

M1399.000400 / M3309.005200 딥러닝의 통계적 이해

M1399.000500 / M3309.005200 Deep Learning: Statistical Perspective

2025년 2학기 (Fall)

| | | | |
|--------------|---|--------------|--|
| 교수 | 김지수, jkim82133@snu.ac.kr | 조교 | 김희천, heech97@snu.ac.kr 신준호, stinm36@snu.ac.kr |
| 수업시간 | 화, 목 17:00 - 18:15 | 수업장소 | 28동 103호 |
| 면담시간 (교수) | 수 09:00 - 11:30 또는 약속 | 면담장소 (교수) | 25동 335호 |
| 면담시간 (조교) | 약속 | 면담장소 (조교) | 김희천(25동 303호) 신준호(25동 336호) |
| 홈페이지 | https://jkim82133.github.io/M1399.000400/2025F/ | | |
| eTL | https://myetl.snu.ac.kr/courses/285278 | | |

수강신청 시 주의사항

- 2024년 딥러닝의 통계적 이해 수업이 인터넷에 공개돼 있으니 강의자료를 대강 확인하고 수업을 들을지 판단하시길 바랍니다.
<https://jkim82133.github.io/M1399.000400/2024F/>
- 본 교과목은 두 개의 분반이 통계학과와 인공지능 협동과정에 각각 열려서 크로스리스트돼 있습니다 (통계학과: M1399.000400, 인공지능 협동과정: M3309.005200). 두 수업 다 동일한 시간과 장소에 열리며 평가도 두 분반을 합쳐서 하나, 행정상의 차이가 있습니다. 통계학과 학생이 통계학과 과목으로 인정받으려면 반드시 M1399.000400 으로, 인공지능 협동과정 학생이 인공지능 협동과정 과목으로 인정받으려면 반드시 M3309.005200 으로 신청하여야 하며, 수강정정기간이 끝난 뒤에는 분반을 바꿀 수 없습니다. 통계학과 및 인공지능 협동과정 학생은 반드시 주의해서 수강신청하길 바라며, 해당 분반이 인원 초과로 신청이 안 될 경우에는 제게 (jkim82133@snu.ac.kr) 문의 바랍니다.

수업 소개

본 교과목은 심층학습(deep learning)을 통계학적 관점에서 분석하는 것을 목표로 하는 이론 중심 수업이다. 수업은 먼저 지도학습(supervised learning) 전반과 가법 모형(additive models) 등 기본적인 통계적 학습 개념을 복습하고, 심층신경망(deep neural network)의 기본 구조(다층 퍼셉트론, 역전파 등)를 다룬다. 그 위에서 통계적 학습 이론(statistical learning theory)의 핵심 도구인 집중부등식(concentration Measure)을 배우고, 이를 바탕으로 심층학습을 근사 이론(approximation theory) 측면과 일반화 오차(generalization error) 측면에서 통계적으로 분석한다. 이어 심층학습 최적화 과정의 통계적 특성을 재생 커널 힐베르트 공간(reproducing kernel hilbert space, RKHS) 기반의 뉴럴 탄젠트 커널(neural tangent kernel, NTK) 분석과 평균장(mean field) 분석을 통해 알아본다. 또한 생성모형(generative models)의 통계적 보장(예: GAN, diffusion model, LLM)을 소개하고, 정규화(regularization) 이론, 최적수송(optimal transport) 및 기하학적 해석(geometric view)과 같은 최신 연구 주제를 다룬다.

- 키워드: 심층학습(deep learning), 지도학습(supervised learning), 학습 이론(learning theory), 근사 이론(approximation theory), 일반화 오차(generalization error), 최적화(optimization), 뉴럴 탄젠트 커널(neural tangent kernel), 평균장(mean field), 생성 모형(generative models), 정규화(regularization), 최적수송(optimal transport)

수업 목표

- 심층학습(Deep Learning)을 접하고 이해한다.
- 심층학습에 어떤 통계적 도구가 쓰이는지 이해한다.
- 상황에 맞게 적절한 심층학습 모형을 선택할 수 있다.
- 심층학습 모형에 따라 적절한 통계적 분석을 할 수 있다.

선수과목

- 확률(probability)의 기본적 개념에 최소한 학부 수준으로는 익숙해야 하며, 학부에서는 확률의 개념 및 응용(326.211), 측도이론과 확률(M1407.002500), 실변수함수론(881.425), 대학원에서는 확률론 1(326.513), 실해석학(3341.503) 등과 같은 과목에서 다룬다.
- 수리통계(mathematical statistics)의 기본적 개념에 최소한 학부 수준으로는 익숙해야 하며, 수리통계 1(326.311), 수리통계(M1399.000900) 등과 같은 과목에서 다룬다.
- 선형사상, 기저, 차원 등 선형대수(linear algebra)의 기본 개념에 익숙해야 하며, 선형대수학 1(300.203A), 선형대수학(881.007) 등과 같은 과목에서 다룬다.

위의 필수과목들 외에 다음의 개념을 접해보면 좋으나 필수는 아니며, 수업에서 사용하는 개념들은 수업에서 정의한다.

- 회귀분석을 접해보면 좋으며, 회귀분석 및 실습(326.313) 등과 같은 과목에서 다룬다.
- 볼록 최적화(convex optimization)를 접해보면 좋으며, 최적화의 수학적 이론 및 계산(3341.454) 등과 같은 과목에서 다룬다.
- 기계학습(machine learning)의 이론적 분석을 접해보면 좋으며, 통계적 기계학습(M1399.000500) 등과 같은 과목에서 다룬다.

교재 및 참고문헌

정해진 교재의 내용을 처음부터 끝까지 따라가진 않지만, 다음 서베이 논문과 강의 자료를 주로 참조한다.

- Namjoon Suh, Guang Cheng, A Survey on Statistical Theory of Deep Learning: Approximation, Training Dynamics, and Generative Models, 2024.
<https://arxiv.org/abs/2401.07187/>
- Matus Telgarsky, Deep learning theory lecture notes, 2021.
<https://mjt.cs.illinois.edu/dlt/>

또한, 수업 전반적으로 다음 문헌들을 참조할 수 있다.

- Trevor Hastie, Robert Tibshirani, Jerome Friedman, The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference and Prediction, Second Edition, 2009.
<https://hastie.su.domains/ElemStatLearn/>
- Brian Ripley, Pattern Recognition and Neural Networks, 2006.
<https://www.cambridge.org/core/books/pattern-recognition-and-neural-networks/4E038249C9BAA06C8F4EE6F044D090C>
- Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, and Aaron Courville, Deep Learning, 2016.
<https://www.deeplearningbook.org/>
- Shai Shalev-Shwartz and Shai Ben-David, Understanding Machine Learning: From Theory to Algorithms, 2014.
<https://www.cs.huji.ac.il/~shais/UnderstandingMachineLearning/>
- Jianqing Fan, Cong Ma, Yiqiao Zhong, A Selective Overview of Deep Learning, 2021.
<https://doi.org/10.1214/20-ST5783>

- Tong Zhang, Learning Theory Book, 2023.
<https://tongzhang-ml.org/lt-book.html>
- Stephan Wojtowytsch, Mathematical Principles of Deep Learning (course), 2022.
<https://www.swojtowytsch.com/teaching/689-deep-learning>

그 외에 각 주제에 맞춰서 참조하는 많은 참고문헌들이 있다.

평가 방법

- 최종학점은 다음과 같이 계산한다: 과제 40%, 중간 20%, 기말 20%, 프로젝트 40%, 수업 참여 20%
- 과제 / 중간+기말 / 프로젝트 중에 둘을 선택해서 제출하고 평가받는다.

과제

- 과제는 4번 제출할 예정이며 과제는 과제 제출 마감 날짜 23:59까지 eTL로 제출하거나 서면으로 제출해야 한다.
- 과제를 기한 내로 완성하지 못했을 경우 10%의 점수를 감점하고 1주일의 시간을 더 쓸 수 있다. 1주일 후까지도 제출하지 못하면 0점 처리된다.

중간고사와 기말고사

중간고사와 기말고사 일정은 다음과 같다.

- 중간고사: 10/29(수)
- 기말고사: 12/17(수)

프로젝트

이 수업의 프로젝트에서는 수업과 관련 있으면서 관심 있는 주제를 골라, 심층학습과 관련된 최대 8쪽 분량의 보고서를 쓰는 것을 목표로 한다. 예로 다음과 같은 주제를 선택할 수 있지만, 꼭 여기에 한정되지는 않는다:

- 심층학습 모형을 이용한 실생활 자료의 분석
- 심층학습에서 일어나는 현상에 대한 수치 실험 또는 이론적 설명
- 심층학습 관련 이론적 결과들의 정리
- 심층학습 관련 논문 조사

기존 논문들을 다룰 경우, 논문 1개만 다뤄도 되고 논문의 일부만 다뤄도 된다. 반드시 새로운 연구를 수행할 필요는 없다.

보고서에는 배경지식, 중요한 이론적 결과들, 증명의 간단한 열개가 포함되어야 한다. 2단계에 걸쳐서 제안서와 최종 보고서를 제출한다.

- 제안서: 프로젝트 제안서에는 (1) 프로젝트 제목, (2) 프로젝트에서 다루는 문제의 정확한 명세, (3) 프로젝트가 다루는 범위, (4) 읽을 참고문헌 등이 포함되어야 한다.
- 최종 보고서: 최종 보고서는 NeurIPS 형식으로 작성해야 하며 최대 8쪽까지 허용한다. 예를 들어, 다음과 같은 구조로 작성할 수 있다.
- 실험 위주의 보고서일 경우:
 1. 서론: 문제의 동기와 해당 분야의 요약
 2. 기존 연구
 3. 방법론 및 중요 결과들
 4. 실험
 5. 결론: 결과에 대한 주석과 미해결 문제들
- 이론 위주의 보고서일 경우:

1. 서론: 문제의 동기와 해당 분야의 요약
2. 표기법과 가정
3. 중요 이론 결과들
4. 증명 열개
5. 결론: 결과에 대한 주석과 미해결 문제들

프로그래밍 언어

과제 중에 프로그래밍을 이용하는 문제가 나올 수 있다. 프로그래밍 언어는 수강생이 편한 언어를 고를 수 있으며, 수업 시간 중에 파이썬으로 예시를 들어줄 예정이다.

과제 협력에 관한 원칙

과제를 동료 학생과 같이 협력하는 것을 장려한다. 하지만 답안지는 반드시 본인 스스로 작성해야 한다. 도움을 받았을 때는 도움을 준 학생의 이름을 과제 제출 시 명시해야 한다. 그렇지 않으면 같은 답안을 제출한 과제는 모두 0점 처리한다.

일정표

아래의 일정표는 잠정적으로 작성한 것으로, 최신 일정표는 항상 홈페이지에서 확인한다.

| 날짜 | 주제 | 비고 |
|--------------------|--|---|
| 1주 (9/2, 9/4) | Introduction, Overview of Supervised Learning | |
| 2주 (9/9, 9/11) | Overview of Supervised Learning, Additive Models | |
| 3주 (9/16, 9/18) | Deep Learning Frameworks and Backpropagation | |
| 4주 (9/23, 9/25) | Deep Learning Frameworks and Backpropagation, Statistical Learning Theory: Concentration Measure | |
| 5주 (9/30, 10/2) | Statistical Learning Theory: Concentration Measure | 과제1 마감 (10/3) |
| 6주 | 추석연휴 | |
| 7주 (10/14, 10/16) | Statistical Learning Theory: Concentration Measure | |
| 8주 (10/21, 10/23) | Statistical Learning Theory: Concentration Measure | |
| 9주 (10/28, 10/30) | Approximation error for Deep Learning | 과제 2 마감 (10/27), 중간고사 (10/29) |
| 10주 (11/4, 11/6) | Approximation error for Deep Learning, Approximation for Deep Learning: Going Deep | |
| 11주 (11/11, 11/13) | Approximation for Deep Learning: Going Deep Generalization error for Deep Learning | 프로젝트 제안서 마감 (11/14) |
| 12주 (11/18, 11/20) | Reproducing Kernel Hilbert Space Optimization error for Deep Learning: Neural Tangent Kernel | |
| 13주 (11/25, 11/27) | Optimization error for Deep Learning: Mean Field | |
| 14주 (12/2, 12/4) | Statistical Guarantees of Generative Models: GAN, Diffusion Model, LLM | |
| 15주 (12/9, 12/11) | Deep Learning and Regularization: Lottery Ticket Hypothesis | 과제 4 마감 (12/10) |
| 16주 | Unsupervised Learning and Deep Learning, Deep Learning and Geometry, Optimal Transport, Other topics | 기말고사 (12/17), 프로젝트 최종 보고서 마감 (12/22) |

장애학생 지원사항

| 장애유형 | 강의수강 관련 | 과제 및 평가 관련 |
|-------|--------------------------------------|---|
| 시각장애 | 교재 제작(디지털교재, 점자교재, 확대교재 등), 대필도우미 허용 | 과제 제출기한 연장, 과제 제출 및 응답 방식의 조정, 평가 시간 연장, 평가 문항 제시 및 응답 방식의 조정, 별도 고사실 제공 |
| 지체장애 | 교재 제작(디지털교재), 대필도우미 및 수업보조 도우미 허용 | |
| 청각장애 | 대필 및 문자통역 도우미 활동 허용, 강의 녹취 허용 | |
| 건강장애 | 질병 등으로 인한 결석에 대한 출석 인정, 대필도우미 허용 | |
| 학습장애 | 대필도우미 허용 | |
| 지적장애 | 대필도우미 및 수업 멘토 허용 | 개별화 과제 제출 및 대체 평가 실시 |
| 자폐성장애 | | |