

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Суворов Антон Дмитриевич
Должность: Ректор
Дата подписания: 13.06.2025 20:30:48
Уникальный программный ключ:
a39bdb15d680d5b0adb1cedda15c1efb14747dc0

СКОЛКОВСКИЙ ИНСТИТУТ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ (Сколтех)

Рабочая программа
дисциплины

Теоретические методы глубокого обучения

Преподаватель	Яроцкий Дмитрий Александрович, профессор, д.ф-м.н.
---------------	---

Аннотация

Описание курса

Глубокое обучение (Deep Learning - DL) является чрезвычайно важной прикладной дисциплиной, в настоящее время недостаточно хорошо понимаемой на теоретическом уровне. Мы знаем, что нейронные сети хорошо работают, но не можем этого полностью объяснить. Тем не менее, в последние годы наблюдается быстрый рост публикаций, проливающих свет на новую математику, лежащую в основе DL, и мы видим много интересных связей между DL и другими областями, такими как теория аппроксимаций, дифференциальные уравнения, теория информации, теория случайных матриц и статистическая физика. Данный курс ставит целью познакомить студентов с этими передовыми достижениями.

1. Основная информация

Академический уровень курса	Магистратура Аспирантура
Количество кредитов	3

Предварительные требования к курсу / рекомендации

Это теоретический курс, который включает в себя относительно сложную и разнообразную математику. Кроме того, желательно (но не критично) знакомство с машинным и глубоким обучением.

Тип оценки - дифференцированная

Отображение оценок в процентах

A:	80
B:	70
C:	60
D:	50
E:	40
F:	0

2. Содержание курса

Тема	Краткое содержание	Лекции (час)	Семинары (час)	Лабораторные занятия (час)	Самостоятельная работа (час)
Введение и общий обзор	Нейронные сети. Глубокое обучение и современное состояние его теоретического понимания. Основные направления исследований. Обзор связей со статистической теорией обучения, теорией приближений, теорией случайных матриц, теорией информации, статистической физикой и другими областями.	2			
Выразительность	Меры выразительности сети. Аппроксимация с помощью ANNs. Теорема об универсальной аппроксимации. Пространства Соболева. Скорости аппроксимации. Канонические скорости непрерывной параметрической аппроксимации. Быстрая аппроксимация гладких функций сетями ReLU. Измерение Вапника-Червоненкиса. VC-размеры перцептронов. Верхняя и нижняя границы для VC-dim глубоких сетей. Применение к границам обобщения. Техника извлечения битов. Глубокие узкие сети. Выразительность с точки зрения количества линейных фигур и количества наборов уровней Бетти. Энтропия и сложность шаров Соболева.	5	5	1	14
Иерархические генеративные модели	Поток информации по деревьям. Бинарный симметричный канал. Подключение к модели Изинга на дереве Кэли. Проблема разрешимости реконструкции. Фазовый переход между разрешимым и неразрешимым режимами.	2	2	1	7
Оптимизация	Градиентный спуск и обратное распространение. Локальные минимумы и седловые точки на поверхности потерь. Скорость сходимости к локальным минимумам. Уклонение от невырожденных седловых точек. Глубокие линейные сети. Отсутствие неглобальных минимумов в линейных сетях.	3	3	1	10
Широкие сети	Теория среднего поля и гауссова аппроксимация. Переход от порядка к хаосу в широких сетях. Глубина распространения информации. Теория случайных матриц. Ансамбли Уишарта и Вигнера.	5	5	1	14

	Полукруглые законы и Законы Марченко-Пастура. Свободная вероятность и некоммутативная центральная предельная теорема. Применение теории случайных матриц к широким сетям. Нейронное касательное ядро.				
--	---	--	--	--	--

3. Результаты обучения

Результаты обучения в Сколтехе указаны в соответствии со структурой результатов обучения в Сколтехе

1. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ЗНАНИЯ

- 1.1. Знание математики и естественных наук
- 1.2. Знание прикладных и инженерных наук, включая современные
- 1.4. Междисциплинарное мышление, структура знаний и интеграция

2.1. ПОЗНАНИЕ И СПОСОБЫ РАССУЖДЕНИЯ

- 2.1.1. Аналитическое мышление и решение проблем
- 2.1.3. Творческое мышление

2.2. ОТНОШЕНИЕ И ПРОЦЕСС ОБУЧЕНИЯ

- 2.2.3. Ответственность, интенсивность, настойчивость, безотлагательность и воля к достижению поставленных целей
- 2.2.4. Находчивость, гибкость и способность адаптироваться
- 2.2.5. Самосознание и стремление к самосовершенствованию, обучению на протяжении всей жизни и воспитанию

2.3. ЭТИКА, СПРАВЕДЛИВОСТЬ И ДРУГИЕ ОБЯЗАННОСТИ

- 2.3.1. Этические действия, честность и мужество

3.1. КОММУНИКАЦИЯ В МЕЖДУНАРОДНОЙ СРЕДЕ

- 3.1.2. Письменная, электронная и графическая коммуникация
- 3.1.3. Устная презентация и обсуждение
- 3.1.5. Общение на английском языке в научной, деловой и общественной среде

3.2. КОМАНДНАЯ РАБОТА И ЛИДЕРСТВО

- 3.2.1. Формирование эффективных команд

4.1. ПОНИМАНИЕ ГЛОБАЛЬНОГО СОЦИАЛЬНОГО, ЭКОЛОГИЧЕСКОГО И ДЕЛОВОГО КОНТЕКСТА

- 4.1.3. Понимание технических продуктов, систем и инфраструктуры отрасли

4.2. ДАЛЬНОВИДНОСТЬ — ИЗОБРЕТЕНИЕ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПОСРЕДСТВОМ ИССЛЕДОВАНИЙ

- 4.2.1. Процесс исследования — гипотеза, доказательства и защита
- 4.2.2. Фундаментальные исследования, ведущие к новым научным открытиям

4. Задания и выставление оценок

Требование к физической посещаемости (% от числа занятий)	70
---	----

К требованиям о личном посещении:

студентам разрешается пропускать занятия только по уважительной причине, имеющей обоснование, например, медицинское заключение

Тип назначения	Краткое содержание задания	% от итоговой оценки за курс
Домашние задания	Еженедельные задания, включающие теоретические занятия и упражнения по программированию	30
Финальный проект	Проект, выполняемый индивидуально или в небольшой команде. Студенты могут разработать и представить детали какой-либо соответствующей публикации (предпочтительно вместе с компьютерными экспериментами) или представить свои собственные исследования, если они соответствуют теме курса.	25
Финальный экзамен	Письменное теоретический 3 часовой экзамен, содержащий 10-15 вопросов и проблемы.	40
Участие в занятиях	Активное участие в классных дискуссиях и упражнениях.	5

5. Критерии оценки

<u>Задание 1 Типа</u>	Домашние задания
------------------------------	------------------

Пример задания 1

Докажите, что семейство нейронных сетей произвольной глубины с шириной 2 и функцией активации ReLU имеет бесконечную размерность VC. Опишите множество размером N , разбитое на части этим семейством. Напишите программу, которая, учитывая назначение N исходов 0-1, находит веса сети таким образом, чтобы сеть выводила эти исходы в разбитом наборе.

Критерии оценки для задания 1

Правильное доказательство и рабочая программа.

<u>Задание 2 Типа</u>	Финальный проект
------------------------------	------------------

Пример задания 2

Изучите численно низколежащую часть поверхности потерь в глубокой сети, следуя недавним публикациям по этой теме. Выполните несколько запусков оптимизации со случайными начальными условиями и проанализируйте результирующее распределение значений потерь. Обсудите, как результаты

могут быть объяснены теоретически (например, с использованием модели springlass Хороманской и др. или некоторых других публикаций).

Основные критерии оценки:

Достоверный численный эксперимент и его обоснованный теоретический анализ.

<u>Задание 3 Типа</u>	Финальный экзамен
------------------------------	-------------------

Пример задания 3

- 1) Сформулируйте теорему об универсальной аппроксимации.
- 2) Для данной модели нейронной сети определите, сходится ли оптимизация градиентного спуска к глобальному оптимуму.

Критерии оценки для задания 3

Правильные и полные ответы и решения.

<u>Задание 4 Типа</u>	Участие в занятиях
------------------------------	--------------------

Пример задания 4

Вычислите VC-размерность данного семейства классификаторов.

Критерии оценки для задания 4

Правильные и полные ответы и решения.

6. Учебники и интернет-ресурсы

Рекомендуемые учебники	ISBN-13 (or ISBN-10)
M. Anthony, P. Bartlett, Neural Network Learning: Theoretical Foundations, Cambridge University Press, 1999	978-0521118620
Документы	DOI or URL
J.Berner, Ph.Grohs, G.Kutyniok, Ph.Petersen, The Modern Mathematics of Deep Learning, arXiv:2105.04026	https://arxiv.org/abs/2105.04026

Веб-ресурсы (ссылки)	Описание
https://neurips.cc/	Конференция NeurI
https://icml.cc/	Конференция ICML
https://iclr.cc/	Конференция ICLR
http://unsupervised.cs.princeton.edu/deeplearningtutorial.html	S. Arora, Toward theoretical understanding of deep learning // (an ICML tutorial giving an overview of the subject)
https://www.cs.princeton.edu/courses/archive/fall19/cos597B/lecnotes/book draft.pdf	Книга по теории глубокого обучения

https://www.deeplearningbook.org/	Стандартное введение в практическое глубокое обучение
https://random-matrixlearning.github.io/	Учебное пособие по применению теории случайных матриц к машинному обучению
https://github.com/google/neuraltangents	Нейронное касательное ядро: реализация и эксперименты
https://terrytao.files.wordpress.com/2011/02/matrix-book.pdf	Terence Tao, Topics in random matrix theory

7. Оборудование

Программное обеспечение
Большая (черная или белая) доска и маркеры для письма; проектор.