, имея её входные и выходные данные. Обычно математическое представление системы выражается оператором F из пространства входов U в пространство выходов Y . Таким образом, одним из способов описания динамики системы является аппроксимация данного оператора с определенным уровнем точности. Универсальная теорема об аппроксимации Цыбенко [1] и ее обобщения, утверждают, что нейронные сети способны справиться с данной задачей.

Основные принципы экспериментов. В качестве данных использовалась реакция устойчивых дискретных систем на гармонические сигналы, в данные были добавлены возмущения из равномерного распределения. Обученные сети тестировались на сигналах с частотами не входившими в диапазон частот обучающих сигналов. Критерием оценки качества обучения выступала функция ошибки MSE (Mean-Square-Error) (1), в которую для борьбы с переобучением был добавлен L2-регуляризатор. Также во время обучения был использован регуляризатор Dropout [2]. В качестве алгоритмов обучения были использованы различные градиентные методы оптимизации. В качестве архитектур были выбраны различного вида рекуррентные нейронные сети (RNN, LSTM), многослойная нейронная сеть прямого распространения (MLP) и их композиции.

$$Q(\tilde{y}, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\tilde{y}_i - y_i)^2 + \lambda |w|^2 \quad (1)$$

Пример системы для генерации обучающих данных

$$\begin{cases} x_1[t+1] = x_2[t], \\ x_2[t+1] = p \cdot \sin x_1[t] + p + x_3[t], \\ x_3[t+1] = x_4[t], \\ x_4[t+1] = p \cdot x_3[t] + u[t], \\ y[t] = 3x_1[t] + 4x_2[t] + x_3^2[t] \end{cases}$$

Система была частично взята из работы [3], где был проведен анализ на устойчивость. В общем же случае, данные о входах и выходах системы могут быть получены при помощи измерительных приборов.

Подача данных в сеть. Так как выход динамической системы $y[t]$ в момент времени t в общем случае зависит от всех поданных в систему управлений $u[0], u[1], \dots, u[t-1]$, то интуитивно использовать только рекуррентные нейронные сети, которые в своей архитектуре содержат обратные связи и тем самым отлично подходят для моделирования последовательностей. Однако, можно сделать допущение, что выход в значительной степени зависит не от всех поданных в систему управлений, а лишь от фиксированного числа предыдущих моментов времени и использовать многослойную сеть прямого распространения с определенным фиксированным количеством k входов $u[t-1], u[t-2], \dots, u[t-k]$, и одним выходом $y[t]$.

Ограничения подхода. Основное ограничение связано с интерполяционной природой нейронных сетей, которая позволяет им хорошо приблизить функцию на заданной области определения, но не позволяет давать предсказание вне этой области. Таким образом, накладываются ограничения на сигналы (например на амплитуды гармонических сигналов), которые имеет смысл подавать в сеть уже после ее обучения. Также в работе оказалось важным иметь в обучающей выборке минимум по 100 измерений на каждую секунду действия каждого сигнала, что делает данный подход к идентификации относительно трудоемким с вычислительной точки зрения. Необходимо бороться с переобучением и тщательно подбирать макропараметры архитектур нейронных сетей для каждой системы.

Важные моменты. Отмечена особая эффективность адаптивных градиентных методов оптимизации Adam и Adamax [4], которые хорошо справились с аппроксимацией поведения динамических систем, в отличие от обычного стохастического градиентного спуска. Важным оказалось и наличие в нейронной сети хотя бы трех скрытых слоев, что позволяет ей хорошо моделировать нелинейности и в целом динамику системы. Выигрышным подходом оказался в данной работе многослойный персептрон (MLP). Несмотря на то что время, затрачиваемое на его обучение, на порядок меньше, чем для рекуррентных

нейронных сетей, правильно подобрав число его входов, он способен выдавать результат не хуже чем рекуррентные нейронные сети.

Выводы. Несмотря на существующие ограничения, архитектуры глубоких нейронных сетей хорошо адаптируются под задачу идентификации динамических систем. Хорошо справиться с задачей способны сразу несколько принципиально разных архитектур. Однако для различных динамических систем эти оптимальные архитектуры будут иметь различные структуры. Нейросетевой подход к идентификации является крайнем перспективным для нелинейных систем, учитывая отсутствие простых альтернатив данному подходу.

Литература

- [1] Cybenko G. V. Approximation by Superpositions of a Sigmoidal function // Mathematics of Control Signals and Systems. 1989. Vol. 2, N 4. P. 303–314.
- [2] Diederik P. Kingma, Jimmy Lei Ba. Adam A method for stochastic optimization [Электронный ресурс] // arXiv.org. 2014. arXiv:1412.6980v9
- [3] Amoura K., Wira Patrice, Djennoune Saïd. A state-space neural network for modeling dynamical nonlinear systems // Proceedings of the International Conference on Neural Computation Theory and Applications (NCTA 2011). P. 369–376.
- [4] Geoffrey E. Hinton, Nitish Srivastava, Alex Krizhevsky, Ilya Sutskever, Ruslan R. Salakhutdinov Improving neural networks by preventing co-adaptation of feature detectors [Электронный ресурс] // arXiv.org. 2012. arXiv:1207.0580 [cs.NE]

Синтез расширенного фильтра Калмана для датчиков на сегменте трубопровода с капельной жидкостью

Работа удостоена диплома I степени

Яременко Григорий Алексеевич

Кафедра нелинейных динамических систем и процессов управления

e-mail: yaremenko8@gmail.com

Научный руководитель — к.ф.-м.н. доц. Гончаров Олег Игоревич

Для задач мониторинга функционирования длинных трубопроводов большое значение имеют средства, позволяющие по показаниям датчиков восстановить параметры течения жидкости во всем трубопроводе. В частности, они могут быть использованы в целях обнаружения аварий и утечек.

В данной работе рассматривается задача восстановления параметров течения жидкости в участке трубопровода. В предположении, что доступны измерения давления и расхода на краях сегмента, а также измерения давления на некоторых заведомо неизвестных его участках строится расширенный фильтр Калмана, восстанавливающий профили скорости и давления.

Движение капельной жидкости с дозвуковой скоростью на длинном сегменте трубопровода достаточно точно описывается следующими уравнениями в частных производных [1]:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}\omega + \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial \zeta}p + \frac{\lambda}{8\delta}\omega^2 = 0, \\ \frac{\partial}{\partial t}p + c^2\rho\frac{\partial}{\partial \zeta}\omega = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Дискретизация. Одной из основных трудностей применения Калмановской фильтрации к подобной системе является то, что рассматриваемая система бесконечномерна. В первой части работы система дискретизируется при помощи явной условно устойчивой разностной схемы. При этом дискретизация производится в обобщенном виде для произвольных корректных шагов сетки $\Delta\zeta$ и Δt . Таким образом дальнейшие выкладки допускают использование сколь угодно точных аппроксимаций системы (1).

В результате такой дискретизации исходная бесконечномерная система аппроксимируется дискретной конечномерной ММО-системой, входным сигналом которой считаются значения скорости движения жидкости на краях сегмента, а выходным — значения давления в точках, где производятся измерения.

Синтез фильтра. Далее в работе для полученной системы синтезируется расширенный фильтр Калмана. В частности, выводятся расчетные формулы для матрицы эволюции системы и матрицы наблюдений, необходимых для работы фильтра. Разрабатывается метод эмпирической оценки ковариационных матриц измерительного и гидравлического шумов на основе временных рядов показаний датчиков. Разрабатывается метод оценки начального состояния системы по показаниям краевых датчиков, а также выводится расчетная формула ковариационной матрицы этой оценки.

Реализация. В ходе работы соответствующие алгоритмы синтеза фильтра и самой фильтрации были реализованы на языке программирования Python 3 с использованием вычислительных ресурсов графического процессора.

Тестирование. Фильтр был протестирован на данных, полученных путем моделирования системы. Такое тестирование позволяет непосредственно сравнить восстановленный фильтром сигнал с полезным сигналом и замерить на сколько возросло качество сигнала в результате фильтрации.

По результатам тестирования фильтр демонстрирует высокую эффективность. Ниже приведена таблица, в которой для различных относительных погрешностей указано, во сколько раз фильтр сократил ошибку показаний датчиков с соответствующими погрешностями.

Относ. погр.	Сокращение ошибки	Сокращение ошибки производной
0.1%	5.29 - 7.81	12.82 - 20.83
0.2%	16.39 - 18.51	43.48 - 52.63
0.4%	41.67 - 51.02	211.24 - 259.97
0.8%	71.42 - 83.33	987.20 - 1164.57
1.6%	66.57 - 76.92	1112.71 - 1255.14

Обнаружение утечек. Также в ходе тестирования фильтра на реальных данных было установлено, что восстановленный сигнал фильтра сильно смещается относительно показаний датчиков во время утечек. Эту особенность фильтра можно использовать в целях обнаружения гидравлических аномалий.

Литература

- [1] Чарный И. А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. М. : Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1951. С. 9–20.
- [2] Saberi Najafi H., Izadi F. Comparison of two finite-difference methods for solving the damped wave equation // International Journal of Mathematical Engineering and Science (IJMES). 2014. Т. 3, № 3. С. 35–40.
- [3] Labbe R. R. Jr. Kalman and Bayesian Filters in Python [Электронный ресурс]. URL: http://robotics.itee.uq.edu.au/~elec3004/2015/tutes/Kalman_and_Bayesian_Filters_in_Python.pdf. 2018. Р. 391–400.
- [4] Hjelmgren J. Dynamic Measurement of Pressure — A Literature Survey // SP Report 2002:34. Borås : SP Swedish National Testing and Research Institute, 2003. С. 35–39.

О задачах управления и наблюдения для осциллирующей цепи

Работа удостоена диплома III степени

Абрамова Варвара Владимировна

Кафедра системного анализа

e-mail: ruvasha@yandex.ru

Научный руководитель — акад. РАН, д.ф.-м.н. проф. Куржанский Александр Борисович

Данная работа посвящена исследованию физической системы из последовательно соединенных пружин и грузов. По данным о движении только одного из грузов цепи на фиксированном временном отрезке $[t_0, t_1]$ необходимо восстановить данные о движении цепи в целом. Описываемая задача принадлежит к классу «задач наблюдения», разновидности которых подробно разбираются в книге [1].

Предполагается, что известны количество пружин и грузов в цепи, массы грузов $m_i > 0, i = 1, \dots, n$, и коэффициенты жесткости пружин $k_i > 0, i = 1, \dots, n, k_{n+1} \geq 0$; верхний конец первой и нижний конец последней пружин цепи закреплены. Воздействие сил тяжести и сопротивления воздуха не учитывается. Такая цепь описывается системой линейных дифференциальных уравнений первого порядка, где за $x_i(t)$, взяты смещения центров масс грузов относительно их положений равновесия, $\dot{x}_{i+n}(t) = \dot{x}_i(t), i = 1, \dots, n$ — их скорости:

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = \dot{x}_{n+i}(t) \\ \dot{x}_{n+1}(t) = \frac{1}{m_1}(k_2(x_2(t) - x_1(t)) - k_1x_1(t)) \\ \dot{x}_{n+j}(t) = \frac{1}{m_j}(k_{j+1}(x_{j+1}(t) - x_j(t)) - k_j(x_j(t) - x_{j-1}(t))) \\ \dot{x}_{2n} = \frac{1}{m_n}(-k_{n+1}x_n(t) - k_n(x_n(t) - x_{n-1}(t))) \end{cases} = \dot{x}(t) = Ax(t), \quad t \in [t_0, t_1]; i = 1, \dots, n, j = 2, \dots, n-1. \quad (1)$$

В ходе исследования свойств матрицы A системы (1) было показано, что система наблюдаема для произвольных значений масс грузов и коэффициентов жесткости пружин, если известны данные о движении одного из крайних грузов.

Основным результатом данной работы является предложенный метод решения задачи наблюдения для осциллирующей цепи. Однако, его можно применять и к другим линейным наблюдаемым системам со схожими свойствами.

Метод решения. Обозначая за \tilde{i} — номер наблюдаемого груза, можно записать наблюдение как $y = x_{\tilde{i}} = Gx$, где G — вектор-строка из \mathbb{R}^{2n} с единственным ненулевым элементом на позиции \tilde{i} . Решение задачи наблюдения представляет собой поиск вектора начальных данных $x(t_0)$ по известному $x_{\tilde{i}}(t), t \in [t_0, t_1]$. Для его нахождения делается переход от задачи наблюдения к задаче управления специального вида. С помощью *проблемы моментов*

$$\int_{t_0}^{t_1} u(t) \cdot y(t) dt = \langle c, x(t_0) \rangle, \quad c \in \mathbb{R}^{2n}, u(t) \in \mathbb{R} \quad (2)$$

и замены переменных можно перейти от *наблюдаемой системы* (1) к *управляемой системе*

$$\dot{z}(t) = -A^T z(t) - G^T u(t), \quad z(t_0) = c, z(t_1) = \bar{\theta}, \quad (3)$$

связанной с фиксированным для (2) конкретным вектором c . Для (3) $u(t)$ является управлением, переводящим систему из точки c в точку $\bar{\theta}$ — начало координат в \mathbb{R}^{2n} . При выборе $u(\cdot)$ из класса кусочно непрерывных функций на отрезке $[t_0, t_1]$ со значениями из $[u_1, u_2]$, получится корректная задача оптимального управления. Тогда найдя $u_j(t), j = 1, \dots, 2n$, для соответствующих $2n$ линейно независимых векторов c_j , можно получить систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) из которых однозначно найдется вектор $x(t_0)$.

Основная идея метода решения задачи наблюдения заключается в исследовании множества разрешимости $Z[t] = \{z(t) | \exists u(\tau) \in [u_1, u_2], \tau \in [t, t_1] : z(t) = z(t, t_1, \bar{\theta}, u(\cdot))\}$ управляемой системы (3) и выборе удобных векторов c_j , для которых легко находятся порождающие управления $u_j(t)$. Для этого используются эллипсоидальные внутренние оценки множества разрешимости, схожие с оценками из книги [2]. Преимущество этих оценок заключается в том, что они касаются аппроксимируемого множества, а траектории касания оценок и порождающие их управления находятся в явном виде. В качестве c_j выбираются левые концы таких траекторий.

О программной реализации. Следствием наблюдения лишь одного груза из всей цепи будет являться вырождение внутренних оценок, поэтому в программной реализации требуется проводить регуляризацию, схожую, например, с предложенной в работе [3]. Так как численно получаемая СЛАУ будет иметь возмущение в матрице системы и в правой части, то приходится прибегать к видоизменению решаемой системы с целью повышения точности решения. Также было доказано, что нулевое решение наблюдаемой системы устойчиво по Ляпунову, но не асимптотически. Данный вывод позволяет использовать

вычисленные программно начальные данные $\tilde{x}(t_0)$ для построения решения системы близкого к точному.

Литература

- [1] Куржанский А. Б. Избранные труды А. Б. Куржанского. М. : Издательство Московского университета, 2009. 755 с.
- [2] Kurzhanski A. B., Varaiya P. Dynamics and Control of Trajectory Tubes // Theory and Computation. Basel : Birkhäuser, 2014. 445 p.
- [3] Гагаринов П. В. Вычисление проекций трубок достижимости линейных управляемых систем на основе методов эллипсоидального исчисления // Вестник московского университета. Серия 15. Вычислительная математика и кибернетика. 2007. № 1. С. 14–24

Рекуррентные уравнения для функции Беллмана в задаче суперхеджирования бинарных опционов с дискретным временем

Кулешов Игорь Александрович

Кафедра системного анализа

e-mail: i.a.kul@yandex.ru

Научный руководитель — к.ф.-м.н. доц. Смирнов Сергей Николаевич

Работа основывается на серии публикаций [1, 2], в которой развивается модель финансового рынка, связанная с детерминистическим подходом к эволюции цен с дискретным временем. Рассматривалась одномерная модель рынка, когда динамика дисконтированной цены рискованного актива описывается соотношениями:

$$X_t = M_t X_{t-1}, \quad t = 1, \dots, N,$$

где

$$M_t \in [\alpha, \beta], \quad 0 < \alpha < \beta.$$

Торговые ограничения отсутствуют, равно как трансакционные издержки. Также предполагается отсутствие арбитражных возможностей, что согласно [2] в данной модели эквивалентно соотношению:

$$\alpha < 1 < \beta.$$

Работа рассматривает схожую с [3] постановку задачи, что приводит к построению *локальной* вогнутой оболочки функции выплат для европейского пут-опциона на конечном горизонте дискретного представления времени $s = 1, \dots, N$.

Определение. *Определим вспомогательную функцию f_{ab} как $f_{ab} = f(x)$ для всех $x \in \text{dom } f_{ab} = [a, b]$. Тогда будем называть функцию $\text{conv } f_{ab}$ локально выпуклой оболочкой собственной функции f на интервале $[a, b]$. Обозначим $\text{conv}_{[a,b]} f$.*

Определение. Локально вогнутой оболочкой вещественной собственной функции f на интервале $[a, b]$ будем называть $\text{conc}_{[a,b]} f = -\text{conv}_{[a,b]}(-f)$.

Начальной функцией будет разрывная функция выплат, задающая пут-опцион:

$$f_0(x) = \begin{cases} 1, & \text{при } 0 \leq x \leq 1, \\ 0, & \text{при } x > 1. \end{cases}$$

Для некоторых фиксированных α и β , таких что $0 < \alpha < 1 < \beta$, рекуррентно определим последовательность функций

$$f_s(x) = \text{conc}_{[\alpha x, \beta x]} f_{s-1}(x), \quad s = 1, \dots, N.$$

Интерес к данной работе был вызван простейшим случаем разрывной функции выплат. В работе были исследованы свойства рекуррентно численно полученных функций. Из соображений логарифмической соотносимости цен, было принято $\beta = \alpha^{-1}$. Основным результатом работы является следующая теорема:

- Теорема.** 1. Для всех $s = 1, \dots, N$ функция $f_s(x)$ будет выпукла на всех участках $(\beta^{k-1}, \beta^k]$, $k = 1, \dots, s$.
2. Для $s = 1, \dots, N$ производная $f_s(x)$ будет отрицательна там, где определена.
3. Функция $f_s(x)$ будет являться непрерывной на участке $[0, \beta^s]$ для всех $s = 0, \dots, N$.

Доказательство, в основном, опиралось на инструментарий математического анализа в широком числе возникающих вариантов, которым позволяло пользоваться полунепрерывность сверху исходной функции выплат, приводящая к существованию игрового равновесия, в котором самая неблагоприятная стратегия рынка была смешанной стратегией всего лишь 2 чистых стратегий игрока.

Благодаря этой теореме был построен эффективный рекуррентный численный алгоритм нахождения так называемых «полуявных» решений уравнений Беллмана—Айзекса и выдвинуты полезные для дальнейшей работы гипотезы, о которые невозможно было предугадать без численного эксперимента:

1. Возможность эффективного использования символьных вычислений для получения *явного* вида решения на каждом рассматриваемых интервалах.
2. Невозможность реализации на практике целого пласта рассмотренных вариантов, усложняющих анализ.

Для простоты использования и распространения работы было написано специальное приложение в среде MATLAB App Designer, которое можно найти по адресу https://github.com/AlgerGordon/concave_hull.

Литература

- [1] Смирнов С. Н. Гарантированный детерминистический подход к суперхеджированию: модель рынка, торговые ограничения и уравнения Беллмана—Айзекса // МТИП. 2018. Т. 10, № 4. С. 59–99.
- [2] Смирнов С. Н. Гарантированный детерминистический подход к суперхеджированию: свойства безарбитражности рынка // МТИП. 2019. Т. 11, № 2. С. 68–95.
- [3] Смирнов С. Н., Заночкин А. Ю. Гарантированный детерминистический подход к суперхеджированию: свойства бинарного европейского опциона // Вестник ТвГУ. Серия: Прикладная математика. 2020. № 1. С. 29–59.

Пример решения задачи оптимального управления для мембран

Ашабоков Аслан Нажмудинович

Кафедра системного анализа

e-mail: as.ashabokov98@gmail.com

Научный руководитель — акад. РАН, д.ф.-м.н. проф. Куржанский Александр Борисович

Работа посвящена исследованию мало изученной задачи управления колебаниями однородной прямоугольной мембраны с граничным управлением, соответствующим граничным условиям Дирихле. Закон движения мембраны описывается следующим уравнением в частных производных:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = a^2 \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) + F.$$

С использованием методом прямых производится переход от уравнения колебаний в частных производных к аппроксимирующей системе обыкновенных дифференциальных уравнений вида:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + f(t). \\ x(t_0) = x_0, \\ u(t) \in \mathcal{E}(p_0, P(t)). \end{cases}$$

Далее предлагается ввести геометрические ограничения на управление в виде эллипсоида с переменным радиусом. Сделано это для того, чтобы в начальный момент времени выполнялось условие согласованности управления и начальных условий, наложенных на мембрану:

$$\begin{cases} u_m^{(1)}(t_0) = U(t_0, 0, m\Delta_y), \\ u_m^{(2)}(t_0) = U(t_0, b_1, m\Delta_y), \\ u_n^{(3)}(t_0) = U(t_0, n\Delta_x, 0), \\ u_n^{(4)}(t_0) = U(t_0, n\Delta_x, b_2), \end{cases}$$

где b_1 и b_2 — размеры мембраны, Δ_x и Δ_y — шаг сеточной аппроксимации в соответствующем направлении.

После введения некоторых регуляризирующих конструкций вводятся некоторые замены, с помощью которых производится декомпозиция исходной системы на две подсистемы следующего вида:

$$\begin{cases} \dot{g}(t) = Ag(t) - \tilde{p}_0 - f(t), \\ g(t_0) = g_0, \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = Az(t) + v(t), \\ z(t_0) = 0, \\ v(t) \in \mathcal{E}(0, \tilde{P}(t)), \end{cases} \quad (2)$$

где в качестве управления выступает уже $v(t)$.

Благодаря такому представлению в работе удалось получить ряд полезных утверждений, позволяющих рассматривать вопрос стабилизируемости системы за конечное время и поиска верхней оценки времени быстрогодействия.

Утверждение 1. Пусть в момент времени t^* $g(t^*) \in \mathcal{Z}[t^*]$, где $\mathcal{Z}[t]$ — множество достижимости системы (2), $g(t)$ — траектория системы (1). Пусть непрерывная функция $f(t)$ удовлетворяет условию $f(t) \in \mathcal{E}(-\tilde{p}_0, \tilde{P}(t))$ при $t \geq t^*$. Тогда система может быть стабилизирована для любого $t \geq t^*$.

Утверждение 2. Пусть $f(t) \in \mathcal{E}(-\tilde{p}_0, \tilde{G}(t))$, пусть управление удовлетворяет следующим ограничениям: $v(t) \in \mathcal{E}(0, \tilde{P}(t))$, где $\tilde{G}(t) = s^2(t)Q$, $\tilde{P}(t) = r^2(t)Q$, причем $0 < s(t) < r(t)$ для любого $t \geq t_0$. Тогда найдется t^* такое, что $g(t^*) \in \mathcal{Z}[t^*]$, где $\mathcal{Z}[t]$ — множество достижимости системы (2), $g(t)$ — траектория системы (1).

Далее в работе рассматриваются два метода построения приближенного решения задачи управления с использованием эллипсоидальных оценок [1, 2]: построение стабилизирующего управления с использованием метода прицеливания на множество [3] и решение задачи быстрогодействия с использованием внешних и внутренних эллипсоидальных оценок множества достижимости системы (2). В работе также представлено подробное описание алгоритма нахождения приближенного времени быстрогодействия и оптимальной по быстродействию траектории системы с использованием внешних и внутренних эллипсоидальных оценок множества достижимости системы (2).

Литература

- [1] Kurzhanski A. B., Varaiya P. On Ellipsoidal Techniques for Reachability Analysis. Part II: Internal Approximations, Box-Valued Constraints // Optimization methods and software. 2002. Vol. 17. N 2. P. 207–237.
- [2] Kurzhanski A. B., Varaiya P. Dynamic Optimization for Reachability Problems // Journal of Optimization Theory and Applications. 2001. Vol. 108, N 2. P. 227–251.

- [3] Kurzanski A. B., Varaiya P. System & Control: Foundations & Applications. Switzerland: Springer International Publishing, 2014. 443 p.

Оценивание нейромышечных ошибок спортсменов при выполнении двигательных упражнений

Работа удостоена диплома II степени

Наволоцкий Алексей Александрович

Кафедра математической статистики

e-mail: alexey@navolotsky.com

Научный руководитель — д.ф.-м.н. доц. Шевцова Ирина Геннадьевна

Работа посвящена моделированию процессов управления движениями, происходящих в высших отделах головного мозга человека с целью определения численной оценки вклада в общую ошибку движения различных подсистем: задающей управляющее усилие системы управления движениями и выполняющей двигательную задачу двигательной системы. Модель системы управления движениями в соответствии с принципами оптимальности [1] описывается с помощью линейно-квадратичного оценщика, или фильтра Калмана, и линейно-квадратичного гауссовского регулятора.

В ходе моделирования как оценены вклады ошибок каждой из подсистем, так и получены новые численные характеристики, описывающие особенности системы управления движениями: ценность энергозатрат и изменчивость управления.

На реальных экспериментальных данных, полученных в ходе тестирования спортсменов сборных команд России, продемонстрировано практическое применение описанных в работе методов для использования в тренировочной деятельности.

Литература

- [1] Todorov E. Optimality principles in sensorimotor control // Nature neuroscience. 2004. Vol. 7, N 9. P. 907–915.

О нейронных обыкновенных дифференциальных уравнениях и их применениях

Маргасов Арсений Олегович

Кафедра математической статистики

e-mail: margasovarsenij@gmail.com

Научный руководитель — д.ф.-м.н. проф. Ульянов Владимир Васильевич

В работе рассматривается идея применения аппарата дифференциальных уравнений в рамках глубокого обучения (нейронные обыкновенные дифференциальные уравнения или НОДУ) [1], а также предложена новая нейросетевая архитектура.

Предложенная модель p-ODE-RNN построена на вероятностном расширении рекуррентной сети с предобработкой скрытого состояния нейронными

дифференциальными уравнениями (ODE-RNN [2]). Сравнение нейросетевых архитектур и эксперименты по оценке их обобщающей способности проводились на двух наборах данных: ежемесячная цена закрытия индекса Московской биржи и среднемесячная температура воздуха в городе Москве. Полученные результаты показывают, что p-ODE-RNN позволяет получать сопоставимое с ODE-RNN качество, затрачивая при этом значительно меньшее время на обучение. Также было показано, что можно рассматривать p-ODE-RNN как случайный процесс, что позволяет взглянуть на эту модель не только с точки зрения глубокого обучения.

Определение. Уравнение вида

$$\frac{dh(t)}{dt} = f(h(t), t, \theta), \quad t \in [t_0, t_1]. \quad (1)$$

называется нейронным обыкновенным дифференциальным уравнением, в котором h — скрытое состояние сети, f — нейронная сеть, задающая динамику развития скрытого слоя, θ — её параметры, а t определяет нумерацию скрытых слоёв.

p-ODE-RNN. Рассмотрим новую архитектуру p-ODE-RNN, для которой скрытое состояние (слой сети) h_i является случайной величиной следующего вида:

$\mathbb{P}(h_i = x)$	p	$1 - p$
x	$\text{RNNCell}(\text{ODESolve}((t_{i-1}, t_i), h_{i-1}, \theta, f), x_i)$	$\text{RNNCell}(h_{i-1}, x_i)$

Табл. 1: Случайная величина h_i .

$\text{RNNCell}(\cdot)$ — блок стандартной рекуррентной нейронной сети, $\text{ODESolve}(\cdot)$ — численный метод решения НОДУ. Параметр p был выбран равным $\frac{1}{t}$. В качестве меры ошибки моделей был использован коэффициент детерминации или $R^2 = 1 - SS_{res}/SS_{tot}$, где y — вектор реальных значений, \hat{y} — вектор, предсказанных значений, $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$, $SS_{tot} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$, $SS_{res} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$.

модель	ODE-RNN	p-ODE-RNN
R^2	0.89	0.83
время	1.86 сек.	0.20 сек.

Табл. 2: Итоговое значение R^2 и среднее время, затраченное на обучение на 1 эпоху (цены закрытия индекса Московской биржи).

Литература

- [1] Chen Ricky T. Q., Rubanova Yu., Bettencourt J., Duvenaud D. Neural ordinary differential equations // Advances in Neural Information Processing Systems 31 (NIPS 2018).

модель	ODE-RNN	p-ODE-RNN
R^2	0.90	0.87
время	2.64 сек.	0.28 сек.

Табл. 3: Итоговое значение R^2 и среднее время, затраченное на обучение на 1 эпоху (среднемесечная температура в $^{\circ}\text{C}$ в Москве).

- [2] Rubanova Yu., Chen Ricky T. Q., Duvenaud D. Latent ODEs for Irregularly-Sampled Time Series // Advances in Neural Information Processing Systems 32 (NIPS 2019).

Методы повышения обобщающей способности, основанные на построении многослойных ансамблей

Королев Николай Сергеевич

Кафедра математических методов прогнозирования

e-mail: korolev.nikolay.s@gmail.com

Научный руководитель — д.ф.-м.н. проф. Сенько Олег Валентинович

При использовании алгоритмов машинного обучения очень часто возникает проблема «переобучения». В такой ситуации алгоритм начинает более точно работать на объектах из обучающей выборки, но при этом теряет качество работы на генеральной совокупности объектов, то есть его обобщающая способность падает.

Многочисленные исследования [1, 2] показали, что ансамбли, агрегирующие результаты различных алгоритмов, могут повышать обобщающую способность в сравнении с отдельными алгоритмами. Тем не менее, в большинстве случаев агрегирование результатов нескольких алгоритмов происходит лишь один раз.

В работе рассматриваются новые методы повышения качества обучения, использующие в своей структуре агрегирование несколько раз. Приводится способ создания многоуровневой схемы, позволяющей использовать различные методы агрегирования алгоритмов на различных уровнях схемы. Указанная схема во многом является обобщением многослойных нейросетевых моделей.

Также в работе рассматриваются два частных варианта схемы. Первый вариант решает задачу классификации и использует двухуровневую структуру (или имеет два слоя). Первый слой состоит из деревьев решений, которые генерируются на случайно выбираемых подмножествах признаков и с использованием бэггинга [1]. Второй слой включает в себя несколько логистических регрессий, каждая из которых получает на вход результаты работы небольшого количества случайно выбранных деревьев решений с первого слоя. Если на первом слое n деревьев, то эмпирически было получено, что наилучших результатов можно достигнуть, если вход каждой логистической регрессии связан лишь с \sqrt{n} случайно выбранных деревьев решений. Это позволяет достичь разнообразия итоговых логистических регрессий, что влечёт за собой повышение обобщающей способности [3]. Выходы логистических регрессий

усредняются и полученное число считается вероятностью принадлежности к некоторому классу. Таким образом, данная схема соответствует двухслойной нейронной сети с недифференцируемыми функциями активации, что позволяет лучше описывать локальные нелинейные зависимости данных. Для обучения полученной схемы необходимо разделить обучающую выборку на две части и обучать первый слой, состоящий из деревьев решений, на первой подвыборке, а второй слой — на второй.

Второй вариант схемы позволяет связать в одну модель деревья решений и нейронную сеть. Более конкретно, деревья решений объединяются в несколько ансамблей (в данном случае, случайных лесов), выходы которых являются входами нейронной сети. Обучение данной модели предлагается производить в два этапа. На первом этапе обучающая выборка делится на две части и одна из частей используется для обучения нескольких случайных лесов. На втором этапе используется другая часть выборки для итерационного обучения нейронной сети и улучшения качества работы случайных лесов. На каждой итерации результат работы модели на данных позволяет вычислить градиент дифференцируемой функции потерь по параметрам нейронной сети, а также по выходам случайного леса. Полученные градиенты используются для перерасчёта параметров нейронной сети методом градиентного спуска, а также для обучения дополнительного дерева в каждом случайном лесе аналогично методу градиентного бустинга.

Для доказательства эффективности данных методов проведены несколько экспериментов на различных выборках. Качество работы обоих предложенных методов сравнивалось с известными алгоритмами, использующих агрегирование один раз: случайным лесом и градиентным бустингом. Результаты экспериментов показали, что предложенные методы позволяют увеличить среднее значение ROC AUC на 4–5 сотых в сравнении с указанными алгоритмами на реальных задачах.

Литература

- [1] Breiman L. Bagging predictors // Machine Learning. 1996. Vol. 24. P. 123–140.
- [2] Ho Tin Kam Random decision forests // Proceedings of 3rd International Conference on Document Analysis and Recognition. 1995. Vol. 1. P. 278–282.
- [3] Докукин А. А., Сенько О. В. Оптимальные выпуклые корректирующие процедуры в задачах высокой размерности // Вычисл. матем. и матем. физ. 2011. Т. 51. С. 1751–1760.

Расстояния, параметризованные размерами, и их аппроксимация

Работа удостоена диплома III степени

Петренко Дарья Павловна

Кафедра математических методов прогнозирования

e-mail: daria_petrenko@bk.ru

Научный руководитель — к.ф.-м.н. доц. Майсурадзе Арчил Ивериевич

Во многих прикладных областях при содержательной постановке и последующей формализации задач используется понятие расстояния. Однако для адекватного представления сложных ситуаций традиционного расстояния недостаточно и требуется использовать более богатые множества функций. В данной работе предлагается и исследуется теоретически и эмпирически одно из таких множеств — расстояния, параметризованные размером.

Определение 1. Пусть X — произвольное множество. Пусть S — частично упорядоченное множество с операцией сложения. Расстоянием, параметризованным размером, будем называть функцию $\rho(x_1, x_2, s) : X \times X \times S \rightarrow \mathbb{R}$, удовлетворяющую следующей системе аксиом*:

- *аксиомы расстояния* $\forall x_1, x_2 \in X, \forall s \in S$
 - D1. $\rho(x_1, x_1, s) = 0$ (рефлексивность)
 - D2. $\rho(x_1, x_2, s) = \rho(x_2, x_1, s)$ (симметричность)
 - D3. $\rho(x_1, x_2, s) \geq 0$ (неотрицательность)
- *аксиомы размера* $\forall x_1, x_2 \in X, \forall s_1, s_2 \in S$
 - S1. $s_1 \leq s_2 \implies \rho(x_1, x_2, s_1) \leq \rho(x_1, x_2, s_2)$ (монотонность)
 - S2. $\rho(x_1, x_2, s_1 + s_2) \leq \rho(x_1, x_2, s_1) + \rho(x_1, x_2, s_2)$ (неделимость)

В работе доказана непротиворечивость и независимость системы аксиом (D1)–(D3), (S1), (S2). Также рассмотрен ряд сужений и расширений указанного множества функций, полученных добавлением новых аксиом или ослаблением требований соответственно. В частности, от *различия, параметризованного размером*, требуется только рефлексивность и неотрицательность.

Далее в работе ставится и решается различными способами следующая задача аппроксимации тензора различий. Рассмотрим конечный набор объектов мощности N и конечный набор размеров мощности K , причем объекты характеризуются только своими индексами в наборе, а размеры, для удобства дальнейших формулировок, — неотрицательные числа, пропорциональные своим индексам. Пусть для каждой пары объектов и каждого размера из рассматриваемых наборов измерено различие, параметризованное размером — получим трехмерный тензор $\Delta \in \mathbb{R}^{N \times N \times K}$, где элемент тензора δ_{ijk} содержит различие между i -тым и j -тым объектами, параметризованное k -тым

*Термин «аксиома» является традиционным для условий на функции расстояния.

размером. Требуется разработать модели и методы аппроксимации тензора Δ , причем различия δ_{ijk} , параметризованные размерами, аппроксимируются расстояниями ρ_{ijk} , параметризованными размерами. Точность аппроксимации оценивается с помощью взвешенного среднеквадратического отклонения $\text{Stress} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^K w_{ijk} (\delta_{ijk} - \rho_{ijk})^2$, где w_{ijk} — заданные веса.

В случае обычных расстояний задача относится к классу задач многомерного шкалирования, поэтому работа была построена в соответствии с идеологией современного многомерного шкалирования [1, 2]. При этом предложенные в работе модели расстояний, параметризованных размером, постановки задач аппроксимации и методы их решения являются оригинальными.

Для решения поставленной задачи в работе предложены 4 модели расстояний, параметризованных размером. Для каждой из моделей найдены достаточные условия на параметры («теоремы о достаточных условиях»), обеспечивающие выполнение всех аксиом из определения 1.

Задачи аппроксимации ставились как задачи минимизации взвешенного среднеквадратического отклонения Stress исходного тензора от его аппроксимации в рамках выбранной модели, обеспечивая выполнение условий теоремы для соответствующей модели. Так как модели представлены в общем виде, то для постановки задачи аппроксимации для каждой из моделей был выбран конкретный частный случай. Частные случаи двух моделей совпали, поэтому было получено 3 различных задачи условной оптимизации.

Для решения каждой из задач в работе предложен свой метод условной оптимизации. Идея методов 1 и 2 состоит в итерационной условной минимизации вариационной верхней оценки функции стресса, идея метода 3 — в итерационной условной минимизации квадратичной функции стресса методом наименьших квадратов.

Все предложенные методы были реализованы и протестированы на реальных данных о задержках передачи сообщений между процессами в многопроцессорной системе «Ломоносов». Эксперименты показали хорошее качество аппроксимации для моделей с малым числом параметров (то есть высокую степень сжатия данных), а также сопоставимость потерь с безусловными постановками задач (в которых аксиомы из определения 1 игнорируются).

Литература

- [1] Borg I., Groenen P.J.F. Modern multidimensional scaling: Theory and applications. Springer Science & Business Media, 2005.
- [2] Cox T.F., Cox M.A. Multidimensional Scaling. New York: Chapman and Hall/CRC, 2000.

Разработка алгоритмов работы с матрицами и системами линейных алгебраических уравнений в обратимых схемах

Работа удостоена диплома III степени

Кормаков Георгий Владимирович

Кафедра математических методов прогнозирования

e-mail: egor2898@mail.ru

Научный руководитель — к.ф.-м.н. доц. Гуров Сергей Исаевич

В теории обратимых вычислений одним из ключевых вопросов является вопрос синтеза. Одним из вариантов решения этого вопроса является переход к групповому представлению обратимой схемы и сведение задачи синтеза к задаче нахождения минимального пути в графе Кэли соответствующей группы. Однако теоретически более значимой является задача нахождения гамильтонова цикла в соответствующем графе.

Данная работа является результатом исследования имеющихся алгоритмов нахождения гамильтонова цикла в графе Кэли полной линейной группы $GL_n(2)$ и подгруппы Бореля нижне-треугольных матриц $B_n(2)$. Также основную часть занимает вопрос группового представления обратимых схем специального вида.

В ходе работы также была предпринята попытка доказательства факта существования гамильтонова цикла над обратимыми схемами в общем виде и проведена оценка сложности алгоритмов поиска гамильтонова цикла в графе Кэли соответствующих групп.

Обратимость и групповое представление. Основные обратимые элементы приведены на рисунке 1. Если рассматривать обратимые схемы, состоящие

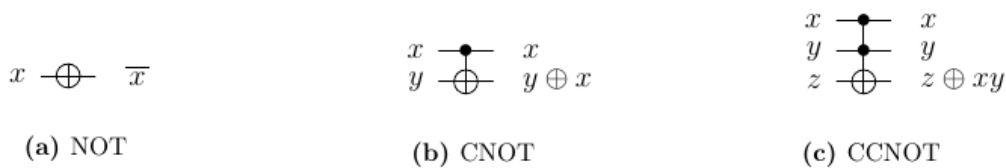


Рис. 1: Основные обратимые элементы.

из элементов контролируемого отрицания (CNOT), то схема представляется в виде СЛАУ с матрицей, соответствующей осуществляемой последовательности операций. В таком случае матрица обратимой схемы является элементом $GL_n(2)$. И вопрос синтеза сводится к поиску минимального пути от единичной матрицы к необходимой в графе Кэли этой группы.

В предыдущей работе был исследован вопрос представления обратимых элементов в пространстве Хэмминга для синтеза сбоеустойчивых схем [1]. В результате, получаемая обратимая схема способна автоматически исправлять ошибки на уровне обратимых элементов.

Алгоритмы поиска гамильтонова цикла. В рамках теории обратимых вычислений значимой задачей является нахождение гамильтонова цикла в графе

Кэли группы $GL_n(2)$. И доказательство существования цикла в данном графе является открытой проблемой. В ходе исследования был найден теоретически обоснованный алгоритм нахождения гамильтонова цикла в подгруппы Бореля нижне-треугольных матриц $B_n(2)$ [2]. Однако для поиска гамильтонова цикла в графе Кэли полной линейной группе существует лишь эвристический алгоритм, опирающийся на несколько условий на вершины данного графа.

Реализация поиска гамильтонова цикла. Для собственной реализации ограничительные условия в случае полной линейной группы были заменены переборной частью по множеству вершин. Из-за этого были получены результаты лишь для малых порядков групп (рис. 2, 3). В рамках реализации также

```
[1 0 0] [1 0 0] [1 0 0] [1 0 0] [1 0 0] [1 0 0] [1 0 0] [1 0 0]
[0 1 0] [1 1 0] [1 1 0] [0 1 0] [0 1 0] [1 1 0] [1 1 0] [0 1 0]
[0 0 1], [0 0 1], [1 1 1], [1 1 1], [1 0 1], [1 0 1], [0 1 1], [0 1 1].
Цикл:
 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_1, \sigma_2$ .
```

Рис. 2: Результат работы алгоритма в $B_3(2)$.

```
[1 0] [1 0] [0 1] [0 1] [1 1] [1 1]
[0 1], [1 1], [1 1], [1 0], [1 0], [0 1].
Цикл:
 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_1, \sigma_2$ .
```

Рис. 3: Результат работы алгоритма в $GL_2(2)$.

был проведён анализ используемых представлений бинарных матриц и разбор основных этапов алгоритма.

Открытая проблема. Отметим, что теоретически не доказано существование гамильтонова цикла в $GL_n(2)$. Это остаётся открытой проблемой. Однако, в ходе поисков решения проблемы, был найден возможный способ доказательства существования гамильтонова цикла в графе Кэли группы, порождаемой обратимыми схемами, в общем случае.

Известен алгоритм Штейнгауза—Джонсона—Троттера, генерирующий всевозможные перестановки (и получающий гамильтонов цикл над ними) [3]. Соответственно, если задать отображение из обратимых схем в перестановки, затем найти гамильтонов цикл над перестановками, порождаемыми ими, с помощью этого алгоритма, то можно утверждать о существовании гамильтонова цикла над обратимыми схемами.

Литература

- [1] Кормаков Г.В., Гуров С.И. Синтез сбоеустойчивых обратимых схем // Научная конференция «Ломоносовские чтения». Тезисы докладов. М. : МАКС Пресс, 2019. С.47–48.
- [2] Draper T. G. Nonlinear Complexity of Boolean Permutations : Ph.D. thesis / University of Maryland (College Park, Md.), 2009.

- [3] Johnson M. S. Generation of permutations by adjacent transposition // Math. Comp. 1963. Vol. 17, P. 282–285.

Повышение разнообразия результатов стилизации изображений

Устюжанин Александр Олегович

Кафедра математических методов прогнозирования

e-mail: alex.ustyuzhanin98@yandex.ru

Научный руководитель — к.ф.-м.н. Китов Виктор Владимирович

С развитием вычислительных возможностей особое внимание уделяется нейросетевым подходам решения самых разных задач: от прогнозирования экономических показателей до генерации изображений. С 2015 года отдельной темой для исследования стала задача переноса стиля, которая представляет как практический, так и научный интерес.

Данное направление нацелено на получение так называемого *стилизованного изображения*, которое получается за счет переноса художественных особенностей и приемов, например, с картин Ван Гога и Пикассо, на любые изображения и фотографии. Таким образом, стилизация изображения дает возможность пользователю узнать, как бы выглядел его портрет, нарисованный знаменитым художником.

Главными показателями хорошей стилизации является его качество и визуальная привлекательность, а также разнообразие полученных результатов, позволяющее пользователю выбрать картину, которая больше соответствует его предпочтениям. Существует целое множество хорошо изученных подходов, решающих данную задачу, однако совсем малая их часть учитывает важность генерации диверсифицированных результатов. Именно этой проблеме посвящена данная исследовательская работа.

Задача переноса стиля принимает на вход стилевое изображение x_{style} , содержащее интересующий нас художественный стиль, как правило, это картина художника, и контентное изображение $x_{content}$ — объект, подлежащий стилизации. Выходное изображение x_o получается в результате оптимизации двух функций потерь: $\mathcal{L}^{content}(x_{content}, x)$, называемой *контентной функцией потерь*, и *стилевой функции потерь*, имеющей вид $\mathcal{L}^{style}(x_{style}, x)$. Контентная функция потерь нацелена на минимизацию различий между оптимизируемым изображением x и контентным изображением $x_{content}$, тем самым сохраняя исходное информационное наполнение. Стилловая функция потерь позволяет перенести цветовую гамму и текстуру стилового изображения.

Таким образом, оптимизационный процесс имеет вид:

$$x_o = \arg \min_x [\mathcal{L}^{content}(x_{content}, x) + \alpha \mathcal{L}^{style}(x_{style}, x)],$$

где α — гиперпараметр, отвечающий за интенсивность переноса стиля. Чем ниже этот показатель, тем выше схожесть стилизованного изображения и контентного. Основопологающей работой в сфере исследования задачи переноса стиля является работа исследователя Leon A. Gatys [1].

Её идея базируется на использовании глубоких нейронных сверточных сетей. Архитектура этой сети такова, что на вход принимается некоторое изображение, которое «пропускается» через промежуточные сверточные слои, представляющие собой так называемые *фильтры*, которые позволяют извлечь особенности полученной визуальной информации.

В данной работе предложена серия подходов по повышению разнообразия результатов работы нейросетевой стилизации, основанных на работе [1]. Проведено качественное и количественное сравнение с существующими методами. Рассмотрены метрики оценки качества и разнообразия стилизации. Результаты проведенных экспериментов демонстрируют значительный прирост разнообразия.

Литература

- [1] Leon A. G., Alexander S. E., Bethge M. A neural algorithm of artistic style [Электронный ресурс] // arXiv.org. URL: <https://arxiv.org/abs/1508.06576>

Метод скелетизации бинарного изображения на основе плоского заметания

Работа удостоена диплома III степени

Коптелов Дмитрий Андреевич

Кафедра математических методов прогнозирования

e-mail: dimitar98@list.ru

Научный руководитель — д.т.н. проф. Местецкий Леонид Моисеевич

Постановка задачи. Одним из ключевых терминов в анализе изображений является понятие скелета. *Скелетом* плоской фигуры называется геометрический граф, образованный из внутренних точек фигуры, имеющих две или более ближайших точек ее границы. Скелет позволяет получить компактное и удобное для последующей обработки представление изображения. Методы построения скелета для цифрового изображения основываются на аппроксимации объекта многоугольной фигурой (МФ) и построении диаграммы Вороного (ДВ) фигуры. Скелет МФ вычисляется далее как подграф ДВ МФ. Этим объясняется большое внимание, уделяемое алгоритмам построения ДВ МФ в вычислительной геометрии.

Предлагаемый алгоритм. Традиционно задача построения ДВ МФ сводится к задаче построения ДВ множества линейных отрезков, для которой известны алгоритмы, имеющие вычислительную сложность $O(n \log n)$, где n — количество отрезков. Редукция задачи ДВ МФ к ДВ отрезков включает преобразование МФ в множество отрезков и выделение в полученной ДВ той её части, которая лежит внутри МФ. Целью данной работы является разработка эффективного $O(n \log n)$ алгоритма построения ДВ МФ, позволяющего избежать расхода времени на редукцию, а также учитывающего взаимное расположение линейных отрезков в виде МФ. Тем самым мы хотим сократить время решения задачи скелетизации МФ. Входом алгоритма является совокупность многоугольников, описывающих одну или несколько многосвязных многоугольных

фигур, а выходом – векторное описание ДВ в виде геометрического графа, лежащего внутри фигур, рёбра которого описываются сегментами прямых и парабол.

Разработанный алгоритм основан на парадигме плоского заметания. Он является модификацией алгоритма Форчуна [1]. Также предлагаемый алгоритм развивает идеи по реализации, предложенные в [2]. Повышение эффективности достигается за счёт использования двух важных специальных свойств ДВ МФ, которые могут быть использованы для сокращения вычислений. Во-первых, отрезки, образованные из сторон МФ, имеют попарные пересечения в своих концевых точках. А во-вторых, для МФ определено понятие внутренности и внешности, что позволяет ограничиться сразу построением лишь её внутренней части ДВ.

Результаты. В ходе работы была разработана программа на языке C++, которая строит и визуализирует диаграмму Вороного для произвольного бинарного изображения. Корректность алгоритма доказана теоретически и обоснована вычислительными экспериментами с реальными данными большого размера.

Вычислительная эффективность сравнивалась с самой эффективной из существующих в открытом доступе реализацией алгоритма Форчуна построения ДВ для линейных отрезков в библиотеке *Boost* на C++. Во всех примерах входных изображений предлагаемый алгоритм показывал в 2–3 раза меньшее время по сравнению с реализацией в *Boost*. На примерах с большим числом вершин время решения с помощью предлагаемого алгоритма сокращается на порядок (в 20–30 раз).

Литература

- [1] Fortune S. A sweepline algorithm for Voronoi diagrams // *Algorithmica*. 1987. N 2. P. 153–174.
- [2] Местецкий Л. М. Скелетизация многоугольной фигуры на основе обобщенной триангуляции Делоне // *Программирование*. 1999. № 3. С. 16–31.

Ранжирование текстовых документов на основе оценок когнитивной сложности текста

Работа удостоена диплома I степени

Еремеев Максим Алексеевич

Кафедра математических методов прогнозирования

e-mail: me@maksimeremeev.com

Научный руководитель — д.ф.-м.н. проф. РАН Воронцов Константин Вячеславович

Индексы удобочитаемости или когнитивной сложности текста используются для сравнения учебных текстов, веб-сайтов, деловых и рекламных материалов. Представляется перспективным их применение также в системах разведочного информационного поиска и текстовых рекомендательных системах для ранжирования поисковой выдачи *в порядке чтения*, то есть «от простого к сложному», «от популярного, учебного и обзорного к специализированному и

узко профессиональному». Такой принцип ранжирования может быть использован в образовательных платформах и поисково-рекомендательных системах, нацеленных на автоматизацию процесса изучения новых предметных областей пользователем.

Однако индексы удобочитаемости методы имеют два основных недостатка.

Во-первых, они не учитывают относительную природу самого понятия сложности. Оценка сложности текста должна зависеть от того, какие тексты мы согласны считать простыми, и для какой читательской аудитории, включая факторы языкового опыта, возраста, образования, профессии.

Во-вторых, они не позволяют учитывать единообразно все уровни языка: фонетический, морфологический, синтаксический, дискурсивный.

В работе предложен квантильный подход к оцениванию когнитивной сложности текста, свободный от указанных недостатков, рассмотрены его приложения, в частности, к задаче ранжирования в порядке чтения.

Во-первых, сложность определяется относительно представительного референтного корпуса текстов, которые считаются простыми для выбранной читательской аудитории.

Во-вторых, для каждого уровня языка определяется свой алфавит токенов: для фонетического — фонемы или буквы; для морфологического — морфемы или слоги; для лексического — слова или термины; для синтаксического — типы и длины синтаксических связей; для дискурсивного — типы и длины риторических структур или предложений.

Предлагаемая математическая формализация понятия сложности основана на представлениях нейрофизиологии и психофизиологии, описанных в работе [1]. Предполагается, что нервная система расшифровывает токены на каждом уровне последовательно, причем каждый токен анализируется своей частью коры головного мозга. Поэтому если в тексте встречается один и тот же токен достаточно часто, то то мозг реципиента не успевает обрабатывать его в обычном режиме и испытывает дополнительную нагрузку.

По представлению референтного корпуса текстов в заданном алфавите вычисляются эмпирические распределения частот для каждого токена по референтному корпусу. Токен считается сложным в заданном тексте, если он встречается в нём аномально часто по сравнению с референтным корпусом. Аномально высокая частота токена определяется через квантиль эмпирического распределения его частоты. Оценка сложности текста определяется как доля сложных токенов. Данный подход используется единообразно на всех уровнях языка.

Для эмпирического сравнения различных оценок когнитивной сложности текста был подготовлен набор пар статей Википедии и размечен на краудсорсинговой платформе Яндекс.Толока. Были отобраны 10 тысяч пар статей Википедии схожей тематики и длины (пример подходящей пары — статьи «Свинец» и «Олово»). Затем эти пары статей предъявлялись ассессорам, которых

просили выбрать более сложную из пары, или указать, что такую выбрать нельзя.

В работе построено несколько квантильных моделей сложности для каждого уровня языка, а также агрегированная модель, объединяющая модели со всех уровней. Квантильные оценки сложности вычислялись по референтному корпусу из 1,5 миллионов русскоязычных статей Википедии. В серии экспериментов предложенные оценки сложности совпадали с ассессорскими на 88% пар, тогда как известные индексы удобочитаемости не преодолели 60%. В работе также показана применимость квантильного подхода к решению задачи ранжирования в порядке чтения.

В работе также представлены практические инструменты. Для демонстрации предложенной теории был разработан ресурс `TextComplexity.net`. Веб-система выделяет аномально сложные токены для пользовательского текста и может быть использована для редактирования текста с целью его упрощения. Также на `github.com` опубликована библиотека с открытым кодом `cognitive-complexity`, которая использовалась при проведении экспериментов.

Промежуточные результаты, описанные в работе, были представлены на конференциях *RANLP-2019* [2], *MMPO-2019*, *DataFest*, *OpenTalks.AI*, *Диалог-2020* [3]. Работа поддержана грантом РФФИ №20-07-00936.

Литература

- [1] Биркин А. А. Природа речи. М. : Ликбез, 2009. 384 с.
- [2] Eremeev M., Vorontsov K. Lexical quantile-based text complexity measure // International Conference on Recent Advances in Natural Language Processing. Varna, Bulgaria : INCOMA Ltd., 2019. P. 270–275.
- [3] Eremeev M. Vorontsov K. Quantile-based approach to estimating cognitive text complexity // Computational linguistics and intellectual technologies. Springer International Publishing. 2020.

Исследование сложности умножителей в одной модели программируемых логических схем

Работа удостоена диплома II степени

Купраш Екатерина Дмитриевна

Кафедра математической кибернетики

e-mail: kuprekat@yandex.ru

Научный руководитель — к.ф.-м.н. доц. Шуплецов Михаил Сергеевич

В данной работе рассматривается задача точного индивидуального синтеза в классе схем из функциональных элементов (СФЭ) для умножителя — схемы, реализующей операцию умножения двух чисел.

Определение. Умножителем $n \times m$ называется СФЭ с $(n + m)$ входами $x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_m$ и $n + m$ выходами z_1, \dots, z_{n+m} , такая что:

$\nu(x_1 \dots x_n) \cdot \nu(y_1 \dots y_m) = \nu(z_0 \dots z_{n+m})$, где $\nu(\tilde{x})$ — десятичная запись двоичного числа \tilde{x} .

В индустрии проектирования интегральных схем увеличение производительности и экономия ресурсов имеют важное значение, в связи с чем встает задача нахождения схем, наилучших по какому-либо параметру. В данной работе исследовался функционал, оценивающий число элементов в схеме (ее сложность) в конкретном базисе — всевозможных функций четырех переменных (т.е. $P_2(4)$). Задача заключалась в поиске оптимальных и близких к ним по сложности СФЭ в этом базисе для умножителя $n \times m$ для некоторых небольших значений n и m .

Использовался метод сведения задачи поиска оптимальной схемы к задаче выполнимости булевых формул (сведение выполнялось на основе известного алгоритма [1], адаптированного в данной работе для нужной модели) и к задаче выполнимости формул в теориях, что позволило использовать специальные программы для решения задач выполнимости (SAT-решатель и SMT-решатель соответственно) и таким образом увеличить эффективность процесса.

Были найдены близкие к оптимальным по сложности схемы для умножителей небольших размерностей, полученные сложности приведены в табл. 1. Для умножителей размерностей 2×2 и 3×2 было показано, что схем меньшей сложности не существует, а для умножителя размерности 3×3 , что его сложность не менее 8.

Размерности	2	3	4	5
2	4	6	9	11
3	6	10	14	—
4	9	14	—	—
5	11	—	—	—

Табл. 1: Полученные результаты для сложностей схем.

Рассмотренный метод может быть полезен как с теоретической точки зрения, так и при решении прикладных задач, связанных с проектированием программируемых интегральных схем, а полученные схемы могут быть использованы в качестве базовых подсхем для построения более сложных.

Литература

- [1] Kojevnikov A., Kulikov A. S., Yaroslavtsev G. Finding efficient circuits using SAT-Solvers // Theory and Applications of Satisfiability Testing (SAT 2009). P. 32–44.
- [2] Ложкин С. А. Лекции по основам кибернетики. ВМК МГУ, 2017.

О тестах относительно некоторых неисправностей входов схем

Работа удостоена диплома I степени

Лопунов Михаил Александрович

Кафедра математической кибернетики

e-mail: miklop07@gmail.com

Научный руководитель — к.ф.-м.н. доц. Романов Дмитрий Сергеевич

В данной выпускной квалификационной работе получена оценка функции Шеннона длины проверяющего теста относительно источника неисправностей U_k локальных перестановок степени k входов схемы из функциональных элементов (СФЭ). Источник U_k может произвольным образом менять местами любые k подряд идущих входов схемы. В результате, под действием источника U_k на СФЭ Σ , может получиться одна из схем $\tilde{\Sigma}_1, \dots, \tilde{\Sigma}_s$, где $\tilde{\Sigma}_1 = \Sigma$, $s \in \mathbb{N}$ и эти схемы попарно функционально различны. Рассматриваемая модель тестирования предполагает, что U_k действует на Σ только один раз. В данной работе рассматриваются схемы, имеющие только один выход. Поэтому вместо тестов для схем можно рассматривать тесты для булевых функций. Через E_2^n здесь обозначается множество всевозможных двоичных векторов размерности n , а через $P_2(n)$ — множество всех функций алгебры логики от n переменных.

Определение. Множество наборов $T \subseteq E_2^n$ называется проверяющим тестом для СФЭ $\Sigma(x_1, \dots, x_n)$ относительно источника неисправностей U , если для любой СФЭ $\tilde{\Sigma}$ из множества схем $\{\tilde{\Sigma}_2, \dots, \tilde{\Sigma}_s\}$ найдётся набор $\tilde{\alpha} \in T$ такой, что $\Sigma(\tilde{\alpha}) \neq \tilde{\Sigma}(\tilde{\alpha})$.

Определение. Длиной проверяющего теста называется число наборов в нём.

Определение. Проверяющий тест для СФЭ Σ относительно источника неисправностей U называется минимальным, если он имеет наименьшую длину среди всех проверяющих тестов для схемы Σ относительно U . Длину минимального проверяющего теста для схемы Σ относительно источника неисправностей U будем обозначать через $l^{\text{detect}}(\Sigma)$.

Определение. Длиной проверяющего теста для булевой функции f относительно источника U называется величина

$$l^{\text{detect}}(f) = \min_{\Sigma \text{ реализует } f} l^{\text{detect}}(\Sigma).$$

Определение. Функцией Шеннона длины проверяющего теста относительно источника неисправностей U называется величина

$$l^{\text{detect}}(n) = \max_{f \in P_2(n)} l^{\text{detect}}(f).$$

Известны результаты для источников неисправностей, схожих с источником U_k . В работе Н. И. Глазунова и А. П. Горяшко [1] в 1986 г. было доказано, что

нижней оценкой для функции Шеннона длины проверяющего теста относительно единичных транспозиций переменных в булевой функции является величина $0,25n \log_2 n(1 + o(1))$. Д. С. Романов в работе [2] в 2012 г. доказал, что верхней оценкой для функции Шеннона длины проверяющего теста относительно источника произвольных перестановок входов схемы является величина $n \log_2 n(1 + o(1))$. Таким образом, было установлено, что данная функция Шеннона ведёт себя как $\Theta(n \log n)$.

В данной работе была доказана теорема, устанавливающая порядок роста функции Шеннона длины проверяющего теста $l_k^{detect}(n)$ относительно источника неисправностей U_k .

Теорема. Пусть k и n — натуральные числа, $2 \leq k \leq n$, $n \rightarrow \infty$, $k = k(n)$. Тогда имеет место равенство

$$l_k^{detect}(n) = \Theta(n \log k).$$

Литература

- [1] Глазунов Н. И., Горяшко А. П. Об оценках длин обнаруживающих тестов для классов неконстантных неисправностей входов комбинационных схем // Изв. АН СССР. Сер. «Техническая кибернетика». 1986. № 3. С. 197–200.
- [2] Романов Д. С. О тестах относительно перестановок переменных в булевых функциях // Прикладная математика и информатика. Труды факультета Вычислительной математики и кибернетики МГУ имени М. В. Ломоносова. Вып. 41. М. : МАКС Пресс, 2012. С. 113–121.

Khnum: быстрая open-source программа для расчета метаболических потоков с использованием ^{13}C -углерода

Стешин Семен Сергеевич

Кафедра математической кибернетики

e-mail: steshinsimon@gmail.com

Научный руководитель — к.ф.-м.н. доц. Шуплецов Михаил Сергеевич

В биологической клетке происходят тысячи химических реакций, называемых *метаболическими потоками*. Измерение скоростей потоков помогает понять, чем раковые клетки отличаются от обычных, или как спроектировать бактерию, чтобы она производила лекарство. Мощный метод измерения потоков — ^{13}C -Metabolic Flux Analysis (^{13}C -MFA), он же анализ метаболических потоков с использованием ^{13}C -углерода.

Анализ метаболических потоков с использованием ^{13}C -углерода. Сначала проводят эксперимент. Для этого в клеточную среду добавляют вещества, содержащие тяжелый изотоп ^{13}C . После того как углерод распределится по системе, экспериментатор изолирует некоторые метаболиты и замерит, как именно распределился изотоп.

Из его распределения можно восстановить скорости метаболических потоков. Для этого сначала создают математическую модель распределения атомов

углерода при заданных скоростях потоков. После этого решают обратную задачу: подбирают такие значения потоков, при которых предсказанное распределение изотопа совпадает с экспериментальным.

Компьютерная симуляция. По входным данным строится граф, который специальным образом преобразуется, и на его основе генерируется несколько подграфов. По каждому подграфу создается система линейных уравнений. Нахождение решения обратной задачи — это задача регрессии, целевая функция которой вычисляется с помощью решения этих построенных систем линейных уравнений. Целевая функция вычисляется сотни раз для нахождения одного решения, поэтому задача компьютерной симуляции вычислительно сложная. Вопросам эффективности вычислений уже посвящено много теоретических работ и каждый год появляются новые, посвященные отдельным компонентам системы.

С практической точки зрения, для 13C-MFA вычислений уже написано 12 программ. Большинство — неэффективно. Самая быстрая и популярная программа — *13CFLUX2*. Она имеет закрытый исходный код, а перед использованием надо отправить авторам все входные данные. Можно запросить бесплатную академическую лицензию, но для коммерческих целей программа платна. Цена обсуждается отдельно, но только лишь стоимость тренингов начинается от 900€.

Khnum. В результате работы была написана эффективная программа *Khnum*. Она использует несколько открытых библиотек и имеет ряд особенностей.

- Открытый исходный код позволяет модифицировать программу под свои цели.
- Модульная структура позволяет исследователю быстро заменить компонент на экспериментальный, чтобы проверить свои предположения.
- В программе нет внешних зависимостей: для компиляции достаточно стандартной библиотеки *libstd++*, *gcc* и *CMake*.

Результат работы *Khnum* совпадает с несколькими другими программами. Исходный код доступен по ссылке <https://github.com/SteshinSS/khnum>.

Эффективность. Есть мнение, что программа написана очень эффективно. На одинаковых входных данных аналогичная однопоточная программа *OpenFLUX2* произвела расчеты за 35 минут. *Khnum* управился за 22 секунды в однопоточном режиме и за 4 секунды в многопоточном. Чтобы доказать эффективность надо сравниться с лучшей из существующих программ — *13CFLUX2*. Хотя автор запустил процесс получения академической лицензии несколько месяцев назад, разработчики выдали доступ именно в последний день отправки тезисов. К сожалению, автор не успел произвести замеры до отправки, но скорее всего успел к моменту вашего чтения этих строк. Пожалуйста, проверьте результаты по ссылке https://github.com/SteshinSS/thesis_msu/tree/master/compare.

Причина эффективности. Профилирование Khnum показало, что большая часть времени тратится на решение систем линейных уравнений, причем при росте числа неизвестных, именно это время растет быстрее всего. При этом, способ решения MFA-систем почти не изучался в литературе.

В работе доказывается

Теорема. *Все матрицы коэффициентов MFA-систем лежат в классе M-матриц.*

Один из базовых методов решения СЛАУ — LU-разложение. Но оно не подходит для разреженных матриц, потому что разложение занимает много памяти. В ответ на это в 1977 году J. Meijerink и H. Vorst предложили специальное ILU-разложение и доказали, что оно существует и устойчиво для любых M-матриц.

В текущей работе проведено сравнение нескольких численных методов для решения MFA-систем. Показано, что стабилизированный метод бисопряженных градиентов с ILU-разложением в качестве предобуславливателя работает быстрее всего.

Схема групповой аутентификации на основе доказательства с нулевым разглашением

Работа удостоена диплома I степени

Шляхтина Елена Анатольевна

Кафедра информационной безопасности

e-mail: ea.shlyakhtina@gmail.com

Научный руководитель — к.ф.-м.н. с.н.с. Гамаюнов Денис Юрьевич

Данная работа посвящена разработке и исследованию свойств алгоритма аутентификации пользователей частных групповых конференций для обмена сообщениями в сети Интернет на основе доказательства с нулевым разглашением. Предложенный метод позволяет аутентифицировать пользователей одноранговой сети без установки общего секрета по стороннему каналу, опираясь на существующие в сети цепочки групп из аутентифицированных пользователей.

Модельным приложением является децентрализованный криптографический чат, реализованный с помощью браузерной технологии WebRTC, позволяющей установить p2p-соединение. Безопасность групповых коммуникаций обеспечивается протоколом mOTR [1], в основе которого лежит криптосистема с открытым ключом. В реализации используется система защищённых групповых коммуникаций [2, 3] на основе этого протокола со свойствами совершенной прямой секретности и отказуемости. В качестве нарушителя рассматривается участник, имеющий возможность перехватывать трафик и контролировать узлы сети. Его цель — выдать себя за другого человека, подменив соответствующие публичные ключи.

В основе метода лежит протокол демократичной групповой подписи DGS [4], ключевой особенностью которого является отсутствие доверенного менеджера и самостоятельность участников. Для построения схемы аутентификации в качестве протокола выработки группового секрета был выбран протокол SSEGK [5], являющийся эффективным аналогом рекомендуемого автором алгоритма.

Разработанный алгоритм позволяет выявить наличие цепочек групп в сети, связывающих пользователей, и в случае их существования, предоставить цепочку групповых подписей — неинтерактивных доказательств с нулевым разглашением, подтверждающую данные пользователя.

В работе показана устойчивость схемы аутентификации к атаке «человек в середине» и атаке Сивиллы. Также были представлены оценки коммуникационной и вычислительной сложности основных алгоритмов и проведены тесты. Оценки сложности предложенного алгоритма линейно зависят от числа пользователей в группе.

Вследствие полученных результатов можно считать схему аутентификации методом цепочек групп применимой в случае сетей с развитыми социальными связями и большим количеством групп.

Литература

- [1] Goldberg I., et al. Multi-party off-the-record messaging // Proceedings of the 16th ACM conference on Computer and communications security. 2009. P. 358–368.
- [2] Коростелева М. В. Исследование протокола криптографически защищенных групповых коммуникаций с функцией отказуемости // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2015. 79 с.
- [3] Шейдаев В. Ф., Гамаюнов Д. Ю. Отказуемые групповые коммуникации в модели глобального неограниченного злоумышленника // ПДМ. 2018. № 2. С. 72–86.
- [4] Manulis M. Democratic group signatures: on an example of joint ventures // Proceedings of the 2006 ACM Symposium on Information, computer and communications security. 2006. 365 p.
- [5] Zheng S., Manz D., Alves-Foss J. A communication—computation efficient group key algorithm for large and dynamic groups // Computer Networks. 2007. Vol. 51, N 1. P. 69–93.

Логический криптоанализ кодовой криптосистемы, построенной на основе квазициклических кодов Хэмминга

Работа удостоена диплома I степени

Резникова Александра Михайловна

Кафедра информационной безопасности

e-mail: reznikova.am@gmail.com

Научный руководитель — к.ф.-м.н. доц. Чижов Иван Владимирович

Описание криптосистемы. Рассматриваемая криптосистема (HQC) [1] участвует в проекте Национального института стандартов и технологий США (NIST) по поиску нового стандарта постквантовой криптографии и, пройдя во второй тур отбора, является кандидатом в стандарты. Это кодовая криптосистема с открытым ключом, разработанная с использованием результатов теории кодирования, в которой используются 2 типа кодов: декодируемый код $C[n, k]$ [2, 3], корректирующий по крайней мере δ ошибок и случайный дважды-циркулянтный код $[2n, n]$ [3]. В работе использовано тензорное произведение кода БЧХ [3] и кода повторения [3]. Тензорное произведение линейных кодов так же является линейным кодом.

Схема алгоритма предполагает перевод сообщения $m \in F_2^k$ в вектор $v = mG + rS + e$, где S — циркулянтная матрица вектора $s = x + yH^0$; H^0 — циркулянтная матрица вектора h ; векторы $h, x, y, e, r \in F_2[X]/(X^n - 1)$ — произвольные, $wt(x) = wt(y) = w$, $wt(e) = w_e$, $wt(r) = w_r$. Порождающая матрица G не является гарантом безопасности схемы, по ней можно найти проверочную матрицу H : $H(mG)^T = 0$. Таким образом, задача расшифрования сводится к задаче нахождения решения системы линейных уравнений:

$$\begin{cases} H(rS)^T \oplus H(e)^T = H(v)^T = b^T, \\ wt(r) = w_r, \\ wt(e) = w_e. \end{cases}$$

Постановка задачи. В данной работе логический криптоанализ направлен на изучение возможности восстановления открытого текста через реализацию алгоритма, получающего на вход открытый ключ и зашифрованное сообщение, и возвращающего КНФ, позволяющую найти набор значений секретных векторов, определяющих зашифрованное сообщение. К построенной алгоритмом КНФ применяются SAT-решатели — программные реализации, определяющие выполнима ли заданная КНФ и, если да, то находящие наборы, при которых она истинна.

Утверждение 1. *Существует полиномиальный алгоритм сведения задачи восстановления открытого текста в криптосистеме HQC к задаче выполнимости КНФ, в которой не более $m \frac{2n-3}{2} + 2n + 1 + 2(2\lceil \log_2 n \rceil + 1)(n - 1)$ переменных и не более $4m(2n - 1) + 4(8\lceil \log_2 n \rceil - 5)(n - 1)$ элементарных дизъюнктов, каждый из которых состоит не более, чем из 4 слагаемых, где $m \times n$ — размерность проверочной матрицы кода, на котором построена криптосистема HQC.*

Полученные результаты. Приведенный алгоритм был реализован в виде программы на языке Python. На вход подается зашифрованное сообщение, открытый ключ и проверочная матрица, на выходе генерируется файл для SAT-решателей. В результате запуска программы с параметрами, предложенными разработчиками криптосистемы, экспериментально полученная длина КНФ оказалась меньше ее оценочной верхней границы из-за сильной разреженности проверочной матрицы H , являющейся систематичной.

В работе были выбраны параметры, при которых размер порождающей матрицы не превосходит 126×24 . В результате ряда экспериментов с различными SAT-решателями был выбран оптимальный по корректности нахождения векторов r и e и по времени исполнения — Maple_LCM_Scavel_155. Для сравнения стойкости HQC к данному виду логического криптоанализа проведены эксперименты на стойкость криптосистемы Мак—Элиса — это криптосистема с открытым ключом, использующая для шифрования сообщения сложение со случайным вектором, заданного веса. Алгоритм так же как и алгоритм HQC является кандидатом для постквантовой криптографии.

Программно реализованы алгоритмы генерации порождающих и проверочных матриц для этих криптосистем с различными параметрами, на основе которых построены КНФ и запущен выбранный SAT-решатель. Результаты показывают, что возросшая сложность результирующей КНФ и недетерминированность найденных решений делает криптосистему HQC более стойкой для предложенного метода логического криптоанализа, по сравнению с приведенной в качестве альтернативы криптосистемы Мак—Элиса.

Литература

- [1] Hamming Quasi-Cyclic (HQC) / C. Aguilar Melchor, N. Aragon, S. Bettaleb, L. Bidoux, O. Blazy, J.—C. Deneuville, P. Gaborit, E. Persichetti, G. Zémor, J. Bos // First PQC Standardization Conference (Fort Lauderdale, 13 April 2018). URL: <http://pqc-hqc.org/documentation.html>
- [2] Берлекэмп Э. Алгебраическая теория кодирования. М. : Мир, 1971. 480 с.
- [3] Мак—Вильямс Ф. Дж., Слоэн Н. Дж. А. Теория кодов, исправляющих ошибки. М. : Связь, 1979. 744 с.

Реализация сетевой атаки по побочным каналам на кэш последнего уровня

Дороднов Григорий Олегович

Кафедра информационной безопасности

e-mail: grigory.dorodnov@protonmail.com

Научный руководитель — к.ф.-м.н. с.н.с. Гамаюнов Денис Юрьевич

Данная работа ставит целью реализацию, изучение, оптимизацию и обобщение атаки по побочным каналам на кэши NetCAT [1].

Атака NetCAT позволяет восстановить нажатия клавиш в SSH—сессии на уязвимом сервере, но не требует выполнения вредоносного кода на нем, то

есть злоумышленнику требуется только сетевой доступ к серверу—жертве, а не локальный и, тем более, физический. Это достигается за счет эксплуатации механизма Direct Data I/O в процессорах компании Intel серверного уровня и использования технологии удаленной прямой записи в память (*Remote Direct Memory Access, RDMA*).

Определение. Адреса памяти, отображаемые в одно кэш-множество будем называть конгруэнтными.

Определение. Множество адресов, запись которых в кэш приводит к вытеснению некоторого адреса x , будем называть вытесняющим. Вытесняющее множество минимального числа элементов будем называть минимальным вытесняющим множеством.

В данной работе предлагаются оптимизации этапов работы метода удаленного определения активности в кэш-памяти по времени доступа к данным — метода *Remote PRIME+PROBE*. Это основной метод, используемый в работе [1]. В то же время, использование данного метода является наиболее трудоемким этапом проведения атаки, так как требует предварительной подготовки — построения минимальных вытесняющих множеств для всего кэша.

За счет предложенного в данной работе метода выбора начальных параметров удалось существенно снизить число шагов алгоритма построения вытесняющих множеств, в среднем вдвое, а использование модификации алгоритма, предложенного в работе [2], позволило снизить асимптотику сложности алгоритма минимизации вытесняющих множеств до линейной относительно мощности минимизируемого множества (в то время как оригинальный алгоритм имел квадратичную асимптотику сложности).

Было разработано обобщение оригинальных алгоритмов атаки, позволяющее отказаться от неявного предположения об устройстве адресации в кэш-памяти, сделанном в работах [3, 4], на основе которых был разработан метод *Remote PRIME+PROBE*. Благодаря этому атака может быть применена большему числу моделей процессоров Intel.

В рамках работы предлагается реализация атаки NetCAT со всеми разработанными оптимизациями и обобщениями. На основе данной реализации была проверена работоспособность атаки и корректность восстанавливаемых в SSH—сессии слов.

Литература

- [1] NetCAT: Practical Cache Attacks from the Network / M. Kurth, B. Gras, D. Andriesse, C. Giuffrida, H. Bos, K. Razavi // S&P. 2020.
- [2] Vila P., Köpf B., Morales J. F. Theory and practice of finding eviction sets // 2019 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP). IEEE, 2019. P. 39–54.
- [3] Oren Y., et al. The spy in the sandbox: Practical cache attacks in javascript and their implications // Proceedings of the 22nd ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security. 2015. P. 1406–1418.

- [4] Hund R., Willems C., Holz T. Practical timing side channel attacks against kernel space ASLR // 2013 IEEE Symposium on Security and Privacy. IEEE, 2013. P. 191–205.

Исследование свойств асимметричных криптографических схем, основанных на теории решеток

Работа удостоена диплома II степени

Лысаков Иван Вячеславович

Кафедра информационной безопасности

e-mail: ivan@lysakov.ru

Научный руководитель — к.ф.-м.н. доц. Применко Эдуард Андреевич

Известно, что в квантовой модели вычислений существуют эффективные алгоритмы решения сложных математических задач, гарантирующих стойкость многих современных криптографических схем. В связи с этим становится важной задача исследования свойств шифров, стойких к атакам с использованием квантовых компьютеров. К таким системам можно отнести семейство схем, основанных на математических задачах из теории решеток.

Решение задачи поиска минимального вектора в решетке позволяет восстановить закрытый ключ для большинства из таких шифров. Алгоритм решения данной задачи был предложен в XIX веке А. Н. Коркиным и Е. И. Золотаревым в [2]. С незначительными изменениями их алгоритм перечисления векторов решетки используется до сих пор. При этом его сложность напрямую зависит от количества решений исходной задачи. Следовательно, возникает потребность построения решеток с максимальным возможным числом минимальных векторов.

Известны следующие оценки на $\tau(n)$ — максимальное число минимальных векторов для произвольных упаковок

$$2^{(1-0.5 \log_2 3)n(1+o(1))} \leq \tau(n) \leq 2^{0.401 n(1+o(1))}.$$

Однако на настоящий момент не существует примеров решеток, на которых достигался бы экспоненциальный рост числа минимальных векторов. Поэтому в данной работе мы ограничились исследованием решеток с более скромным ростом числа минимальных векторов.

Основным объектами исследования являлись так называемые формы Пси-конструкции, предложенной М. М. Анзиным в [1].

Пусть $g^{(n)} = g^{(n)}(x_1, \dots, x_n)$ — квадратичная форма от n переменных. Для произвольных квадратичных форм $g_1^{(n_1)}, \dots, g_k^{(n_k)}$, заданных своими симметричными матрицами G_1, \dots, G_k определим их прямую сумму — квадратичную форму

$$g^{(n+1)} = g_1^{(n_1)} \oplus \dots \oplus g_k^{(n_k)},$$

матрица G которой является диагональной: $G = \text{diag}(G_1, \dots, G_k)$, размера $n+1$, где $n+1 = n_1 + \dots + n_k$.

Введем оператор исключения переменной Ψ :

$$\Psi : g^{(n+1)}(x_1, \dots, x_{n+1}) \rightarrow f^{(n)}(x_1, \dots, x_n) \equiv g^{(n+1)}(x_1, \dots, x_n, -x_1 - \dots - x_n)$$

Определение. Назовем Ψ -формой от n переменных конструкцию вида $\Psi(g^{(n+1)})$, где в качестве $g^{(n+1)}$ берутся прямые суммы форм Коксетера [3] A, D, E, A^*, D^* и E^* .

Настоящая работа посвящена исследованию задачи о максимальном количестве минимальных векторов на множестве всех форм Ψ -конструкции. В частности, была выведена формула зависимости количества минимальных векторов от размерности пространства для важного частного случая Ψ -форм.

Обозначим через f_{D^k} Ψ -форму, являющуюся прямой суммой k букв D одинаковой размерности. Для таких форм верна следующая теорема.

Теорема. Для любого $n = m k - 1 \geq 3$, $m \geq 4$, $k \geq 1$ справедлива формула

$$s(f_{D^k}(\mathbf{x})) = \frac{3k-2}{9k^2} n^3 - \frac{3k^2-10k+8}{12k^2} n^2 + \frac{k^3-2k^2+4k-4}{6k^2} n + c_0,$$

$$c_0 = \begin{cases} \frac{7}{6}k + \frac{1}{6k} - \frac{2}{9k^2} - \frac{1}{12} & \text{при } m \equiv 0 \pmod{6}, \\ -\frac{1}{4}k^2 + \frac{25}{18}k + \frac{1}{6k} - \frac{2}{9k^2} - \frac{1}{12} & \text{при } m \equiv 1 \pmod{6}, \\ \frac{23}{18}k + \frac{1}{6k} - \frac{2}{9k^2} - \frac{1}{12} & \text{при } m \equiv 2 \pmod{6}, \\ -\frac{1}{4}k^2 + \frac{7}{6}k + \frac{1}{6k} - \frac{2}{9k^2} - \frac{1}{12} & \text{при } m \equiv 3 \pmod{6}, \\ \frac{25}{18}k + \frac{1}{6k} - \frac{2}{9k^2} - \frac{1}{12} & \text{при } m \equiv 4 \pmod{6}, \\ -\frac{1}{4}k^2 + \frac{23}{18}k + \frac{1}{6k} - \frac{2}{9k^2} - \frac{1}{12} & \text{при } m \equiv 5 \pmod{6}. \end{cases}$$

Промежуточные выкладки в доказательстве данной теоремы были выполнены с помощью пакета прикладных программ SageMath [5].

На основе качественного анализа данной формулы можно предположить, что при больших n рекорд по максимуму минимальных векторов должен достигаться на формах, являющихся прямой суммой небольшого фиксированного числа форм Коксетера.

Данная теорема в совокупности с проведенными экспериментами, выполненными при помощи библиотеки `frlll` [4], позволяет сформулировать следующие гипотезы относительно вида решения исследуемой задачи:

1. Найдется такое n_0 , что для любого $n > n_0$ максимум по количеству пар минимальных векторов среди всех совершенных Ψ -форм в пространстве размерности n достигается на форме вида $\Psi(D_\ell^* \oplus \Gamma)$, где $\ell \geq 5$, Γ - прямая сумма форм A, D и E .
2. Найдется такое n_0 , что для любого $n > n_0$ максимум по количеству пар минимальных векторов среди всех совершенных Ψ -форм вида $\Psi(\Gamma_{i_1} \oplus \Gamma_{i_2} \oplus \dots \oplus \Gamma_{i_k})$, где для любого $1 \leq j \leq k$ $\Gamma_{i_j} = A_{i_j}$ при $i_j < 4$, $\Gamma_{i_j} \in \{A_{i_j}, D_{i_j}\}$ при $4 \leq i_j \leq 5$ и $i_j \geq 9$, и $\Gamma_{i_j} \in \{A_{i_j}, D_{i_j}, E_{i_j}\}$ при $6 \leq i_j \leq 8$, в пространстве размерности n достигается на формах вида $D_{m_1} \oplus D_{m_2}$, где $m_1 + m_2 = n + 1$, $|m_1 - m_2| \leq 1$, $m_1, m_2 \geq 4$.

Литература

- [1] Анзин М. М. Собрание Сочинений. Статьи 1988-2015. 2019. С. 12–15.
- [2] Korkine A., Zolotareff G. Sur les formes quadratiques // Mathematische Annalen. 1873. Vol. 6, N 3. P. 366–389.
- [3] Coxeter H. S. M. Extreme Forms. // Canadian Journal of Mathematics. 1951. Vol. 3. P. 391–441.
- [4] The FPLLL development team. FPLLL, a lattice reduction library. 2016. URL: <https://github.com/fplll/fplll>
- [5] The Sage Developers. SageMath, the Sage Mathematics Software System (Version 9.0). URL: <https://www.sagemath.org/>

Исследование методов и алгоритмов разработки нового поколения технологий аутентификации, авторизации и учета для индустрии приложения «Интернет вещей»

Работа удостоена диплома I степени

Гуртова Кристина Сергеевна

Кафедра информационной безопасности

e-mail: chrismatis123@gmail.com

Научные руководители — д.т.н. проф. Сухомлин Владимир Александрович,

к.ф.-м.н. Сидорова Юлия Алексеевна

Разработка архитектуры приложений технологии аутентификации, авторизации и учета нового поколения для приложения «Интернет вещей» является актуальной научно-прикладной задачей. Новое поколение данной технологии позволяет увеличить функционал устройств системы «Интернет вещей», при этом сохраняя безопасность системы.

Технология AAA. Согласно [1], механизм AAA (Authentication, Authorization, Accounting) — это механизм идентификации пользователей, определения политик доступа и контроля и отчетность о действиях, выполняемых в системе. Конечным элементом процесса AAA является учет. Этап учета ведется путем записи некой статистики сеанса и информации о сеансе и используется не только для выявления злоумышленников, но также для анализа тенденций, сбора данных и будущей модернизации.

Новое поколение технологии AAA. Новая парадигма «Интернета вещей» позволяет использовать различные объекты в более широком спектре задач [2]. В области здравоохранения устройства разрабатываются для многих целей, таких как наблюдение за пациентами, чтобы помочь им справиться с хроническими заболеваниями, восстановиться после травм или предотвратить инсульт.

Таким образом, для реализации динамичной технологии нового поколения, соответствующей новой парадигме «Интернета вещей», предлагается использование алгоритмов машинного обучения в технологии AAA [3], которое даст

возможность не только защищать конфиденциальные данные пациентов, но и анализировать их и строить предположения.

Архитектура приложения, реализующего технологию AAA нового поколения в медицинской сфере. Для внедрения методов и алгоритмов машинного обучения в технологию AAA нового поколения в приложении «Интернет Вещей» рассматривается третий этап в технологии AAA — учёт и анализ действий в системе. В качестве одного из сценариев берется изучение здоровья человека по его речевым характеристикам.

Так как голос может являться характеристикой состояния организма, то для получения информации о своем здоровье в нашей архитектуре, человеку нужно будет записать свой голос на мобильный телефон (или, например, на умные часы). Прежде чем записать свой голос — человеку нужно пройти аутентификацию и авторизацию, а затем система будет следить за его состоянием. Записи голоса, полученные системой, пересылаются на сервер, в котором и происходит анализ данных (рис. 1). Также в систему может зайти лечащий врач, чтобы следить за состоянием людей и давать какие-то рекомендации. К тому же модель, используя возможности системы «Интернет вещей», может вызывать скорую при очень плохом состоянии человека или просто записать человека к врачу.

Для анализа голоса предполагается использование средства машинного обучения, которые будут определять состояние человека.

Результаты. В практической части работы решена задача исследования уровня сахара в крови человека на основе AAA-приложения с расширенным функционалом фазы учета, что обеспечило более высокий уровень информационной безопасности медицинских приложений. Таким образом, на основе технологии AAA нового поколения удалось разработать типовую архитектуру для приложений «Интернет Вещей», связанных с контролем параметров здоровья. На основе предложенной архитектуры разработано приложение анализа уровня глюкозы в крови.

Литература

- [1] Samociuk D., Adamczyk B. Secure gateway for Internet of Things with internal AAA mechanism // Theoretical and Applied Informatics. 2017. Vol. 28(9). N 3. P. 17–35. DOI: 10.20904/283017
- [2] Mora H., Gil D., Terol R., López J., Szymanski J. An IoT-based computational framework for healthcare monitoring immobile environments // Sensors. 2017. Vol. 17. N 10. P. 2302. DOI: 10.3390/s17102302
- [3] Singh S., Ali N., Lundberg L., Sidorova J. From traditional to next generation AAA: a reference architecture for dedicated iot network, collaboration with ericsson // IV International Conference on Convergent and Cognitive Information Technologies, Moscow. 2019.

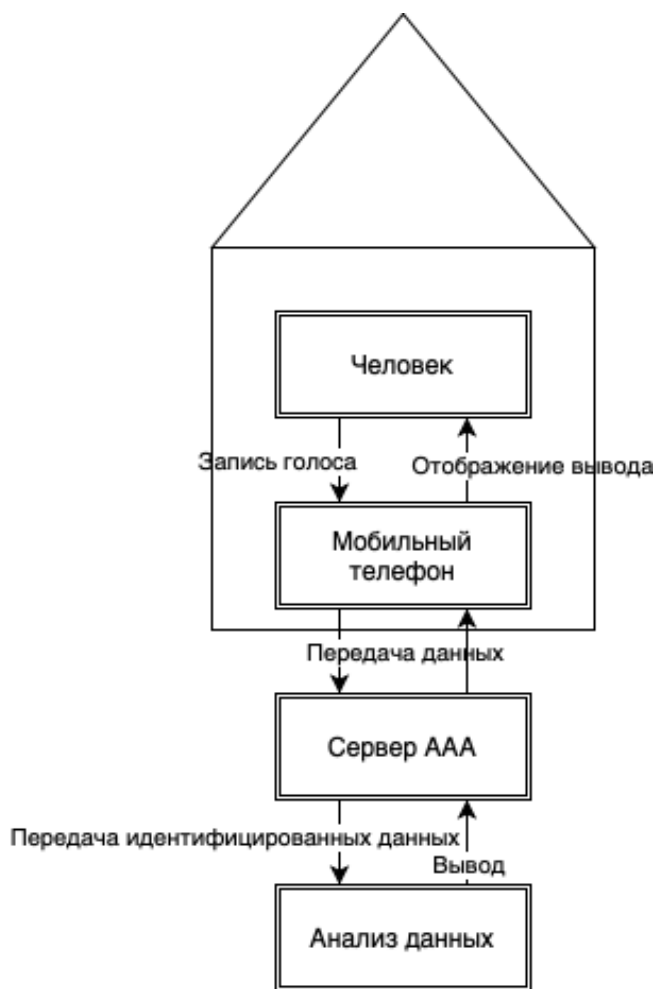


Рис. 1: Предлагаемая архитектура

Выявление структуры и тематической направленности интернет сообществ с использованием методов машинного обучения

Работа удостоена диплома I степени

Васильев Юлий Алексеевич

Кафедра интеллектуальных информационных технологий

e-mail: yuliiivasiliev@gmail.com

Научный руководитель — к.ф.-м.н. доц. Петровский Михаил Игоревич

За последние несколько лет наблюдается устойчивый рост интереса к задаче поиска пользователей в социальных сетях на основе генерируемого контента. Выявление в социальных сетях тематически связанных сообществ или источников, порождающих контент определенной тематики, основано на проведении информационного поиска — процесса выявления неструктурированной документальной информации, удовлетворяющей информационным потребностям.

Современные решения основаны как на поиске по структурированным данным, таким как: возраст, пол, местоположение и т. д., так и по ключевым словам, однако в этом случае найденные пользователи не являются тематически связанными, а также не имеют обстоятельного ранжирования. Один из способов

решения проблем ранжирования и тематической направленности — проведение поиска по документу-образцу, т. к. документ содержит семантику, в отличие от ключевых слов.

Генерируемая в социальных сетях информация состоит из неструктурированных (контентных) данных, причём в подавляющем большинстве это текстовая информация. Многие пользователи, генерирующие тематически близкий контент, образуют между собой социальные связи и формируют тематическое сообщество.

В рамках работы был разработан метод двухэтапного поиска в социальной сети потенциальных участников тематического интернет сообщества по документу-образцу. В этом подходе поисковый запрос для стандартной поисковой машины формируется автоматически с помощью выявленных на основе латентно-семантического анализа [1] документа-образца ключевых слов, а поисковая выдача «обогащается» за счет включения аннотирующей информации из ссылочных структур найденных документов. Результаты поиска ранжируются на основе меры сходства с образцом (с учетом скрытых тематик документа-образца), отфильтровывая таким образом шум и ошибки в выдаче.

Формирование структуры интернет сообществ [2] основано на выборе целевых пользователей – авторов документов семантически близких образцу и построении социального графа с ребрами для разных типов взаимодействий (лайки, репосты, друзья и т. д.) между пользователями — вершинами социального графа.

Нетекстовые признаки пользователей формируются на основе мер авторитетности, центральностей [3] и т. д., и рассчитываются с учетом всех типов связей, а текстовые представлены в виде вектора весов тематик. Для поиска новых потенциальных участников сетевого сообщества, тематически близких к нему, реализован метод, основанный на адаптации двухэтапного метода поиска по документу-образцу. Подход позволяет искать тематически близких пользователей, опираясь на текстовую «аннотацию» построенного сообщества, формируемую на основе постов ключевых участников сообщества, рассматривая аннотацию как поисковый документ-образец.

Однако доступ к генерируемому контенту может быть ограничен из-за приватности пользователей социальных сетей, т. е. скрыт от внешнего просмотра. В таком случае предлагается собственный подход прогнозирования текстовых признаков (ключевых слов) участников сообщества, основанный на обучении нейросетевой модели [4] на нетекстовых характеристиках участников с известными текстовыми характеристиками. Также применяется фильтрация близких по значению термов, основанная на построении матрицы смежности термов по расстоянию Левенштейна.

Экспериментальное исследование и оценка качества была проведена на собранных собственноручно наборах данных социальных сетей Twitter и Вконтакте, а также на открытом наборе данных о фактах террористических атак

Global Terrorism Database. Проведенное экспериментальное исследование подтвердило применимость предложенных подходов на практике.

Все предложенные подходы и методы были реализованы в виде компонент экспериментального программного стенда для мониторинга и анализа активности пользователей в рамках проекта РФФИ №16-29-09555 офи_м по тематике «26-609 Безопасность и противодействие терроризму».

Литература

- [1] Gong Y., Liu X. Generic text summarization using relevance measure and latent semantic analysis // Proceedings of the 24th annual international ACM SIGIR conference on Research and development in information retrieval. ACM, 2001. P. 19–25.
- [2] Hinds P., McGrath C. Structures that work: social structure, work structure and coordination ease in geographically distributed teams // 20th anniversary conference on Computer supported cooperative work. 2006. № 3. P. 343–352.
- [3] Network Analysis in the Social Sciences / S. Borgatti, A. Mehra, D. Brass, G. Labianca // Interspeech. 2009. P. 893–894.
- [4] Хайкин С. Э. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание. М. : Издательский дом «Вильямс», 2006. С. 1104.

Разработка метода оценки качества систем облачного кодирования видеотрансляций

Скляр Егор Дмитриевич

Кафедра интеллектуальных информационных технологий

e-mail: egor.sklyarov@graphics.cs.msu.ru

Научный руководитель — к.ф.-м.н. с.н.с. Ватолин Дмитрий Сергеевич

Видео занимает большую долю трафика в интернете, при этом контроль его качества с помощью людей является сложным и дорогостоящим. Задача объективной и полностью автоматической оценки качества видео особенно актуальна для облачных систем кодирования, поскольку они все чаще применяются для сжатия, обработки, хранения и распространения видеоданных. Различные подходы к решению этой задачи сравниваются по степени корреляции с субъективными оценками. Существующие методы не всегда способны правильно оценить качество видео с точки зрения человека, следовательно, их точность можно улучшить в рамках поставленной задачи. В данной работе описан метод оценки качества систем облачного кодирования видеотрансляций.

В качестве базового был взят метод VMAF [1]. Данный метод основан на объединении различных алгоритмов для оценки качества видео и признаков с помощью машинного обучения (регрессия на опорных векторах). Такой подход демонстрирует большую точность по сравнению с традиционными методами и позволяет учитывать специфику данных, с которыми необходимо работать.

Для повышения ранговой корреляции Спирмена на размеченных наборах данных был рассмотрен ряд новых признаков, а именно: пространственная

информация восприятия, временная информация восприятия и оценка четкости по методу второго размытия.

Другим направлением исследований был метод усреднения покадровых оценок. Вместо арифметического среднего были рассмотрены гармоническое среднее и медиана. Однако, эти подходы не дали улучшения на использованных наборах данных.

По результатам оптимизации с целью нахождения универсальной модели было решено удалить два избыточных признака VIF разных масштабов из базового метода и добавить два новых признака: временная информация восприятия для искаженного видео и разность оценок четкости по методу второго размытия для искаженного и оригинального видео [2].

Для тестирования конечной модели были использованы стандартные для этой задачи публичные наборы данных с известными субъективными оценками качества: NFLX public, VQEG HD3 и LIVE VQD. На всех тестовых наборах данных предложенная модель превзошла базовый метод по значению коэффициента ранговой корреляции Спирмена. На рис. 1 приведены значения коэффициентов корреляции для традиционных методов (SSIM, PSNR), различных модификаций базового метода (VMAF, ST-VMAF, E-VMAF и предложенного метода на наборе данных NFLX public.

Метод был протестирован на видеопоследовательностях, полученных в ходе сравнения облачных сервисов видеокодирования 2019 года лаборатории компьютерной графики и мультимедиа. Модель продемонстрировала адекватность и применимость на практике.

По результатам экспериментов предложенный метод показал значительное увеличение коэффициента корреляции с эталонными оценкам по сравнению с базовым методом VMAF, являющегося одним из лучших методов оценки качества видео в настоящий момент.

Литература

- [1] Toward a practical perceptual video quality metric / Z. Li, A. Aaron, I. Katsavounidis, A. Moorthy, M. Manohara // The Netflix Tech Blog. 2016.
- [2] Kazantsev R., Zvezdakov S., Vatolin D. Machine-learning-based method for finding optimal video-codec configurations using physical input-video features // 2020 Data Compression Conference (DCC). 2020.

Прогнозирование появления новых связей и анализ структуры сетевых сообществ

Калякина Алина Дмитриевна

Кафедра интеллектуальных информационных технологий

e-mail: alinka.kalyakina@yandex.ru

Научный руководитель — к.ф.-м.н. доц. Петровский Михаил Игоревич

В работе рассматривается задача информационного поиска в социальных сетях, в частности задача гражданской безопасности — анализ сетевых сообществ,

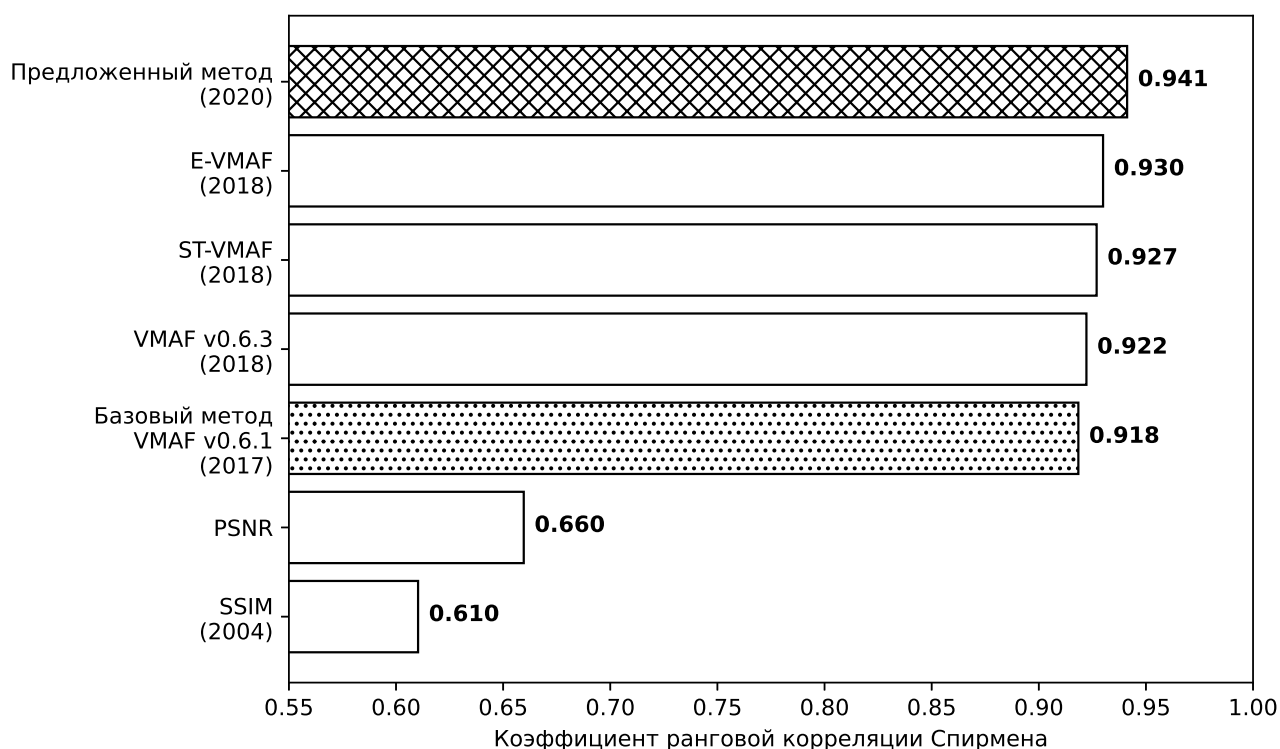


Рис. 1: Коэффициент ранговой корреляции Спирмена для тестового набора данных NFLX public

формирующих и распространяющих информацию экстремистского содержания, а также прогнозирование их дальнейшего развития.

Классические методы анализа социальных сетей используют анализ генерируемого пользователем контента. Во-первых, такой подход учитывает только видимый стороннему пользователю контент (например, личные сообщения не видны), а во-вторых, он не учитывает большие массивы информации, заключенной в лайках, репостах и прочих связях. Информация о связях между пользователями позволяет восполнить пробелы, возникающие в силу существования скрытых каналов обмена информацией между пользователями.

В работе исследуется задача анализа сетевых сообществ на основе связей между их участниками и прогнозирование появления новых связей между участниками сообщества. При решении данной задачи предполагается, что изначально дан граф взаимодействующих пользователей, где вершины — это участники сообщества, а дуги формируются фактами взаимодействия, т. е. связями типа «лайк», «друг», «репост» и другими.

В работе исследуются существующие и предлагаются собственные подходы для формирования признакового пространства отдельных пользователей и связей между ними на основе нетекстовых признаков. в данном признаковом пространстве предложены методы для определения ролей пользователей на основе эталонов (роли типа «мост», «посол», «крупная рыба», «одиночка» и другие), а также методы раскраски на основе экспертной раскраски

отдельных участников с последующим применением для остальных модели прогнозирования ролей с использованием метода опорных векторов.

В задаче прогнозирования появления новых связей в сообществе имеет место проблема выбора отрицательных примеров при прогнозировании возникновения новых связей. Представим, что в данный момент t_0 мы обзораем социальный граф G_0 и требуется предсказать, каким будет граф G_1 , отвечающий моменту $t_1 > t_0$. Встречающиеся в литературе [1, 2] подходы к решению данной задачи, применимые для практики, являются двухклассовыми, т.е. в момент t_0 используются существующие в G_0 связи в качестве положительных примеров, и несуществующие в G_0 связи в качестве отрицательных примеров. Однако это не совсем корректно: показанная в момент t_0 в качестве отрицательного примера связь может появиться в момент t_1 .

В качестве решения описанной проблемы предлагается применение одноклассовых классификаторов, для обучения которых не требуется множество отрицательных примеров. Было проведено экспериментальное исследование, показавшее высокое качество и практическую ценность предложенного подхода.

Литература

- [1] Zhang M., Yixin C., Weisfeiler—Lehman neural machine for link prediction // Proceedings of the 23rd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. Halifax, NS, Canada, 2017. P. 575–583.
- [2] Computationally efficient link prediction in a variety of social network / Fire M., Tenenboim-Chekina L., Puzis R., Lesser O., Rokach L., Elovici Y. // J. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology. 2013. 5. N 1. P. 10–35.

Методы синтеза текстур по образцу

Бабичев Андрей Юрьевич

Кафедра интеллектуальных информационных технологий

e-mail: andreybabichev1998@gmail.com

Научный руководитель — к.ф.-м.н. н.с. Фролов Владимир Александрович

Текстуры являются одной из основных компонент синтеза реалистичных изображений в компьютерной графике. Текстуры можно получить множеством различных способов, однако единственным эффективным подходом является синтез текстур по образцу. При этом, несмотря на разнообразие методов синтеза по образцу, в большинстве из них часто существуют следующие проблемы: первое — это невозможность большинства методов работать с большими разрешениями; второе — это малая вариативность или плохое качество получаемых методами текстур.

Целью данной работы являлась разработка алгоритма синтеза текстур по образцу, который бы генерировал различные бесшовные текстуры сколь угодно большого размера, а также, опционально, модифицировал бы их, добавляя визуальные свойства дополнительно задаваемых текстур. При этом стоит отметить особую актуальность разработки такого алгоритма в связи с быстрым в

последнее время развитием искусственного интеллекта и, как следствие, появлением потребности в высокой вариативности контента для обучения, такого как модели, материалы и текстуры, а также в связи с прогрессированием компьютерной графики и появлением потребности в текстурах со сверхбольшим разрешением 8K.

В качестве предлагаемого метода предложена модификация алгоритма синтеза текстур с помощью выборки на основе патчей [1, 2, 3]. Модификация выполнялась на каждом из основных шагов алгоритма. На шаге инициализации пространства патчей модификация, во-первых, заключалась в использовании вейвлет-преобразования текстуры в качестве дополнительной информации для синтеза, а во-вторых, — в использовании в качестве пространства вместо всевозможных патчей из образца лишь патчей с некоторым шагом. На шаге отбора подходящих патчей модификация заключалась в использовании K-мерных деревьев для поиска ближайших патчей вместо использования полного перебора, а также в выборе одного патча из полученных с помощью модели вероятности, зависящей от расстояния, вместо равновероятного выбора. На шаге вставки лучшего патча модификация состояла в сглаживании матрицы коэффициентов, получаемой с помощью построения пути минимальной стоимости, а также в обработке помимо непосредственно пересекаемых патчей и тех патчей, которые будут пересечены циклично, для достижения бесшовности текстуры. Для добавления дополнительных визуальных свойств предлагалось использовать нейросетевой перенос стиля.

Для сравнения качества текстур, создаваемых базовым методом и его модификацией, было проведено экспертное сравнение. Экспертам предлагалось выбрать лучший метод из двух по сгенерированным ими текстурам. Результатом стал выбор в одной половине случаев модификации как лучшего метода, а во второй половине эксперты затруднились выделить лучший метод. Для выявления полученного в модификации ускорения было проведено экспериментальное сравнение, которое показало, что использование K-мерных деревьев даёт выигрыш в 2-3 раза по сравнению с полным перебором.

Литература

- [1] Real-time texture synthesis by patch-based sampling / L. Liang, C. Liu, Y. Xu, B. Guo, H. Shum // ACM Trans. Graph. 2001. Vol. 20, N 3. P. 127–150.
- [2] Efros A., Freeman W. Image quilting for texture synthesis and transfer // Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. 2001. P. 341–346.
- [3] Zhou T., Johnson B., Li R. Patch-based texture synthesis for image inpainting [Электронный ресурс] // arXiv.org. 2016. arXiv:1605.01576.

Усовершенствование методов глубокого обучения для компьютерной диагностики в проекционной рентгенографии

Работа удостоена диплома III степени

Стоцкий Андрей Владимирович

Кафедра интеллектуальных информационных технологий

e-mail: andrey.stotskiy@graphics.cs.msu.ru

Научный руководитель — к.ф.-м.н. доц. Конушин Антон Сергеевич

Предметная область. Многие вполне излечимые болезни могут оказаться смертельными, если они обнаружены в своей поздней стадии. Только в 2018 году в России было зарегистрировано 61 тысяча смертей от болезней органов дыхания и 63 тысячи новых случаев активного туберкулеза, 40% которых имели запущенную форму заболевания [1].

К сожалению, диагностика болезней органов дыхания зачастую требует экспертизы высококвалифицированных врачей-специалистов — рентгенологов и радиологов. При этом, во всем мире уже много лет существует дефицит высококвалифицированного медицинского персонала.

Введение. В работе рассматриваются глубокие нейросетевые методы компьютерного зрения и их применение в области проекционной рентгенографии для задач классификации и локализации патологических признаков области легких и грудной клетки.

В качестве базового метода выбран алгоритм CheXNet [2], основанный на нейросетевой архитектуре DenseNet [3] и методе Grad-CAM [4]. Каждое из предложенных улучшений основано на достоинствах и недостатках существующих методов, выявленных в результате исследования.

1. Было проведено сравнение базовой нейросетевой архитектуры с более новыми архитектурами, показывающими передовые результаты на других задачах компьютерного зрения. На основании данного сравнения, было предложено заменить базовую нейросеть на архитектуру ResNet v1D [5].

2. Были выявлены закономерности и априорные свойства рентгенографических изображений. На основании этих закономерностей был разработан ряд ограниченных аугментаций, позволяющих искусственно увеличить объем обучающей выборки без понижения диагностической ценности используемых рентгенографических изображений.

3. В большинстве существующих нейросетевых методов анализа рентгенографических изображений используются изображения с искусственно усеченным диапазоном значений. Использование форматов изображений с широким диапазоном значений (напр. DICOM) может позволить избежать потери усеченной информации и повысить точность работы алгоритма. Была предложена процедура, позволяющая использовать данные полного диапазона при обучении и использовании алгоритма.

4. Было установлено, что для большинства рентгенографических изображений, область в которой могут находиться искомые патологии (регион интереса) значительно меньше всего изображения. Использование в основном алгоритме только непосредственно области региона интереса может позволить повысить точность работы алгоритма. Был разработан дополнительный нейросетевой алгоритм, позволяющий извлекать регион интереса из произвольных рентгенографических изображений.

5. Было установлено, что используемый в базовом алгоритме метод Grad-CAM зачастую приводит к предсказанию карт локализаций, слабо коррелирующих с истинным положением патологий. Была предложена процедура генерации эталонной разметки и обучения, позволяющая добавить карты локализации в оптимизируемый функционал при минимальных затратах ресурсов.

Алгоритм	AUROC	PRAUC
Базовый	89.72%	43.11%
+ Усов. 1.	91.58%	46.15%
+ Усов. 2.	91.89%	47.70%
+ Усов. 3.	92.99%	52.74%
+ Усов. 4.	93.38%	53.28%

Табл. 1: Качество классификации.

Алгоритм	AUROC	PRAUC	JACC ₊
Базовый	72.07%	11.66%	2.87%
+ Усов. 5.	98.12%	57.25%	27.62%

Табл. 2: Качество локализации.

Результаты. Была проведена экспериментальная оценка, результаты которой показывают, что предложенные улучшения позволяют значительно повысить качество классификации (табл. 1) и локализации (табл. 2) патологий.

Литература

- [1] Федеральная служба государственной статистики. Российский статистический ежегодник. 2019. С. 106, 228. URL: https://gks.ru/storage/mediabank/Ejegodnik_2019.pdf.
- [2] Rajpurkar P., Irvin J., Zhu K., Yang B. CheXNet: Radiologist-level pneumonia detection on chest X-rays with deep learning [Электронный ресурс] // arXiv.org. arXiv:1711.05225.
- [3] Huang G., Liu Z., Van Der Maaten L., Weinberger K. Q. Densely connected convolutional networks // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2017. P. 4700–4708. arXiv: 1608.06993.
- [4] Selvaraju R. R., Cogswell M., Das A., Vedantam R. Grad-CAM: Visual explanations from deep networks via gradient-based localization // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. 2017. P. 618–626. arXiv: 1610.02391.
- [5] He T., Zhang Z., Zhang H., Zhang Z. Bag of tricks for image classification with convolutional neural networks. // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2019. P. 558–567. arXiv: 1812.01187.

Вероятностные прогнозы фотометрических красных смещений астрономических объектов в рентгеновских обзорах неба с использованием методов машинного обучения

Борисов Виктор Дмитриевич

Кафедра интеллектуальных информационных технологий

e-mail: victor.d.borisov@gmail.com

Научные руководители — к.ф.-м.н. н.с. Мецерыков Александр Валерьевич,

инженер Герасимов Сергей Валерьевич

В 2019 году была запущена российско-германская орбитальная обсерватория «Спектр-Рентген-Гамма» [1], и в июне 2020 года завершила свой первый обзор всего неба в рентгеновских лучах. Основной задачей обзора является построение трехмерной карты квазаров (сверхмассивных черных дыр, находящихся в ядрах других галактик), что является важным для исследования эволюции Вселенной. Для нанесения объектов на трехмерную карту необходимо измерять их космологическое красное смещение (аналог расстояния).

В современных рентгеновских обзорах число детектируемых источников превышает сотни тысяч, и для измерения красных смещений такого числа источников необходимо использовать методы прогнозирования, основанные на фотометрических данных (изображения неба в широких диапазонах излучения), так называемые методы photo-z [2]. Наиболее точными из них являются методы на основе алгоритмов машинного обучения [3]. Важно учитывать, что перед прогнозом photo-z объектов астрономического каталога необходимо отфильтровать звезды Млечного Пути, что требует построения дополнительной модели бинарной классификации.

При построении модели photo-z возникают сложности, связанные с недостаточной информативностью признаков, извлекаемых из фотометрических данных: для двух объектов, с разными значениями целевого признака y (красного смещения), признаки x могут совпадать. Поэтому недостаточно построения точечной оценки y — необходимо оценивать распределение $p(y|x)$ значений y (при этом точечная оценка будет определена как наиболее вероятное значение $\hat{y}(x) = \arg \max_y \hat{p}(y|x)$). Данный подход позволит оценивать доверительные интервалы и достоверность прогнозов.

В работе предложена модель photo-z на основе алгоритма случайного леса, который был выбран как наилучший по точности в задаче прогноза photo-z галактик [3]. Случайный лес представляет собой ансамбль деревьев решений, которые строятся независимо. Случайность и независимость построения деревьев позволяет рассматривать ансамбль прогнозов деревьев, как случайную выборку, порожденную исходным распределением $p(y|x)$ значений целевого признака. Для построения оценки $\hat{p}(y|x)$ непрерывной функции плотности распределения, к ансамблю прогнозов применяется ядерная оценка плотности с гауссовым ядром.

Предложенный алгоритм построения модели дополнительной классификации звезд состоит из следующих шагов: построение фиктивной разметки звезд моделью photo-z квазаров $\hat{\eta}_{qso}(x) = \hat{p}(y|x, qso)$; обучение модели photo-z $\hat{\eta}_{star}(x) = \hat{p}(y|x, star)$ на размеченной выборке звезд; вероятность, что объект x является квазаром определяется как $P(qso|x) = \frac{p_{qso}}{p_{star} + p_{qso}}$, где $p_{qso} = \max_y \hat{p}(y|x, qso)$ и $p_{star} = \max_y \hat{p}(y|x, star)$. Полученная модель превосходит стандартную модель классификации по ранжирующему признаку $zConf$, часто применяющемуся в данной задаче в качестве меры достоверности прогноза [2]: при полноте отбора $TPR = 0.93$ доля ложных положительных классификаций FPR составила 0.10 / 0.21 для предложенного алгоритма / классификации по $zConf$, соответственно.

В рамках работы было построено множество моделей photo-z на основе различных признаков, которые строятся по данным трех современных фотометрических обзоров — SDSS, PanStarrs и DESI Legacy Imaging Survey. На тестовой выборке рентгеновских объектов поля Stripe82X [4], за счет использования данных всех трех вышеупомянутых обзоров, была достигнута точность по метрикам $NMAD$ и доля выбросов $n_{>0.15}$ значительно выше (примерно в 2 раза), чем точность лучших моделей известных в литературе (SOTA), описанных в работах Ananna, 2017 [4] и Brescia, 2019 [5], что является основным результатом работы. Для предложенной модели / шаблонной модели Ananna / нейросетевой модели Brescia на выборке Stripe82X получены значения метрик $NMAD = 0.034 / 0.064 / 0.067$ и $n_{>0.15} = 0.079 / 0.170 / 0.163$, соответственно.

Литература

- [1] Спектр-Рентген-Гамма — Астрофизический проект. URL: http://srg.iki.rssi.ru/?page_id=2&lang=ru
- [2] M. Salvato, O. Ilbert, B. Hoyle The many flavours of photometric redshifts // Nature Astronomy. 2019. Vol. 3. P. 212–222.
- [3] Schmidt S. J., et al. Evaluation of probabilistic photometric redshift estimation approaches for LSST [Электронный ресурс] // arXiv.org. arXiv:2001.03621
- [4] Ananna T. T., et al. AGN Populations in large-volume X-ray surveys: photometric redshifts and population types found in the stripe 82X survey // The Astrophysical Journal. 2017. Vol. 850. article id. 66. 26 pp.
- [5] Brescia M., et al. Photometric redshifts for X-ray selected active galactic nuclei in the eROSITA era // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2019. Vol. 489. P. 663–680.

Трансляция таблицы потоков коммутатора программно-конфигурируемой сети в язык ассемблера сетевого процессора

Маркобородов Андрей Александрович

Кафедра автоматизации систем вычислительных комплексов

e-mail: amark@lvk.cs.msu.ru

Научные руководители — к.ф.-м.н. доц. Волканов Дмитрий Юрьевич,

Скобцова Юлия Александровна

В настоящее время продолжается активное развитие технологии программно-конфигурируемых сетей (ПКС) [1]. Среди протоколов управления широкое распространение получил протокол OpenFlow [2]. Правила обработки пакетов в OpenFlow коммутаторе организованы в таблицы потоков. Для классификации входящих пакетов необходимо производить поиск правила в таблице потоков по значениям полей заголовка.

В работе рассматривается коммутатор, в котором основные задачи по обработке поступающих пакетов выполняет программируемый сетевой процессор (СП) [3]. Поиск в программе на языке ассемблера данного СП реализуется в виде дерева поиска, состоящего из команд условных переходов. Особенностью рассматриваемого СП является отсутствие в памяти процессора отдельной области для данных программы. Данные непосредственно прописываются в машинных командах, поэтому каждое изменение данных требует загрузки обновленной программы в память СП.

При разработке ПКС коммутатора возникает задача по реализации классификации по таблице потоков в программе на языке ассемблера СП. Учитывая частоту обновления таблицы потоков, целесообразно поддерживать инкрементально обновляемое промежуточное представление таблицы потоков.

В работе проводится обзор существующих структур данных для выполнения классификации пакета по таблице потоков OpenFlow. Однако рассматриваемый в работе СП уникален по своей архитектуре, что накладывает ограничения на использование существующих решений.

По результатам анализа подходов предлагается поддерживающая добавление и удаление правил структура данных для промежуточного представления таблицы потоков и два способа трансляции структуры данных в программу на языке ассемблера, реализующую поиск по набору правил таблицы потоков. Разработанные способы позволяют получать программу, в процессе выполнения которой поле заголовка пакета загружается только один раз, а программа, полученная вторым способом, также не содержит дублирующих блоков команд для загрузки полей заголовка.

Для предложенных алгоритмов обновления структуры данных и её трансляции в язык ассемблера СП получена теоретическая оценка сложности. Для данных алгоритмов также проводится экспериментальное исследование с целью оценки объема памяти и среднего времени обработки пакета для получаемой

программы на языке ассемблера, а также с целью оценки времени обновления структуры данных. Экспериментальные данные генерировались с использованием шаблонов таблиц потоков, соответствующих сценариям работы ПКС приложений. Для рассмотренных характеристик были выявлены линейные зависимости от количества правил в исходной таблице потоков. При сравнении программ, получаемых двумя разработанными способами трансляции, были определены шаблоны правил таблицы потоков, на которых каждый из способов получает программу, занимающую меньший объем памяти СП.

Литература

- [1] Смелянский Р. Л. Программно-конфигурируемые сети // Открытые системы. 2012. № 9. С. 15–26.
- [2] OpenFlow switch specification version 1.3.0 (wire protocol 0x04) // Foundation Open Networking. 2012.
- [3] Giladi R. Network processors: architecture, programming, and implementation // Morgan Kaufmann. 2008.

Исследование алгоритмов оценки времени отклика задач в многопроцессорных системах с интервальной неопределенностью длительности выполнения работ

Работа удостоена диплома III степени

Гонопольский Марк Геннадьевич

Кафедра автоматизации систем вычислительных комплексов

e-mail: gmarkmgw@yandex.ru

Научный руководитель — программист Глонина Алевтина Борисовна

В данной работе рассматриваются многопроцессорные системы, представляющие собой набор однопроцессорных вычислительных модулей, на каждом из которых выполняется набор задач под управлением динамического планировщика со статическими приоритетами и вытеснением. Модули объединены в некоторую сеть передачи данных. Каждая задача характеризуется интервалом длительности выполнения работ, приоритетом на сопоставленном ей процессоре и периодом. В течение каждого периода должен быть выполнен один экземпляр задачи, называемый работой. Между задачами с одинаковым периодом могут существовать зависимости по данным. Конфигурация вычислительной системы (ВС) задает характеристики задач и привязку задач к процессорам.

Будем называть временем отклика задачи величину, равную максимальному по всем работам этой задачи значению времен их завершения относительно начала периода. Наихудшее время отклика (WCRT — Worst Case Response Time) задачи — максимальное возможное время отклика задачи в данной ВС. WCRT используется для решения задач, возникающих при проектировании ВС реального времени.

В данной работе рассматривается следующая задача: для заданной конфигурации ВС и заданной задачи требуется найти WCRT этой задачи.

Большинство подходов к оценке WCRT основано на предположении о том, что длительность выполнения каждой работы на процессоре фиксирована и равна максимально возможной (сценарий функционирования ВС, построенный исходя из данного предположения, называется *базовым сценарием*). Однако этот подход может приводить к заниженным оценкам WCRT. Известные методы оценки WCRT, учитывающие интервальную неопределенность длительности выполнения работ, обладают теми или иными недостатками, поэтому авторами было принято решение разработать новый метод решения этой задачи, основанный на методе из работы [1].

Задачу А будем называть *аномальной* для задачи В, если уменьшение времени выполнения задачи А может привести к увеличению WCRT задачи В.

Предложенный алгоритм решения поставленной задачи делится на два этапа.

Сначала для заданной задачи находится соответствующее множество аномальных ей задач. За основу был взят метод из [2], однако он обладает недостатком: множество аномальных задач, которое он находит, неполно. Поэтому был разработан новый алгоритм, с помощью которого для заданной конфигурации ВС и заданной задачи строится полное множество аномальных задач. В работе приведено строгое доказательство корректности этого алгоритма, выполненное посредством доказательства последовательности лемм.

Затем для заданной задачи решается задача оптимизации в пространстве, представляющем собой декартово произведение интервалов длительности выполнения всех аномальных ей задач. Целевая функция задается как WCRT исследуемой задачи при заданных временах выполнения ее аномальных задач; для задач, не являющихся аномальными для заданной задачи, при вычислении целевой функции длительность выполнения работ всегда одинакова и равна максимально возможной.

Для решения этой оптимизационной задачи были реализованы два поисковых алгоритма: алгоритм имитации отжига и генетический алгоритм.

Было проведено исследование точности и времени работы каждого из алгоритмов, а также сравнение алгоритмов между собой и с двумя другими алгоритмами: алгоритмом, основанным на базовом сценарии функционирования ВС, и алгоритмом, основанном на полном переборе. Исследование проводилось на данных, приближенных к реальным, и на искусственно сгенерированных данных с топологиями, соответствующими реальным ВС. Сравнение алгоритмов осуществлялась с помощью математического аппарата статистических гипотез.

В результате экспериментального исследования показано, что на данных, приближенных к реальным, оба алгоритма показывают одинаковую точность, однако время работы алгоритма имитации отжига больше, чем у генетического алгоритма. На большинстве искусственно сгенерированных наборов данных либо генетический алгоритм превосходит по точности алгоритм имитации

отжига, либо алгоритмы показывают одинаковую точность. На наборах данных небольшой размерности с известными значениями WCRT оба алгоритма показали 100%-ую точность получаемых оценок.

Литература

- [1] Samii S., et al. A simulation methodology for worst-case response time estimation of distributed real-time systems // Proceedings of the conference on Design, automation and test in Europe. 2008. P. 556–561.
- [2] Racu R., Ernst R. Scheduling anomaly detection and optimization for distributed systems with preemptive task-sets // 12th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS'06). 2006. P. 325–334.

Разработка и исследование метода предотвращения атак распределённого отказа в обслуживании на контроллер в программно-конфигурируемых сетях на основе оценки поведения хостов

Работа удостоена диплома I степени

Антипина Анна Вячеславовна

Кафедра автоматизации систем вычислительных комплексов

e-mail: anya_antipina@lvk.cs.msu.su

Научный руководитель — асс. Пашков Василий Николаевич

Одной из серьезнейших угроз безопасности для программно-конфигурируемых сетей (ПКС) является DDoS атака на контроллер [1]. Инициатором DDoS атаки выступает злоумышленник, имеющий точки присутствия в ПКС сети в виде *зараженных хостов* с установленным на них специальным вредоносным программным обеспечением (ВПО). ВПО позволяет злоумышленнику удаленно инициировать большое количество новых потоков (*фиктивных потоков*) трафика в сети. Отсутствие соответствующих правил в таблицах потоков коммутаторов для них приводит к формированию запросов к ПКС контроллеру на их установление. Это влечет за собой существенный рост задержек на установление правил для легитимных пользовательских потоков, истощение вычислительных ресурсов и перегрузку сервера контроллера, нарушение работоспособности всей сети с соответствующими прерываниями и отказами в работе пользовательских сетевых сервисов. Поэтому задача своевременного обнаружения, предотвращения и устранения последствий DDoS атаки на контроллер является актуальной и важной задачей, без решения которой внедрение технологий ПКС в реальных сетях невозможно.

В работе предполагается, что топология сети может динамически изменяться (смена IP адресов хостов, подключение/отключение/миграция хостов, временное отключение коммутаторов); контроллер управляет коммутаторами посредством протокола OpenFlow не ниже версии 1.3 [2]; мощность DDoS атаки может изменяться посредством изменения частоты отправки пакетов с зараженных хостов или включения/отключения вредоносной активности

зараженных хостов. Необходимо найти множество зараженных хостов, сформировать правила для приостановки и устранения последствий DDoS атаки.

Предлагаемый метод основан на двухэтапной фильтрации потоков трафика на граничных коммутаторах доступа пользователей к сети и на контроллере с целью выявления зараженных хостов.

Для учета возможности динамического изменения топологии сети метод производит мониторинг состояния сети, сохраняя информацию о хостах в «таблице соответствия хостов коммутаторам». В таблицах потоков граничных коммутаторов устанавливаются правила для первого этапа фильтрации: пакеты сбрасываются, если их MAC и IP адреса источника, входной порт и/или MAC адрес коммутатора не совпадают или отсутствуют в «таблице соответствия». Каждому граничному коммутатору присваивается пороговое значение количества запросов на установление новых потоков (Packet-In). DDoS атака фиксируется при одновременном превышении установленного порога для какого-либо коммутатора и порогового значения для общего количества Packet-In в сети. После фиксации атаки для каждого хоста рассчитывается оценка поведения хоста, как частное среднего количества пакетов на поток и количества Packet-In с данного хоста. По значению оценки хост классифицируется к одному из введенных типов — пользовательский, зараженный или неопределенный. Для зараженных хостов устанавливаются правила второго этапа фильтрации (правила для сброса пакетов). В качестве устранения последствий DDoS освобождаются таблицы потоков коммутаторов, занятых правилами для фиктивных потоков. Также на основе мониторинга поведения зараженных хостов может быть принято решение о переводе определенных хостов из множества зараженных во множество пользовательских за счет удаления правил фильтрации для них.

Метод, разработанный в дипломной работе, был реализован в виде приложения на языке C++ для контроллера RUNOS 2.0 [3]. В результате экспериментального исследования качества работы метода показано, что использование метода позволяет во время атаки уменьшить задержку обработки запросов на установление нового потока до 73–91%, увеличить доступную пропускную способность каналов до 12%, уменьшить утилизацию CPU контроллера на 55% и минимизировать ошибки 1-го (0,184) и 2-го рода (0,166). Недостатком является возможность увеличения утилизации CPU контроллера в отсутствии атаки на 6%. Исследование стабильности работы метода для различных профилей активности зараженных хостов показало, что стабильнее всего метод работает против «синусоидального» профиля мощности DDoS атаки и при одновременном старте зараженных хостов; ошибка 2-го рода может увеличиться при постепенном или попеременном включении зараженных хостов. Исследование эффективности работы метода проводилось на топологиях с различными характеристиками. Выявлена одинаковая эффективность метода для различной частоты миграции, отключения и подключения новых хостов; ошибки могут возрасти при увеличении частоты смены IP адресов хостов и увеличении доли одновременно отключающихся коммутаторов.

Литература

- [1] Сычева Е. А., Пашков В. Н. Исследование и разработка алгоритмов обнаружения и предотвращения DDoS атак на контроллер в программно-конфигурируемых сетях // Программные системы и инструменты. Т. 16. Тематический сборник № 16. М : Издательский отдел факультета ВМК МГУ МАКС Пресс, 2016. С. 19–29.
- [2] Open Networking Foundation. Software-defined networking: the new norm for networks // ONF White Paper. 2012. Vol. 2. P. 2–6.
- [3] RUNOS SDN/OpenFlow Controller. URL: <https://github.com/ARCCN/runos>

Определение изменений коммуникационных свойств параллельных программ при помощи анализа трафика InfiniBand

Домрачева Дарья Андреевна

Кафедра суперкомпьютеров и квантовой информатики

e-mail: dasha_domracheva@mail.ru

Научный руководитель — к.ф.-м.н. с.н.с НИВЦ МГУ Стефанов Константин Сергеевич

На сегодняшний день суперкомпьютерные системы базируются на огромном количестве узлов и современной многопроцессорной архитектуре. Быстродействие приложений в таких системах обеспечивается с помощью высокоскоростных коммутируемых сетей, одной из которых является есть InfiniBand.

С развитием вычислительных систем и запускаемых на них приложений их взаимодействие становится все более сложным, что, в свою очередь, ведет к необходимости разработки различных средств анализа и визуализации работы параллельных приложений. Такие средства могут оказать помощь в увеличении производительности запускаемых приложений.

Так, например, возможность анализировать изменение интенсивности пересылок между отдельно взятыми процессами параллельного приложения может позволить более эффективно размещать процессы на вычислительных узлах для уменьшения времени пересылок сообщений.

В данной работе были поставлены задачи по разработке подхода анализа и нахождения изменений поведения программ, использующих операции MPI, на основе их трафика в сети InfiniBand, а также по разработке метода визуализации различных коммуникационных свойств параллельных приложений.

Для анализа работы приложений производились сбор трасс на суперкомпьютере «Ломоносов» [1] с помощью ранее разработанного подхода [2]. Из трасс извлекалась информация о рангах отправителя и получателя пакетов, типе пакетов, их длин и времени отправки, эта информация анализировалась для составления коммуникационных матриц приложения. При этом благодаря временным меткам появилась возможность составлять матрицы для отдельных отрезков работы приложения.

Визуализация производилась с помощью веб-сервера на основе библиотеки `python dash` [3], это дает возможность задавать параметры для анализа программ с помощью веб-интерфейса в браузере.

Приложение анализировалось на основе его коммуникационных матриц, для чего время работы приложения разбивалось на отрезки фиксированной длины, для каждого из которых составлялась матрица. Далее строился график норм разниц соседних по временным отрезкам матриц; использовались нормы, вычисление которых предоставляется библиотекой `numpy.linalg` [4]. На получаемых графиках наблюдались различные изменения нормы, ассоциируемые с изменениями поведения программы, для их отслеживания был разработан подход, позволяющий находить изменения в автоматическом режиме.

Подход тестировался на различных программах, в том числе на тестах NPB [5]. С помощью разработанного подхода можно было выделить использование коллективных операций MPI и использование пересылок point-to-point, также можно было выделить периоды служебной пересылки небольших пакетов либо же, напротив, периоды интенсивной пересылки больших объемов данных. Помимо этого, точки изменения поведения программ, определяемые автоматически, были сопоставлены с различными точками в исходном коде исследуемых программ, соответствующими вызовам MPI операций. Например, для одного из тестов NPB были выявлены точки, соответствующие использованию коллективных операций в начале и в конце работы программы, а также вызовам операций point-to-point в середине.

Литература

- [1] Воеводин Вл. В., Жуматий С. А., Соболев С. И., Антонов А. С., Брызгалов П. А., Никитенко Д. А., Стефанов К. С., Воеводин Вад. В. Практика суперкомпьютера «Ломоносов» // Открытые системы. М. : Издательский дом «Открытые системы», 2012. № 7. С. 36–39.
- [2] Градсков А. А., Стефанов К. С. Анализ трафика Infiniband для построения коммуникационного профиля приложений // Суперкомпьютерные дни в России: Труды международной конференции (25–26 сентября 2017 г.). М. : Изд-во МГУ, 2017. С. 768–775.
- [3] Python dash library. URL: <https://dash.plotly.com/> (дата обращения: 23.04.2020).
- [4] Python numpy.linalg library. URL: <https://numpy.org/doc/stable/reference/routines.linalg.html> (дата обращения: 23.04.2020).
- [5] NAS Parallel Benchmarks, RNR-94-007 / NASA Advanced Supercomputing Division. URL: <https://www.nas.nasa.gov/publications/npb.html> (дата обращения: 23.04.2020).

Разработка метода прогнозирования слабой масштабируемости суперкомпьютерных приложений

Работа удостоена диплома II степени

Мокров Кирилл Сергеевич

Кафедра суперкомпьютеров и квантовой информатики

e-mail: kmoctrov@mail.ru

Научный руководитель — к.ф.-м.н. в.н.с. Антонов Александр Сергеевич

Из-за необходимости обрабатывать большие объёмы данных и производить колоссальное множество вычислений растёт не только количество написанных параллельных программ, но и их сложность. Одной из метрик качества таких программ является их масштабируемость — свойство параллельной программы, характеризующее зависимость изменения всей совокупности динамических характеристик работы этой программы от множества параметров её запуска [1]. В данной работе рассматривается слабая масштабируемость, то есть зависимость динамических характеристик от количества процессов при фиксированной вычислительной сложности задачи в пересчете на один процесс.

Существует проблема с определением масштабируемости программ на большом количестве узлов из-за их недоступности или долгого ожидания их выделения, поэтому актуальна задача прогнозирования масштабируемости на большие конфигурации вычислительной системы, основываясь на данных, полученных из множественных запусков на малых конфигурациях. Цель работы — разработать метод прогнозирования и проверить его применимость на различных приложениях, собрав экспериментальную базу и оценив точность предсказаний. На метод дополнительно были наложены требования универсальности, то есть для своей работы он не должен использовать информацию о коде, алгоритме и системе, на которой производятся запуски.

Был проведён обзор существующих работ и подходов по предсказанию масштабируемости. В качестве модели была выбрана линейная регрессия, коэффициенты которой ищутся с помощью метода наименьших квадратов (МНК). Из-за того, что МНК минимизирует абсолютную ошибку, а качество предсказаний принято оценивать по вычислению относительной ошибки, аппроксимируемая величина приближается в логарифмическом масштабе (1), где \hat{DF} и DF — полученное из эксперимента и предсказываемое значения динамической характеристики [2]. Ключевым шагом являлась параметризация функции, рассматривались функции вида (2), где I и J — заранее заданные множества, $n \in \overline{1, 5}$. Наиболее точные предсказания удалось получить при помощи функции (3).

$$\log(\hat{DF}) = \log(DF) + error \quad (1)$$

$$\log(DF) = \sum_{k=1}^n \beta_k \cdot \log^{i_k}(p) \cdot \log^{j_k}(N), \quad i_k \in I, \quad j_k \in J \quad (2)$$

$$\log (DF) = \beta_1 \cdot \log (p) + \beta_2 \cdot \log (N) + \beta_3 \cdot \log (p) \cdot \log (N) \quad (3)$$

Качество предсказаний оценивалось по результатам запусков приложений на суперкомпьютере «Ломоносов-2» [3]. Были выбраны приложения различных типов: три вычислительно интенсивные (HPL, алгоритмы матричного умножения SUMMA и DNS), одно со сбалансированным количеством вычислений и операций чтения / записи (HPCG) и одно, которое больше нагружает коммуникационную систему компьютера и не так сильно зависит от количества операций над числами с плавающей запятой в секунду (Graph-500).

В качестве рассматриваемых динамических характеристик в работе были выбраны время исполнения приложения и его производительность. На основе предложенного метода удалось построить предсказания слабой масштабируемости так, что максимальная ошибка предсказаний не превышает 28%, средние значения ошибок для различных приложений варьируются от 3% до 13%. А средняя ошибка по всем построенным предсказаниям составляет 8,6%.

Литература

- [1] Antonov A., Teplov A. Generalized approach to scalability analysis of parallel applications // Lecture Notes in Computer Science. 2016. P. 291–304.
- [2] A regression-based approach to scalability prediction / Barnes B., Rountree B., Lowenthal K., Reeves J., de Supinski B., Schulz M. // Proceedings of the 2008 ACM International Conference on Supercomputing. 2008. P. 368–377.
- [3] Supercomputer Lomonosov-2: large scale, deep monitoring and fine analytics for the user community / Voevodin V., Antonov A., Nikitenko D., Shvets P., Sobolev S., Sidorov I., Stefanov K., Voevodin V., Zhumatiy S. // Supercomputing Frontiers And Innovations. 2019. P. 4–11.

Моделирование влияния агента системы мониторинга производительности на работу пользовательских задач

Работа удостоена диплома III степени

Худолеева Анна Александровна

Кафедра суперкомпьютеров и квантовой информатики

e-mail: legko.zapomnit@mail.ru

Научный руководитель — к.ф.-м.н. Стефанов Константин Сергеевич

Исследование параллельного приложения, выполняемого на суперкомпьютере, можно проводить с помощью системы мониторинга производительности суперкомпьютера. За сбор данных о работе приложения отвечает агент системы мониторинга производительности. Для сбора информации о ресурсах, используемых приложением, агент системы запускается совместно с пользовательским приложением во время его счета, занимает ресурсы вычислительной системы. Таким образом, агент системы вносит негативное влияние в работу параллельного приложения — шум. Зачастую, при описании системы мониторинга

производительности вопрос влияния соответствующей системы на параллельное приложение не обсуждается. Это влияние оценивается как незначительное, методология исследования данного вопроса не приводится. Результаты существующих исследований [1, 2] уровня влияния системы мониторинга на параллельные приложения сложно обобщить — при одинаковой частоте мониторинга влияние систем [1, 2] на коллективные MPI операции сильно различается. При создании системы мониторинга производительности агент этой системы пытаются сделать как можно менее шумным, чтобы не влиять на работающие задачи. Однако способа измерить малый шум, создаваемый системой мониторинга, пока нет, и вопрос влияния агента системы мониторинга на параллельное приложение является малоизученным.

В данной работе описывается программный инструмент, предназначенный для обнаружения влияния системы мониторинга производительности суперкомпьютера — детектор шума. В основе работы детектора шума лежит измерение времени выполнения цикла, содержащего коллективные MPI операции (All-to-All, All-Reduce или Barrier). В работе рассматриваются разные варианты конфигурации запуска детектора шума с целью определения вариантов детектора, обладающих хорошей воспроизводимостью времени работы — стабильностью. Также в работе представлено средство, моделирующее присутствие агента системы мониторинга производительности — источник шума. Источник шума периодически выполняет суммирование массива в течение нескольких миллисекунд, оставшуюся часть секунды бездействует. Долю времени вычислений (от общего времени работы источника), умноженную на сто, будем считать уровнем шума в процентах, который создает источник шума.

Были рассмотрены 8 различных вариантов конфигурации детектора шума для определения стабильности их работы и возможности обнаружить шум 1%. Для каждого варианта детектора проводилось несколько запусков без искусственного шума и с ним на суперкомпьютере Ломоносов-2. Далее были отобраны 4 конфигурации детектора, способные обнаружить шум 1%, и проведено исследование их чувствительности — запуски с уменьшенным процентом нагрузки. В результате работы удалось установить, что детектор, основанный на операции All-to-All с пересылаемым сообщением объемом 2 КБ, и детектор, основанный на операции Barrier, обнаруживают шум от 1% до 0,3%. Шум 0,3% является достаточно малым, поэтому можно считать, что выбранные конфигурации детектора обладают хорошей чувствительностью.

Литература

- [1] Mooney R., et. al. NWPerf: a system wide performance monitoring tool for large Linux clusters // Proceedings of IEEE International Conference on Cluster Computing, ICCS. 2004. P. 379–389.
- [2] Agelastos A., et. al. The lightweight distributed metric service: a scalable infrastructure for continuous monitoring of large scale computing systems and applications // International Conference for High Performance Computing,

Networking, Storage and Analysis, SC. IEEE Computer Society, 2014. P. 154–165.

Исследование предельных значений процессорных датчиков, используемых для анализа производительности суперкомпьютерных приложений

Закиров Гадель Ильгизович

Кафедра суперкомпьютеров и квантовой информатики

e-mail: gadelzakirov@gmail.com

Научный руководитель — к.ф.-м.н с.н.с. НИВЦ МГУ Воеводин Вадим Владимирович

В работе анализируется заложенный производителем набор процессорных датчиков, которые помогают оценивать производительность выполнения программ. Проблема в том, что максимальные значения этих датчиков на практике оказываются меньше заявленных, а порой и вовсе не указаны в явном виде.

В работе затронуто несколько значимых датчиков: промахи в кэш-память L1, L2 и L3, пропускная способность интеркоммуникационной MPI сети и сети, работающей с файловой системой.

Для нахождения теоретических пределов подсистемы памяти были изучены существующие работы по системе памяти процессоров семейства Haswell [1, 2]. Предложенные в статьях методы оценки времени доступа к различным уровням памяти не позволили получить теоретически возможные показания. Однако используемые авторами подходы, основанные на анализе спецификаций памяти микропроцессора и различных архитектурных решений, позволили создать собственный метод оценки теоретических пределов подсистемы памяти. Для получения теоретических пределов пропускной способности сетей были найдены характеристики сетевого оборудования.

Основываясь на полученных теоретических данных, реализован бенчмарк с использованием счетчиков библиотеки RAPI [3]. Программа позволяет получить высокую частоту промахов в определенный уровень кэш-памяти, выбирая случайным образом сегмент из массива данных, размер которого соответствует уровню кэш-памяти, и производя операции с памятью на этом сегменте в случайном порядке. Кроме того бенчмарк поддерживает многопоточный режим, что позволило задействовать все ядра процессора и позволило на практике вплотную приблизиться к теоретическому пределу для каждого из уровней кэш-памяти. Практические пределы пропускных способностей сетей были получены с помощью найденных готовых бенчмарков с различными реализациями, которые были модернизированы для получения более высоких практических значений.

Многократные запуски бенчмарков с различными параметрами на суперкомпьютере Ломоносов-2 дали хорошие результаты в виде практических максимумов для всех уровней кэш-памяти и сетей. Полученные практические значения оказались близкими к теоретическим, достигая в большинстве случаев более 90% от теоретического максимума. Также были выявлены некоторые особен-

ности системы памяти рассматриваемого семейства процессоров, которые не позволяют получить более высокие практические значения исследуемых датчиков. Изучение этих особенностей может стать объектом для дальнейших исследований.

Литература

- [1] Molka D., Hackenberg D., Schöne R., Nagel W. E. Cache coherence protocol and memory performance of the Intel Haswell-EP architecture // Proceedings of the 44th International Conference on Parallel Processing (ICPP 2015). IEEE (2015).
- [2] Hofmann J., Eitzinger J., Fey D., Execution-cache-memory performance model: introduction and validation // CoRR abs/1509.03118 (2015).
- [3] University of Tennessee, PAPI User's Guide, 3.7.2 edition [Электронный ресурс]. URL: https://icl.cs.utk.edu/projects/papi/wiki/Main_Page

Модификация алгоритма привязки координат поезда к графу железных дорог

Работа удостоена диплома II степени

Бурдуковская Светлана Юрьевна

Кафедра алгоритмических языков

e-mail: beswently@gmail.com

Научный руководитель — к.ф.-м.н. доц. Полякова Ирина Николаевна

Связь местоположения путешественника в реальном мире с местоположением на цифровой карте важна во многих приложениях. Хотя для большинства людей это может быть простой задачей для визуального решения, это довольно сложная задача для реализации в виде алгоритма. Представленная работа посвящена алгоритму, который привязывает координаты поезда к графу железной дороги.

GPS — устройство определяет координаты расположения пользователя, но, как и любое устройство, имеет погрешности. Эта погрешность может составлять порядка 20-30 метров. Понятно, что если при определении координат локомотива поезда GPS — устройство показывает, что он находится в лесу, то такого быть не может. Поэтому необходимо определить, в каком конкретно месте на железной дороге находится поезд. И точность здесь важна, так как иногда необходимо определить, достиг ли локомотив железнодорожной станции.

В данной работе был исследован существующий алгоритм с целью выявления причин неточностей привязки координат поезда к графу железных дорог. При анализе существующего алгоритма была найдена одна из причин неточности сопоставления координат — отсутствие фильтрации выбросов. А именно — сигнал GPS может иногда демонстрировать дрожание. Основной причиной такого поведения является влияние многолучевого распространения на сигнал GPS. Решение данной проблемы было следующее — сравнить направление

отрезков, образованных от полученных координат. Отображение координаты транспортного средства происходит только после того, как «будущие» точки обнаружены и проанализированы.

Представленный модифицированный алгоритм, устраняющий неточности сопоставления и временные задержки, на вход получает две составляющие — траекторию транспортного средства и дорожную сеть, а выходом является маршрут [1]. Входные данные обрабатываются двумя этапами модифицированного алгоритма. За основу в представленном алгоритме были взяты геометрический, весовой и топологический методы [2, 3]. Использование нескольких методов выбрано по причине того, что при некоторых условиях конкретный метод дает лучшие результаты, а иногда полностью не будет работать.

Программная реализация алгоритма выполнена на платформе разработки 3D-контента реального времени Unity3d на языке C# [4].

Модифицированный алгоритм сопоставления карт был проверен с помощью GPS-наблюдений, проведенных на маршруте ст. Норильск-Сортировочная – ст. Медная. Этот маршрут охватывает множество различных условий эксплуатации. Обоснование выбора набора данных состояло в том, чтобы проверить тщательность процедуры в неблагоприятных условиях. Было десять преднамеренно введенных отключений GPS продолжительностью 15–20 секунд для проверки производительности во время отключений, фокусируясь на таких областях, как крутые повороты на дороге, переезды, светофоры, которые представляют собой наиболее сложные сценарии для предлагаемого алгоритма. Другой сложной особенностью этой траектории была ее переменная скорость с частыми остановками и внезапными ускорениями. Скорость поезда постоянно менялась из-за переездов, светофоров и остановок.

Оба алгоритма, старый и модифицированный, сравнивались с эталонным решением. Предложенный модифицированный алгоритм показал улучшение по сравнению со старым алгоритмом во всех десяти отключениях GPS. Во время отключения предложенный модифицированный алгоритм показал наибольшее улучшение (90%), которое произошло во время поворота. Решение старого алгоритма имело максимальную ошибку положения 88 м, тогда как решение нового алгоритма отличалось только на 8 м от эталонной траектории. При отключении GPS мы наблюдали среднюю погрешность позиционирования 22 м в старом алгоритме и всего 11 м в модифицированном алгоритме, что является улучшением на 50%.

Литература

- [1] Francisco Camara Pereira, Hugo Costa, Nuno Martinho Pereira An off-line map-matching algorithm for incomplete map databases // European Conference of Transport Research Institutes (ECTRI). 2009. P. 124.
- [2] Pingfu Chao, Yehong Xu, Wen Hua, and Xiaofang Zhou. A survey on map-matching algorithms // School of Information Technology and Electrical Engineering. Australia : The University of Queensland, 2009. P. 12.

- [3] Chen W., Yu M., Li Z.-L., Chen Y.-Q. Austria: integrated vehicle navigation system for urban applications // Proceedings of the 7th International Conference on Global Navigation Satellite Systems (GNSS). 2003. P. 15–22.
- [4] Эндрю Троелсен, Филипп Джепикс Язык программирования C# 7 и платформы .NET и .NET Core. 8-е издание. Диалектика, Вильямс, 2019. 1328 с.

Методы и программные инструменты генерации аккомпанемента к нотным записям

Работа удостоена диплома III степени

Пташник Данила Игоревич

Кафедра алгоритмических языков

e-mail: dip0904@mail.ru

Научный руководитель — к.ф.-м.н. доц. Корухова Юлия Станиславовна

В современном мире компьютеры используются для работы с самыми разными задачами и данными. Одним из наиболее сложных, на данный момент, направлений развития алгоритмов является работа с данными, требующими творческого подхода, в частности с различными видами искусства. Разработка методов и алгоритмов работы с цифровыми данными является востребованной и в музыкальной области. В работе рассматривается подход к решению задачи генерации аккомпанемента музыкальных произведений в заданном стиле. Теория музыки определяет набор правил и критериев, которым в целом должен удовлетворять аккомпанемент, однако они задают лишь общие его черты, и многие из них могут намеренно искажаться композитором. Таким образом, составление аккомпанемента является творческим процессом, для которого нет четкого алгоритма. В работе предложен подход, использующий методы машинного обучения. Нейронные сети позволяют имитировать процесс обучения человека, что дает им возможность распознавать сложные закономерности, которые человек обычно видит интуитивно и от которых зависит природа творчества.

Существует множество работ по генерации музыки при помощи нейронных сетей и схожих методов [1,2]. Были изучены и реализованы CNN-сеть и LSTM-сеть. Первая оказалась применима для анализа структуры музыкального произведения, но не применима для ее генерации. Тогда как LSTM-сеть, хорошо работающая с временными последовательностями, оказалось применима и для генерации музыки. Был подобран подходящий для удобной работы с LSTM-сетью векторный формат машинного представления нот.

В качестве обучающего блока использован предоставляемый компанией Google корпус Bach dataset [3]. Данный корпус содержит более 21 миллиона размеченных музыкальных отрывков в стиле Баха. Каждый отрывок состоит из четырех одноголосных партий. Первая партия считается входной мелодией, остальные — аккомпанементом. Обучение производилось на облачной платформе Google, предоставляющей возможность обучать сети на основе Tensorflow и Keras с аппаратным ускорением.

Обучение сети проводилось с различными параметрами: подбирался оптимальный размер блоков, размерность векторов внутреннего представления, количество эпох обучения, скорость обучения, детали строения сети. Наилучшие результаты были получены при количестве эпох того же порядка, что и количество элементов в блоке. Успешность сети оценивалась процентом нот аккомпанемента, которые она корректно предсказывала в существующих произведениях, не входящих в тренировочный блок. Для метрики с анализом частоты появления аккордов была получена точность от 75–90%, что позволило не только сгенерировать аккомпанемент, но и лучше отличать обученные, но плохие сети от действительно подходящих.

Литература

- [1] Grove R. Automatic harmonization using a hidden semi-Markov model // AAAI Conference on Artificial Intelligence and Interactive Digital Entertainment, North America. Nov. 2013. URL: <https://www.aaai.org/ocs/index.php/AIIDE/AIIDE13/paper/view/7456>
- [2] Ouyang Z., Yin Y., Yan K., Wu J., Hu X., Xia S. Music generation with local connected convolutional neural network. URL: <http://ouyangzhihao.com/wp-content/uploads/2018/12/MUSICGENERATION-WITH-LOCAL-CONNECTED-CONVOLUTIONALNEURAL-NETWORK.pdf>
- [3] Bach dataset — обучающий корпус музыкальных фрагментов в стиле Баха. URL: <https://magenta.tensorflow.org/datasets/bach-doodle>
- [4] Проект и набор инструментов для применения машинного обучения для создания музыки. URL: <https://magenta.tensorflow.org>

Методика построения специализированной анкеты по ограниченному набору вопросов

Зяблова Мария Петровна

Кафедра алгоритмических языков

e-mail: z.masha1998@gmail.com

Научный руководитель — к.ф.-м.н. доц. Абрамов Владимир Геннадьевич

Проведение анкетирования — достаточно трудоемкий процесс, если проводить всю работу вручную. Необходимо создать инструмент, который позволит по небольшому числу исходных вопросов построить полноценную анкету, используя базу вопросов из предыдущих опросов на различные темы.

Для реализации данной задачи разработана программная система, состоящая из трех модулей: модуль разделения вопросов на разделы, модуль построения шаблонов и модуль расширения анкеты.

Модуль разбиения вопросов на разделы получает на вход текстовый файл, содержащий набор вопросов. Исходные вопросы разбиваются на разделы так, чтобы в каждом разделе оказались основной и контрольные к нему вопросы.

Основные вопросы - вопросы, ответы на которые содержат информацию, выясняемую в анкетировании. Контрольные вопросы — вопросы, не отличающиеся по содержанию от основных, но представленные в форме, отличной от формы основного вопроса [1].

Для реализации такого разбиения вопросы проходят несколько этапов обработки, после чего формируются вектора, которые участвуют в кластеризации [2]. На выходе формируются списки вопросов из одного раздела, количество этих списков равно числу выделенных разделов.

Модуль построения шаблонов получает на вход разделы, полученные в результате работы предыдущего модуля. Требуется обработать каждый полученный раздел и сформировать для него шаблон. Созданный шаблон будет являться индикатором для вопросов, определяющим, относится ли этот вопрос к данному разделу.

Для построения шаблонов предложен следующий подход: каждый вопрос из всех разделов представить в векторном виде. Элементами векторов является величина TF-IDF [3] в контексте всех вопросов базы (1).

$$\begin{aligned} TF.IDF(t, d, D) &= TF(t, d) * IDF(t, D), \\ TF(t, d) &= \frac{n_t}{\sum_{k \in d} n_k}, \\ IDF(t, D) &= \log \frac{|D|}{|d_i \in D | t \in d_i|} \end{aligned} \quad (1)$$

Шаблон так же будет иметь векторное представление. Так как он должен описывать все вопросы раздела, то в векторе-шаблоне должны отражаться значения каждого слово, встретившегося в разделе. Поэтому предлагается в качестве шаблона использовать центроид векторов (2) рассматриваемого раздела.

$$\vec{\mu}(c) = \frac{1}{|c|} \sum_{\vec{x} \in c} \vec{x} \quad (2)$$

Модуль расширения анкеты получает на вход шаблоны и ограниченный набор новых вопросов, так называемый пользовательский вопросник. Каждый вопрос из пользовательского вопросника необходимо представить в векторном виде. Затем попарно вычислить косинусные расстояния с шаблонами каждого раздела [4]. Вопрос будет принадлежать тому разделу, шаблон которого оказался на минимальном косинусном расстоянии от него.

После того, как для каждого вопроса из пользовательского вопросника будет определен раздел, к которому он принадлежит, вопросы из этих разделов объединяются в один расширенный вопросник и перемешиваются произвольным образом.

Таким образом, получив на вход пользовательский вопросник, состоящий из небольшого количества вопросов, модуль расширения анкеты на выходе формирует полноценную анкету.

Эксперименты. Для проведения экспериментов был выбран опросник Леонгарда-Шмишека «Акцентуации характера» [5], используемый при проведении психодиагностики. Он включает 103 вопроса. Распределение вопросов по разделам было построено с помощью ручной разметки. Затем были сформированы выборки для построения шаблонов (обучающая) и для оценки качества работы шаблонов (тестовая). Случайным образом вопросы были разбиты на две части: 83 вопроса попали в обучающую выборку и 20 вопросов — в тестовую. Из 20 вопросов верно был определен раздел у 17 вопросов, поэтому точность классификации равна 0,85.

Проведено экспериментальное построение расширенной анкеты. По 10 вопросам была построена полноценная анкета из 40 вопросов.

Литература

- [1] Классификация вопросов анкеты [Электронный ресурс]. URL: https://studopedia.ru/7_124806_klassifikatsiya-voprosov-anketi.html
- [2] Ершов К. С., Романова Т. Н. Анализ и классификация алгоритмов кластеризации, 2016.
- [3] Manning C. D., Raghavan P., Schütze H. Introduction to information retrieval. Cambridge University Press, 2008.
- [4] Обзор алгоритмов кластеризации данных [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/post/101338/>
- [5] Миронова Е. Е. Сборник психологических тестов. Минск, 2005.

Разработка рекомендательной системы в области юриспруденции

Франтовская Дарья Игоревна

Кафедра алгоритмических языков

e-mail: frantovskayad@mail.ru

Научный руководитель — к.ф.-м.н. н.с. Груздева Надежда Валерьевна

Выпускная квалификационная работа посвящена разработке и реализации системы, основанной на знаниях юристов в области оспаривания штрафов за парковку в городе Москве и на знаниях, заключенных в нормативных актах [1, 2, 3], регулирующих данный вопрос. Созданная система близка по функциональности к экспертным системам. В ходе опроса пользователя она позволяет выяснить, действительно ли было совершено правонарушение, или штраф был выписан ошибочно, и возможно его оспаривание. Из-за того, что многие штрафы такого рода выписываются автоматически, ситуации ошибочного выписывания не редки.

Для человека, который не знаком с особенностями процесса составления апелляционных жалоб, являющегося обычной практикой для юристов, определение того, имеет ли смысл подача апелляции в конкретной сложившейся парковочной ситуации, может вызывать трудности. При этом обращение к

эксперту-юристу в ряде случаев является дорогостоящей услугой, а иногда даже превышает сумму выписанного штрафа.

В России правовая система строится по принципам континентального права, т. е. решение по делу выносится на основании законодательных актов, а не по принципу схожести с другим рассмотренным ранее делом, как в странах с правовой системой, основанной на прецедентном праве. Поэтому формализация экспертных знаний была произведена в виде продукций, т. е. правил вида: «если условие, то действие». При этом юристы в ходе своей работы не пытаются строить гипотезы и доказывать их, а базируются на известных знаниях. По этой причине используется продукционная система с прямым выводом, т. е. с направлением поиска от начальных фактов к целевому состоянию [4].

Сбор и анализ знаний экспертов. В ходе интервью и анализа работы юристов был собран список вопросов, с помощью которых получают информацию о конкретной сложившейся парковочной ситуации, при этом было выяснено, что не все эти вопросы должны быть заданы одному пользователю. Юристы не задают лишние вопросы, которые никак не повлияют на конечное решение. Ответы на предыдущие вопросы влияют на то, какой вопрос будет задан следующим. Для достижения навигации по вопросам так, как это происходило бы при опросе человеком, все вопросы были разделены на 31 группу, вопросы из конкретной группы задаются только при ее активации. Знания того, после каких вопросов происходит переключение, и того, какие одна или несколько групп вопросов при этом активируются, представлены правилами.

В итоге для моделирования работы экспертов были составлены правила продукций, которые были логически разделены на типы: три типа для вывода итогового решения и один тип для объяснения полученного решения. Тремя типами являются правила, выводящие вопрос пользователю, правила, которые производят активацию групп вопросов, и правила, выводящие итоговое решение. Всего было составлено 49 задающих вопросы правил и 98 правил, осуществляющих переход между группами вопросов и выводящих решение.

Правила для объяснения результата необходимы для того, чтобы пользователь понял, какие именно статьи регулируют парковку в данной ситуации, и для составления апелляции. Было составлено 80 правил, объясняющих результат с точки зрения законодательства. Объяснение зависит от того, какие факты были накоплены в рабочей памяти до получения итогового заключения.

Реализация рекомендательной системы. Составленные правила продукций были реализованы на языке CLIPS [4]. Для удобства взаимодействия пользователя с системой был реализован графический интерфейс на языке Java с использованием библиотеки Swing.

Система была протестирована двумя практикующими юристами. На промежуточных этапах разработки эксперты вносили свои замечания, которые были учтены. В первоначальный набор правил согласно замечаниям были внесены изменения и корректировки.

Таким образом, разработанная система позволяет пользователю самостоятельно выяснить правомерность выписывания ему штрафа и избежать бессмысленного направления апелляций. На основании полученного заключения человек может решить, предпринимать или нет дальнейшие действия, т. е. апеллировать ли полученный им штраф за парковку.

Литература

- [1] Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях от 30.12.2001 № 195-ФЗ // Российская газета. 31.12.2001. № 256.
- [2] Постановление Правительства РФ от 23.10.1993 № 1090 «О Правилах дорожного движения» // Собрание актов Президента и Правительства РФ. 22.11.1993. № 47, ст. 4531.
- [3] Закон г. Москвы от 21.11.2007 № 45 «Кодекс города Москвы об административных правонарушениях» // Вестник Мэра и Правительства Москвы. 12.12.2007. № 69.
- [4] Частиков А. П., Гаврилова Т. А., Белов Д. Л. Разработка экспертных систем. Среда CLIPS. СПб. : БХВ-Петербург, 2003. 393 с.

Синтаксический анализатор по моделям управления

Работа удостоена диплома I степени

Шамаева Елена Денисовна

Кафедра алгоритмических языков

e-mail: Derinhelm@yandex.ru

Научный руководитель — к.ф.-м.н. доц. Волкова Ирина Анатольевна

Синтаксический анализатор. В настоящее время одной из не полностью решенных задач в области автоматической обработки текста является синтаксический анализ. В данной работе синтаксический анализатор — это программа, которая получает на вход неразмеченное предложение русского языка и возвращает информацию о его синтаксической структуре в виде дерева зависимостей (ориентированного графа, узлы которого помечены словоформами предложения, ребра идут от главного к зависимому слову).

Модели управления. Предлагаемый синтаксический анализатор использует обобщенные модели управления, идея которых предложена в работе [1]. Модели управления задают способ связи слов в предложении. На основе корпуса синтаксически размеченных текстов СинТагРус [2] в рамках предлагаемой работы создана база данных моделей управления. Каждой модели соответствует вес, пропорциональный частоте ее встречаемости в корпусе, что учитывается при работе алгоритма. Анализируя предложение, синтаксический анализатор последовательно устанавливает подчинительные связи между словами в соответствии с той или иной моделью управления.

В данной работе используются модели управления трех уровней. В моделях управления третьего уровня на главное и зависимое слова накладываются морфологические ограничения и ограничения на начальную форму этих слов.

Примеры моделей управления третьего уровня: *синего* {прил., Р.п., ...} + *дома* {сущ., Р.п., ...}; *работаю* {глагол, наст.время, ...} + *с* {предлог}. В моделях управления второго уровня не накладывается ограничение на начальную форму зависимого слова. Примерами таких моделей управления являются {прил., Р.п., ...} + *дома* {сущ., Р.п., ...}; *работаю* {глагол, наст.время, ...} + {предлог}. Модели управления первого уровня задают только морфологические ограничения на главное и на зависимое слова, например, {прил., Р.п., ...} + {сущ., Р.п., ...}; {глагол, наст.время, ...} + {предлог}.

Пример работы анализатора. С помощью анализатора разберем предложение: «*Очень усталый студент готовится к экзамену*». На начальном этапе работы анализатора разбирается первое для разбора слово (обычно это глагол): в данном примере это слово «*готовится*». Затем среди всех выбранных из базы моделей управления, для которых слово «*готовится*» может быть главным, происходит поиск модели, которую можно связать с каким-либо из неразобранных слов. Сначала рассматриваются модели управления 3 уровня, в случае их отсутствия, модели 2 уровня, а затем модели 1 уровня. Среди моделей управления одного уровня выбирается модель с самой высокой оценкой. В данном случае с помощью модели управления 3 уровня связываются слова «*готовится*» и «*к*» (слово «*к*» становится разобранным). Затем на каждом следующем шаге происходит поиск моделей управления, которыми можно связать разобранный слово с неразобранным. В этом примере моделями управления 2 уровня связываются следующие пары слов: «*к*», «*экзамену*»; «*готовится*», «*студент*»; «*студент*», «*усталый*»; «*усталый*», «*очень*». Заметим, что во время разбора исходное предложение переходит от состояния к состоянию, которые различаются набором разобранных слов.

Многовариантность разбора. Допустим, что в предыдущем примере мы хотим получить еще один вариант разбора предложения. Для этого вернемся в предыдущее состояние предложения, в котором слово «*очень*» не разобрано, и посмотрим, есть ли еще какие-нибудь модели управления, с помощью которых можно связать одно из разобранных слов с единственным неразобранным словом «*очень*». С помощью модели управления 2 уровня можно связать слова «*готовится*» и «*очень*» и получить другой вариант разбора предложения. Возвращаясь в другие промежуточные состояния и применяя в них доступные модели управления, можно строить другие разборы предложения. Таким образом, с помощью описанного алгоритма можно найти несколько вариантов разбора предложения, что является одним из преимуществ данного анализатора.

Непроективные предложения. Отличительной особенностью данного анализатора является его устойчивость к непроективным предложениям. Например, такие анализаторы, как Link Grammar Parser и MaltParser, не смогли найти правильный разбор предложения «*Книги нашлись старинные*», а анализатор по моделям управления справился с данным примером.

Заключение. В рамках данной выпускной квалификационной работы разработан и реализован алгоритм многовариантного синтаксического анализа по моделям управления для простого предложения русского языка (без однородных членов, частиц, союзов, обращений), устойчивый к непроективным и неграмматичным конструкциям; построена база данных моделей управления и созданы интерфейсы для работы с базой данных и синтаксическим анализатором. Работоспособность данного алгоритма проверена на предложениях из корпуса СинТагРус, отличных от тех, на основе которых была построена база.

Литература

- [1] Одинцев Н. В. Обобщенные модели управления. Синтаксический анализатор на основе моделей управления // Диалог'2002. Труды межд. семинара. М., 2002. Т. 2. С. 401-406.
- [2] Синтаксически размеченный корпус русского языка: информация для пользователей [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ruscorpora.ru/new/instruction-syntax.html> (дата обращения: 17.06.2020).

Выделение полиномиального слагаемого из решений линейных дифференциальных уравнений с полиномиальными коэффициентами и правыми частями

Решетник Николай Андреевич

Кафедра алгоритмических языков

e-mail: kolya.reshetnik@yandex.ru

Научный руководитель — д.ф.-м.н. проф. Абрамов Сергей Александрович

Рассматривается уравнение:

$$Ly = f(x), \quad (1)$$

где $L = r_\rho(x)D^\rho + \dots + r_1(x)D + r_0(x)$, $D = \frac{d}{dx}$ — операция дифференцирования, $f(x) \in k[x]$, $r_j(x) \in k[x]$, $r_\rho(x)$ и $f(x)$ должны быть ненулевыми полиномами.

Целью работы является разработка алгоритма, позволяющего упростить уравнение (1) с получением минимальной степени правой части при помощи замен переменных вида $y = p(x) + z$, где в качестве $p(x)$ должен быть полином. Сумма используемых в роли $p(x)$ полиномов даст искомое полиномиальное слагаемое решений уравнения.

Был выведен ряд формул. Из них стоит выделить формулу для определения степени полинома, участвующего в замене, так как именно она применяется в формальном описании алгоритма: $m = \deg p(x) = n - \max_{0 \leq i \leq \rho} (n_i - i)$, где $n = \deg f(x)$, $n_i = \deg r_i(x)$. Полином для замены ищется в виде монома: $p(x) = ax^m$.

Предложена схема упрощения правой части уравнения с вычислением полиномиального слагаемого и выведены условия остановки, при которых алгоритм останавливается и возвращает в качестве ответа найденное полиномиальное слагаемое. В остальных случаях алгоритм работает до того момента, как будет

получено однородное уравнение — в таких ситуациях ответ так же является частным полиномиальным решением исходного уравнения.

Алгоритм реализован в системе компьютерной алгебры Maple. Код выполнен в виде функции, которую можно загрузить через консоль среды Maple. Функция принимает уравнение в стандартизированном виде и возвращает итоговое упрощенное уравнение вместе с полиномиальной частью решения. При этом решение сопровождается выводом кратких комментариев, которые можно отключать.

Литература

- [1] Абрамов С. А. Элементы компьютерной алгебры линейных обыкновенных дифференциальных, разностных и q-разностных операторов. М. : МЦНМО, 2012. 128 с.
- [2] Фихтенгольц Г. М. Основы математического анализа. Том 1. М. : Наука, 1968. 448 с.
- [3] Maple online help. URL: <http://www.maplesoft.com/support/help/>

Кроссплатформенное приложение для распознавания шахматных партий в режиме реального времени

Пославский Александр Владимирович

Кафедра алгоритмических языков

e-mail: slink21@mail.ru

Научный руководитель — к.ф.-м.н. с.н.с. Захаров Виктор Борисович

Шахматы являются самой распространенной настольной игрой в мире. Однако для отслеживания партий на турнирах или дистанционной игры людям приходится записывать ходы вручную или использовать дорогостоящие электронные доски. Приложение, способное в режиме реального времени распознавать шахматные позиции по видео, позволит значительно уменьшить нагрузку на каналы связи при трансляции шахматных турниров, а также производить попутный анализ партий программами-анализаторами.

Первостепенной задачей для распознавания шахматных позиций является поиск шахматной доски на изображении. Для проверки эффективности алгоритмов поиска доски был создан набор данных из четырех тысяч фотографий разных шахматных досок. Фотографии были произведены разными камерами, с разным освещением и расположением фигур. При проверке на этом наборе данных лучший существующий алгоритм [1] показал точность не более 80%. После существенных доработок точность алгоритма была повышена до 99.7%, а время обработки одного кадра снизилось с 5 секунд до 50 миллисекунд. Удалось полностью избежать использования нейронных сетей для определения ключевых точек, что и стало залогом более быстрой и точной работы алгоритма.

Для решения задачи классификации шахматных фигур было дообучено более шестидесяти нейронных сетей [2]. Ввиду отсутствия качественных наборов данных был создан собственный набор, состоящий более чем из миллиона разнородных фотографий шахматных фигур. Также была произведена тонкая настройка дообученной нейронной сети MobileNetV3 [3]. Так как реализация данной архитектуры отсутствовала в библиотеке Keras, архитектура была реализована самостоятельно, а после одобрения авторами библиотеки добавлена в общедоступный набор базовых архитектур. Доработанная с учетом задачи классификации шахматных фигур нейронная сеть показывает точность 99.81% при времени обработки одной клетки 3 мс.

Шахматная партия представляет собой итеративные изменения положений и количества шахматных фигур на доске. Для того, чтобы не обрабатывать каждый кадр из потока, а также не обрабатывать клетки, на которых не происходило изменений, был реализован инвариантный к освещению и устойчивый к шумам детектор различий, основанный на алгоритмах детекторов движений и поиска теней [4].

Периодически шахматную доску с фигурами заслоняет рука игрока. И если игрок, задержав свою руку неподвижно над доской, введет в заблуждение детектор движения, то фотография с рукой пойдет на вход классификатору шахматных фигур. Во избежание этого был обучен SSDLite детектор рук игроков, основанный на нейронной сети MobileNetV2 [5]. Для обучения детектора было собрано более десяти тысяч фотографий человеческих рук.

В результате данной работы на языке C++ при помощи библиотек OpenCV и TensorFlow разработано кроссплатформенное приложение, время обработки одного хода в котором не превышает 250 мс на одном ядре смартфона Pixel1, что позволяет распознавать шахматные партии в режиме реального времени.

Литература

- [1] Czyzewski M. A. An extremely efficient chess-board detection for non-trivial photos [Электронный ресурс] // arXiv.org. 2017. arXiv:1708.03898
- [2] Захаров В. Б., Пославский А. В. Использование нейросетей для решения задачи распознавания фигур на шахматной доске // Научная конференция «Ломоносовские чтения». Тезисы докладов. М. : МАКС Пресс, 2019. С. 58–59.
- [3] Searching for MobileNetV3 / A. Howard, M. Sandler, G. Chu, L. Chen, B. Chen, M. Tan, W. Wang, Y. Zhu, R. Pang, V. Vasudevan, Q. Le, H. Adam [Электронный ресурс] // arXiv.org. 2019. arXiv:1905.02244
- [4] Sanin A., Sanderson C., Lovell B. C. Shadow detection: a survey and comparative evaluation of recent methods // Pattern Recognition. 2012, Vol. 45, N 4, P. 1684–1695.
- [5] MobileNetV2: inverted residuals and linear bottlenecks / M. Sandler, A. Howard, M. Zhu, A. Zhmoginov, L. Chen [Электронный ресурс] // arXiv.org. 2019. arXiv:1801.04381

Методы распознавания паронимии для построения компьютерного словаря русских паронимов

Телегина Анна Дмитриевна

Кафедра алгоритмических языков

e-mail: anna.telegina9829@gmail.com

Научный руководитель — к.ф.-м.н. доц. Большакова Елена Игоревна

Паронимы — слова одного и того же корня и одной части речи, внешне похожие, но обладающие разными значениями, например, *адресат* – *адресант*, *политичный* – *политический*. Неправильное употребление слов-паронимов нередко встречается в устной и письменной речи и наблюдается как у носителей языка, так и у иностранцев. Для исправления паронимических ошибок, обучения русскому языку и для повышения культуры речи требуется полный словарь паронимов.

Существующие печатные словари паронимов включают далеко не все паронимы русского языка. Для автоматического построения более полного словаря паронимов в работе [1] был предложен аффиксальный критерий паронимии, в котором мерой внешней схожести слов является расстояние Левенштейна в приставках и суффиксах (аффиксах). Большинство пар слов из наиболее полного печатного словаря паронимов русского языка В. Красных (2000 пар паронимов) удовлетворяют этому критерию, однако аффиксальный критерий не вполне точно определяет внешнее сходство слов и не учитывает семантику, что требует уточнения этого критерия.

В данной работе рассматривается задача уточнения аффиксального критерия паронимии, включая внешнее сходство слов-паронимов и их семантическую близость. Для оценки всех уточнений используется величина степени покрытия словаря паронимов В. Красных, определяемая как полнота критерия относительно выбранного печатного словаря.

На основе наиболее частых ошибок аффиксального критерия были предложены условия учёта семантической близости слов-паронимов с помощью дистрибутивных моделей семантики Word2Vec и FastText. Эти условия позволяют исключить синонимы (*крохотный* – *крошечный*), слова с уменьшительно-ласкательными суффиксами (*бульон* – *бульончик*), а также слова с иноязычными префиксами, которых нет в печатном словаре В. Красных (*информация* – *дезинформация*). Для уточнения внешнего сходства слов были предложены условия, требующие детального анализа аффиксов: отождествление суффиксов, имеющих одинаковую семантику, то есть алломорфов (*комп-ет-ен-ц-ия* – *комп-ет-ент-н-ост-ь*), исключение незначащих гласных в аффиксах на стыке морфем (*мерзость* – *о-мерзительность*), ослабление аффиксального критерия для отглагольных прилагательных (*театр-аль-н-ый* – *театр-ал-из-ов-анн-ый*).

Для исследования паронимии были разработаны программные средства на языках C++ и Python 3. Эти средства предназначены для проведения экспериментов по уточнению аффиксального критерия паронимии, для оценки

уточнений с помощью вычисления покрытия словаря паронимов В. Красных, а также для построения компьютерного словаря паронимов на основе различных комбинаций уточнений аффиксального критерия. Также был разработан прикладной интерфейс для построения компьютерного словаря паронимов с учётом всех уточнений, который допускает задание нескольких параметров построения словаря.

Таким образом, в данной работе было исследовано несколько подходов к уточнению аффиксального критерия паронимии для слов русского языка, а также построены и оценены несколько компьютерных словарей паронимов, которые по объёму существенно превышают размеры печатных словарей. При построении словаря с учетом всех уточнений аффиксального критерия объём построенного словаря оказался порядка 117 тыс. слов, а покрытие словаря В. Красных — 99.6 %.

Литература

- [1] Большакова Е. И., Большаков И. А. Аффиксальный критерий паронимии для построения компьютерного словаря паронимов русского языка // НТИ. Сер. 2. 2015. № 11. С. 28–35.

Применение нейронных сетей к задаче определения наводящих вопросов

Шпитальник Александр Сергеевич

Кафедра алгоритмических языков

e-mail: alexandr_shpitalnik@mail.ru

Научный руководитель — к.ф.-м.н. доц. Бордаченкова Елена Анатольевна

Наводящим вопросом называется вопрос, заданный таким образом, чтобы получить определенный желаемый ответ.

Пример: *Вы бы стали голосовать за Джона Смита — человека, неоднократно нарушившего свои предвыборные обещания?*

Работа посвящена построению классификатора наводящих вопросов на английском языке. Задачу определения, является ли вопрос наводящим, сложно формализовать, так как не существует признаков, однозначно характеризующих наводящие вопросы. В качестве классификатора в работе выступает нейронная сеть.

Перед построением классификатора была собрана и размечена коллекция вопросов. Её размер составил 150 примеров вопросов, наводящих и нейтральных равное число. Основные источники коллекции — англоязычные статьи и сайты по психологии и методикам составления интервью. Часть вопросов была взята из коллекции Question Answering Track Corpora, эти примеры были размечены вручную.

Небольшой размер коллекции и слабая формализуемость задачи привели к решению при построении классификатора использовать технику переноса обучения — дообучение (finetuning). В качестве исходной нейронной сети была взята модель BERT [1], предобученные веса которой выложены в открытый

доступ. Затем проводилось обучение модели на собранной коллекции с различными значениями гиперпараметров — количество эпох и скорость обучения, в итоге были подобраны параметры классификатора.

Дообучение модели на собранной коллекции обеспечило точность классификации (ассигасу) равной в среднем 0.7. Анализ результатов классификации показал, что сеть выучила несложные признаки, например, наличие некоторых языковых конструкций в предложении. Ошибки классификатора связаны с более тонкими языковыми признаками.

Было решено искать улучшение не в усложнении модели классификатора, а в увеличении обучающей коллекции. Пополнение коллекции реализовано следующим образом. В предложении из обучающей выборки закрываются маской два случайных слова. Полученный пример подаётся на вход сети. Для каждого закрытого слова сеть пытается определить, какое слово закрыто. Сеть генерирует два списка слов-кандидатов, подходящих по контексту предложения. Из каждого списка кандидатов выбирается заменяющее слово методом семплирования. Полученный вопрос включается в обучающую выборку.

Важно, чтобы при трансформации вопроса сохранялся его тип (наводящий/нейтральный). Один из признаков наводящего вопроса — использование тонально окрашенных слов. При замене слов необходимо следить, чтобы заменяющее слово не изменило тональность вопроса. Для достижения этого используемая сеть была предварительно обучена учитывать тональность предложений на тональной коллекции SST (Stanford Sentiment Treebank). На вход сети при трансформации вместе с исходным предложением подавалась информация о его тональности.

Для оценки значимости пополнения коллекции была использована кросс-валидация: коллекция разделяется на 13 частей. Одна часть откладывается, классификатор обучается на остальных примерах коллекции, затем отложенная часть используется для тестирования классификатора, получается точность классификации. Процесс выполняется для каждой из частей.

Для каждой отложенной части обучалось два классификатора: один на расширенной обучающей выборке, другой на обычной. Таким образом были получены две парные выборки значений точности, на которых значимость изменения проверялась с помощью критерия знаковых рангов Уилкоксона [2]. Достижимый уровень значимости получился меньше 0.05.

Эксперименты показали, что применение пополненной обучающей выборки позволило улучшить качество классификации наводящих вопросов. В среднем точность повысилась на 0.06.

Программный код модуля обучения классификатора, модуля пополнения коллекции и модуля оценки пополнения выложены в открытый доступ.

Литература

- [1] Devlin J. BERT: pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding [Электронный ресурс] // arXiv.org. URL: <http://arxiv.org/abs/1810.04805> (дата обращения: 07.05.2020).

- [2] Холлендер М., Вулф Д. Непараметрические методы статистики. М. : Финансы и статистика, 1983. 518 с.

Автоматическое построение описания для результатов поиска научных статей

Пеганова Ирина Олеговна

Кафедра системного программирования

e-mail: pegasik98@mail.ru

Научный руководитель — д.т.н., проф. Кузнецов Сергей Дмитриевич

Эта работа посвящена проблеме поддержки исследовательского поиска [1] для учёных. Когда исследователь ищет научные статьи в новой для него предметной области, то он, как правило, плохо знаком с терминологией и его поисковая цель имеет низкую специфичность. Это является причиной высокой длительности и итеративности поиска, так как у исследователя возникают трудности при составлении поисковых запросов, релевантных реальной поисковой потребности, а также при оценке релевантности и полноты результатов поиска. Повысить эффективность поискового процесса при этом можно путём предоставления пользователю более разнообразной информации по поисковому запросу. Описание результатов поиска с помощью визуализации — один из способов это сделать.

Целью работы являлась разработка и реализация метода визуализации результатов поиска научных статей, который будет ориентирован на сценарий исследования пользователем новой для него предметной области. Требовалось реализовать поисковый модуль, использующий этот метод, и интегрировать его в SciNoon [2] — систему исследовательского поиска для групп учёных, разрабатываемую в ИСП РАН.

При разработке метода визуализации было решено отталкиваться от подзадач, которые вынужден решать пользователь при поиске в новой для него предметной области. Во-первых, это локализация предметной области, к которой относятся релевантные поисковой цели научные статьи, и локализация групп таких статей. Для решения этой проблемы использовалась **кластеризация** коллекций найденных статей, и в качестве метода кластеризации был выбран *дивизимный кластеризатор* на основе алгоритма *DBSCAN*. В силу того, что само по себе разбиение результатов поиска на кластеры не несет практической пользы, тематика кластеров описывалась с помощью **ключевых слов**, извлеченных алгоритмом *HCSBasic*. (Этот алгоритм разрабатывался автором при выполнении курсовой работы и был опубликован [3].) Извлекаемые ключевые слова также полезны при выборе пользователем терминологии для поисковых запросов. Помимо этого, в начале работы над новой задачей, полезно сразу ознакомиться с фундаментальными для предметной области статьями — их можно определить по большому количеству цитирований [4]. Чтобы такие статьи были более заметны и пользователь получил представление о «паттернах» предметной области, результаты поиска показываются в виде **неоднородного**

графа цитирования (с узлами статей и авторов), в котором размеры узлов статей пропорциональны числу их цитирований.

На основе этих решений был реализован поисковый модуль, включающий асинхронные сбор и обработку на сервере данных для визуализации, а также сам метод визуализации и пользовательский интерфейс для работы с результатами поиска на клиентской части веб-приложения. Модуль выполнен на языках Scala и TypeScript, для визуализации результатов поиска использовались средства библиотеки D3.js.

Возможность использования модуля на практике показана путем моделирования исследования в новой предметной области: была выбрана решавшаяся ранее поисковая задача и воспроизведен процесс поиска с использованием разработанного программного средства. Эксперимент показал, что визуализация результатов поиска может помочь как с выбором более подходящих для поискового запроса ключевых слов, так и с локализацией релевантных статей в одном кластере.

Более обстоятельное тестирование поискового модуля можно провести, оценивая то, как с его помощью справляются с одними и теми же поисковыми задачами различные пользователи. Для этой цели был реализован специальный модуль для проведения турниров по решению поисковых задач. В будущем планируется его использовать для сравнения различных вариантов поисковых интерфейсов SciNoon.

Основные результаты работы:

1. Разработан метод визуализации результатов поиска научных статей, ориентированный на исследование пользователем новой для него предметной области;
2. Реализован и интегрирован в SciNoon поисковый модуль, использующий эту визуализацию;
3. Возможность использования модуля показана путём моделирования поискового процесса, и разработано программное средство для сравнения различных вариантов пользовательского интерфейса в будущем.

Литература

- [1] Marchionini G. Exploratory search: from finding to understanding // Communications of the ACM. 2006. Vol. 49, N 4. P. 41–46.
- [2] SciNoon: exploratory search system for scientific groups / Nedumov Y., Babichev A., Mashonsky I., Semina N. // IUI Workshops. 2019. P. 26–32.
- [3] Peganova I., Rebrova A., Nedumov Y. Labelling hierarchical clusters of scientific articles // Ivannikov Memorial Workshop. 2019. P. 26–32.
- [4] Chen C. Citespace II: detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature // Journal of the American Society for information Science and Technology. 2006. Vol. 57, N 3. P. 359–377.

Алгоритм доставки страничных нарушений в мониторе виртуальных машин

Работа удостоена диплома II степени

Черемнов Андрей Валерьевич

Кафедра системного программирования

e-mail: cheremnov.av@yandex.ru

Научный руководитель — д.ф.-м.н. зав. каф. Аветисян Арутюн Ишханович

Полносистемные эмуляторы эмулируют всё аппаратное обеспечение и позволяют запускать ОС без внесения изменений. Гипервизоры первого типа работают на аппаратуре, второго — требуют поддержки ОС. Рассмотрим только первый тип и эмуляцию x86-64 на ARM. Целью работы является улучшение алгоритма доставки страничных нарушений в таких гипервизорах.

Была проведена классификация страничных нарушений по источнику: возникающие из-за ММО, защиты гостевого кода, гостевой ОС, теневой таблицы страниц [1]. Была добавлена эмуляция грязного бита и поддержка больших страниц.

Грязный бит — флаг в записи таблицы страниц, обозначающий наличие несохранённой записи. Он аппаратно поддерживается в x86-64, но не в ARM. Грязный бит полезен для улучшения алгоритмов управления памятью внутри ОС, оптимизации кэша и сброса страниц на жёсткий диск.

Linux эмулирует его, используя механизм страничных нарушений [2]. В этой работе использован аналогичный подход. Добавлен новый тип нарушений: связанных с эмуляцией грязного бита. Написан его обработчик.

В аппарате управления памяти многоуровневая трансляция адресов ускоряется кэшем TLB. Однако при множестве обращений к области памяти он быстро переполняется. Большие страницы снижают нагрузку на TLB для доступов к непрерывным частям памяти. Множество записей стандартных страниц заменяются на одну.

Динамическая двоичная трансляция характеризуется блочным преобразованием кода гостевой архитектуры в код основной во время работы транслятора. Любое изменение страницы с гостевым кодом отслеживается для изменения трансляции. Для этого доступ на запись к ней запрещаются.

При таком подходе доступы на запись, не изменяющие код, тоже вызывают страничные нарушения. Число таких обращений существенно возрастёт при использовании больших страниц. Поэтому, если на них появляется гостевой код, они должны быть разбиты на стандартные. Страницы, содержащие область ММО, аналогично должны быть разделены.

В архитектурах x86-64 и ARM есть аппаратная поддержка больших страниц. Для её использования необходимо учесть необходимость разделения. В ходе работы был изменён код, управляющей теневой таблицей страниц, в том числе обработчик её страничных нарушений.

Модифицированный эмулятор был протестирован на SPEC CPU2006 [3]. Достигнуто повышение производительности до 85%.

Литература

- [1] Adams K., Agesen O. A comparison of software and hardware techniques for x86 virtualization // ACM SIGPLAN Notices. 2006. Vol. 41, N 11, P. 2–13.
- [2] Bovet D. P., Cesati M. Understanding the Linux kernel: from I/O ports to process management. O'Reilly Media, 2005.
- [3] Henning J. L. SPEC CPU2006 benchmark descriptions // ACM SIGARCH Computer Architecture News. 2006. Vol. 34, N. 4. P. 1–17.

Контекстно-зависимая рекомендация статей на основе истории поиска

Самохина Анна Романовна

Кафедра системного программирования

e-mail: anna.samokhina.98@mail.ru

Научный руководитель — к.ф.-м.н. доц. Корухова Людмила Сергеевна

Большинство существующих поисковых систем нацелено на удовлетворение отдельных, не связанных друг с другом поисковых запросов и не поддерживает длительный исследовательский поиск [1]. Поэтому активно предпринимаются попытки создания альтернативных или дополнительных поисковых систем, способных обеспечить поддержку более специфичных поисковых задач [2]. Примером таких систем является SciNoon — система совместного исследовательского поиска научных статей [3]. Пользователям SciNoon предоставляется специальное рабочее пространство (называемое картой исследования), куда они могут добавлять релевантные исследованию статьи. Статья на карте изображается в виде узла, содержащего некоторые ее метаданные, такие как название и имена авторов.

Один из важных сценариев, возникающих во время исследовательского поиска, — это повторный поиск уже просмотренной ранее информации. Поэтому целью данной работы являлась разработка и реализация в SciNoon метода рекомендации научных статей на основе поисковой истории пользователя, а также создание интерфейсов для работы с методом.

При построении решения сначала был проведен анализ основных сценариев повторного поиска статей, возникающих при работе с SciNoon, на основе которых были конкретизированы требования к разрабатываемому методу. Это сценарии, в которых пользователь помнит:

- название, или автора статьи, или какие-то другие метаданные,
- о чем шла речь в статье или ее отрывке,
- примерную дату добавления статьи на карту,
- заметки, оставленные для статьи.

В рамках поставленной задачи мы рассматривали научные статьи как полуструктурированные тексты. Традиционный способ работы с такими данными — это поиск по ключевым словам, который и был взят за основу метода. В качестве компонента, обеспечивающего полнотекстовый поиск по данным, была использована поисковая система Solr. Каждый тип данных о статье (название, имена авторов, аннотация, год публикации, полный текст) сохраняется и учитывается при поиске отдельно. Например, слова из названия статьи считаются наиболее важными.

На основе имеющейся в SciNoon информации о действиях пользователя была добавлена поддержка поиска статей по дате добавления на карту.

Пользователи SciNoon имеют возможность размечать статьи на карте, а именно — создавать вопросы и отвечать на них в контексте конкретной статьи. Примеры вопросов разных типов: вопрос «Main contribution» с множеством ответов {method, survey, experiments, dataset}; вопрос «Relevance», ответом на который является вещественное число из диапазона $[0, 5]$; вопрос «Notes» для произвольного текста.

Для поддержки поиска статей по ответам к ним был организован полнотекстовый поиск по ключевым словам, а также разработана модель фильтров, где для каждого вопроса пользователь может задать ограничение на ответы к нему. Например, возможен сценарий, в котором пользователь хочет найти все статьи, для которых он поставил оценку релевантности от 4 до 5 и ответил «dataset» на вопрос об основном вкладе статьи.

Для предоставления возможности использования метода было разработано два интерфейса. Первый интерфейс предназначен для поиска статей непосредственно на карте исследования SciNoon и работает за счет раскраски узлов статей. Приобретаемый статьей цвет отражает степень ее релевантности.

Второй интерфейс, основанный на браузерном расширении SciNoon для Google Chrome, обеспечивает использование метода при работе на других сайтах. Необходимость поискать среди своих статей может возникнуть у исследователя, например, когда он редактирует текст своей научной работы в ShareLatex и хочет найти статьи, чтобы их процитировать. Для получения рекомендаций пользователь может выделить фрагмент текста, контекст цитирования, и нажать на кнопку плагина в панели инструментов. Список статей отобразится во всплывающем окне.

В результате проделанной работы были разработаны и реализованы в системе исследовательского поиска SciNoon:

- метод рекомендации научных статей на основе истории поиска, позволяющий находить статьи по их метаданным, полным текстам, дате добавления на карту, а также по результатам разметки статей пользователем;
- интерфейс для работы с методом на карте исследования;
- интерфейс для работы с методом вне карты исследования, являющийся частью браузерного расширения SciNoon.

Литература

- [1] The perfect search engine is not enough: a study of orienteering behavior in directed search / Jaime Teevan, Christine Alvarado, Mark S. Ackerman, David R. Karger // CHI '04.
- [2] Dan Morris, Meredith Ringel Morris, Gina Venolia SearchBar: a search-centric web history for task resumption and information re-finding // CHI '08.
- [3] SciNoon: exploratory search system for scientific groups / Yaroslav Nedumov, Anton Babichev, Ivan Mashonsky, Natalia Semina // IUI Workshops. 2019.

Средство автоматического тестирования корректности работы аппарата виртуальной памяти

Шляпин Илья Игоревич

*Кафедра системного программирования
e-mail: shliapin.ilia@yandex.ru*

Научный руководитель — к.ф.-м.н. доц. Падарян Вардан Андроникович

Зачастую возникает необходимость запуска программы на платформе, отличающейся от той, под которую она была разработана. Эмуляторы решают эту задачу, однако во время их разработки необходимо проверять, что эмуляция каждого аппаратного средства работает также, как и само это средство.

В выпускной квалификационной работе рассматривается задача разработки инструмента автоматического тестирования аппарата виртуальной памяти. Искомый инструмент предназначен для тестирования реализации аппарата, специфичной для архитектуры x86_64. Также он должен запускаться внутри эмулятора и предоставлять тестам программный интерфейс, обеспечивающий их необходимой функциональностью.

В результате анализа задачи были сформулированы требования к искомому средству: наличие программного интерфейса, запуск вне операционной системы для обеспечения тестов достаточной свободой работы с аппаратным средством, вывод сообщений для отслеживания успешного и неуспешного прохождения тестов.

Рассмотрены существующие инструменты тестирования (например, [1, 2]) и причины, не позволяющие использовать их в данном контексте. Большинство рассмотренных инструментов работают внутри ОС, остальные же не предоставляют достаточно полного API. По итогам рассмотрения было решено разработать средство с нуля, используя идеи существующих.

В программный интерфейс вошли базовые функции работы с виртуальной памятью вместе с функцией `await_PF`, обеспечивающей возможность проверки отсутствия доступа по адресу. Роль последней заключается в том, что при тестировании аппарата виртуальной памяти необходимо в том числе проверять, что страничное нарушение возникает, когда должно возникать, и не возникает в иных случаях. В связи с этим разработка функции `await_PF` происходит вместе с разработкой специального обработчика страничного нарушения, от

которого требуется поддержка продолжения работы теста в случае преднамеренного возникновения данного нарушения. Их совместная работа заключается в следующем:

- функция принимает адрес и тип доступа, после чего сохраняет в специальной глобальной переменной адрес возврата после возникновения ошибки страницы и пытается произвести доступ;
- если срабатывает защита доступа и возникает страничное нарушение, его обработчик смотрит в глобальную переменную, убеждается, что нарушение было специально спровоцировано тестом, и возвращается на хранящийся в переменной адрес;
- функция проверяет, что страничное нарушение произошло, и выводит сообщение об ошибке в противном случае.

Под базовыми функциями работы с виртуальной памятью подразумеваются создание нового отображения виртуального адреса на физический, а также удаление и изменение существующего.

Инструмент соответствует стандарту Multiboot [3], что позволяет запускать его вне ОС с помощью любого загрузчика, также соответствующего данному стандарту.

Проверка работоспособности инструмента была произведена на наборе специально подготовленных тестов. Их задачей было убедиться, что инструмент полностью соответствует сформированным требованиям. Запуск данных тестов подтвердил это.

Литература

- [1] Jenkins W., Vilkomir S., Sharma P., Pirocanac G. Framework for testing cloud platforms and infrastructures // 2011 International Conference on Cloud and Service Computing. IEEE, 2011. P. 134–140.
- [2] Колтунов Д. С., Ефимов В. Ю., Падарян В. А. Автоматизированное тестирование фронтенда транслятора TCG для Qemu // Труды института системного программирования РАН. 2019. Т. 31, № 5. P. 7–24.
- [3] Okuji Y. K. The multiboot specification version 0.6.95. 2009.

Автоматическое реферирование документов с учётом поискового запроса

Работа удостоена диплома II степени

Муинова Анастасия Муинжоновна

Кафедра системного программирования

e-mail: muinova@yandex.ru

Научный руководитель — к.ф.-м.н. доц. Турдаков Денис Юрьевич

Каждая поисковая система рано или поздно сталкивается с проблемой вывода результатов поиска в удобной для пользователя форме. Такой формат вывода подразумевает, что при просмотре результата поиска пользователь сможет

понять, стоит ли открывать документ целиком и продолжать его чтение более детально. Для этого каждый найденный документ должен быть кратко описан небольшим текстом, выделяющим те части документа, которые наиболее релевантны запросу.

Для юридических документов задача автоматического реферирования стоит очень остро [1, 2, 3], т. к. большой объём и сложный язык таких документов усложняет поиск нужной информации. Разбиение документов на логические части, выделение и преобразование релевантных запросу предложений позволяет ускорить поиск по таким документам.

В данной работе исследованы методы ранжирования и сжатия предложений для автоматического реферирования текста с учётом запроса. В связи с отсутствием подходящих датасетов был создан корпус юридических документов на русском языке и проведено на нём сравнение различных решений.

В работе реализуется система, позволяющая по запросу пользователя получить список коротких текстов, наиболее полно характеризующих релевантные документы. Система позволяет разбить документы, по которым будет производиться поиск, на логические части (статьи, пункты, параграфы), после чего по запросу пользователя применяет алгоритмы ранжирования LexRank [4] или Qump [5] и сжатия на основе синтаксического дерева предложения [6]. Таким образом, данная система принимает на вход релевантные запросу тексты и выдаёт их краткое описание, соответствующее запросу.

Построенный датасет отражает особенности домена юридических документов: тексты берутся из расписания болезней, который входит в «Положение о военно-врачебной экспертизе» и содержит перечень заболеваний, определяющий степень пригодности призывника к службе в армии. Расписание болезней содержит 88 статей и охватывает около 2000 различных заболеваний.

Комбинация алгоритмов ранжирования и сжатия предложений и разбиение документов на логические части позволяет учитывать особенности юридических документов, обладает большой гибкостью и показывает более высокое качество по метрике ROUGE [7] на созданном датасете по сравнению с модулем реферирования поисковой системы Solr [8].

Созданный уникальный корпус юридических документов позволяет тестировать систему на наиболее близких к домену юридических документов на русском языке данных.

Литература

- [1] Kanapala A., Pal S., Pamula R. Text summarization from legal documents: a survey. 2017.
- [2] Merchant K., Pande Y. NLP based latent semantic analysis for legal text summarization // IEEE, 2018.
- [3] Galgani F., Compton P., Hoffmann A. Combining different summarization techniques for legal text // Journal of the ACM, 2012.

- [4] Otterbacher J., Ercan G., Radev R. Using random walks for question-focused sentence retrieval // Journal of the ACM, 2005.
- [5] Vanetik N., Litvak M. Query-based summarization using MDL principle // Journal of the ACM, 2017.
- [6] Wang L., Raghavan H., Castelli V., et al. A sentence compression based framework to query-focused multi-document Summarization [Электронный ресурс] // arXiv.org. 2016. arXiv:1606.07548
- [7] Lin C. ROUGE: a package for automatic evaluation of summaries // Journal of the ACM, 2004.
- [8] Solr. URL: <https://lucene.apache.org/solr/>

Автоматизированное преобразование последовательных Си программ для их распараллеливания

Работа удостоена диплома III степени

Корчагин Владислав Николаевич

Кафедра системного программирования

e-mail: vlkorlol@gmail.com

Научный руководитель — д.ф.-м.н. проф. Крюков Виктор Алексеевич

Для распараллеливания программ применяется как ручное распараллеливание, характеризующееся наибольшей трудоёмкостью, так и полностью автоматическое распараллеливание, не позволяющее получить лучшие результаты в силу сложности данной задачи. Альтернативой могут служить средства автоматизированного распараллеливания, которые берут на себя часть работы, но при этом вовлекают программиста в процесс распараллеливания для уточнения отсутствующей у компилятора информации. Одной из таких систем является система SAPFOR [1], разрабатываемая в институте прикладной математики им. М. В. Келдыша.

Система SAPFOR основывается на использовании компиляторных проектов Clang и llvm, и позволяет производить различные виды статического анализа, динамический анализ, а также выполнять автоматическое распараллеливание в моделях DVMH [2] и OpenMP, и, кроме того, производить нацеленные на распараллеливание преобразования исходного кода.

В рамках данной работы реализованы преобразования исходного кода, расширяющие класс программ, распараллеливание которых можно автоматизировать с помощью системы SAPFOR. Практика применения SAPFOR показывает, что востребованными преобразованиями являются сужение и расширение массива, а также разворот и перестановка циклов.

Для выполнения преобразований с помощью SAPFOR, пользователь должен расставить в исходном коде программы спецификации, оформляемые в виде компиляторных директив. Преобразования реализованы методом обхода синтаксического дерева программы и используют результаты различных видов статического анализа SAPFOR, в частности для проверки возможности проведения преобразований требуется анализ зависимостей.

Преобразование расширения массива создает перед гнездом циклов локальную копию массива с дополнительными измерениями, размерности которых указываются в клаузе. Все обращения к старому массиву в преобразуемой области будут заменены на обращения к новому массиву. Допустимо расширять скаляры, что позволяет векторизовать циклы. Применяется для разделения циклов. Для проведения данного преобразования необходима приватизируемость массива в цикле.

Преобразование сужения массива работает аналогично предыдущему, за исключением того, что копия массива имеет меньшее количество измерений относительно оригинала и размещается непосредственно в гнезде циклов, вследствие чего может нарушаться тесно-вложенность. Применяется для слияния циклов.

Разворот цикла изменяет порядок итерирования на обратный. Такое преобразование требуется в первую очередь как промежуточное для слияния циклов. Если точные границы цикла могут быть вычислены на этапе статического анализа, то они будут подставлены в заголовок цикла, в противном случае в заголовок попадут выражения, значения которых будут вычислены во время выполнения. Для выполнения преобразования необходимо отсутствие зависимостей в преобразуемом цикле [3].

Перестановка циклов может быть полезна для улучшения векторизации и кэширования и, кроме того, требуется для более сложных преобразований. Новый порядок циклов в гнезде определяется результатом последовательного применений транспозиций к исходной перестановке.

Реализация описанных преобразований в системе SAPFOR позволила применить их при распараллеливании программ из пакета NAS Parallel Benchmarks, предназначенных для тестирования производительности высокопараллельных суперкомпьютеров. В частности, при распараллеливании программы LU в модели DVMH оказывается необходимым выполнение каждого из описанных преобразований.

Литература

- [1] Kataev N. A. Application of the LLVM compiler infrastructure to the program analysis in SAPFOR // Supercomputing, Cham: Springer. 2018. Vol. Communications in Computer and Information Science. No. 965. P. 487–499.
- [2] Расширение DVM-модели параллельного программирования для кластеров с гетерогенными узлами / Бахтин В. А., Клинов М. С., Крюков В. А., Поддеригина Н. В., Притула М. Н., Сазанов Ю. Л. // Вестник Южно-Уральского государственного университета, серия «Математическое моделирование и программирование», № 18 (277). Выпуск 12. Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ. 2012. С. 82–92.
- [3] Wolf M. High performance compilers for parallel computing. Oregon Graduate Institute of Science and Technology, 1995.

Именной указатель

- Абрамова В. В., 37
Антипина А. В., 83
Ашабоков А. Н., 41
Бабичев А. Ю., 74
Балобанова Н. А., 24
Борисов В. Д., 78
Бурдуковская С. Ю., 91
Васильев Ю. А., 69
Володина О. С., 14
Вылегжанин А. С., 32
Гонопольский М. Г., 81
Гуртова К. С., 67
Домрачева Д. А., 85
Дороднов Г. О., 63
Еремеев М. А., 53
Закиров Г. И., 90
Зяблова М. П., 94
Калякина А. Д., 72
Кириллов В. И., 21
Козяйкин Д. А., 28
Кононыхин Д. А., 17
Коптелов Д. А., 52
Кормаков Г. В., 49
Королев Н. С., 45
Корчагин В. Н., 114
Косов А. В., 12
Кочетов Е. В., 25
Кочкарев А. В., 15
Кулешов И. А., 39
Купраш Е. Д., 55
Лопунов М. А., 57
Лысаков И. В., 65
Маргасов А. О., 43
Маркобородов А. А., 80
Матвеев В. С., 9
Мокров К. С., 87
Муинова А. М., 112
Наволоцкий А. А., 43
Пеганова И. О., 106
Петренко Д. П., 47
Пославский А. В., 101
Процеров С. Д., 29
Пташник Д. И., 93
Резникова А. М., 62
Решетник Н. А., 100
Самохина А. Р., 109
Скляр Е. Д., 71
Стешин С. С., 58
Стоцкий А. В., 76
Телегина А. Д., 103
Тихонова В. А., 19
Уваркин И. Г., 23
Усов В. А., 30
Устюжанин А. О., 51
Филиппова М. А., 27
Франтовская Д. И., 96
Худолеева А. А., 88
Черемнов А. В., 108
Шамаева Е. Д., 98
Шляпин И. И., 111
Шляхтина Е. А., 60
Шпитальник А. С., 104
Шульмин Д. А., 10
Яременко Г. А., 35