



МАШИННЕ НАВЧАННЯ У РОЙОВИХ СИСТЕМАХ БПЛА

Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	Другий (магістерський)
Галузь знань	F Інформаційні технології
Спеціальність	F3 «Комп'ютерні науки»
Освітня програма	«Системи і методи штучного інтелекту»
Статус дисципліни	Нормативна
Форма навчання	Очна (денна)
Рік підготовки, семестр	1 рік магістратури, осінній семестр
Обсяг дисципліни	120 годин / 4 кредити ЄКТС (лекції - 36 год., лабораторні роботи - 18 год., СРС - 66 год.)
Семестровий контроль / контрольні заходи	Залік / МКР
Розклад занять	http://rozklad.kpi.ua/
Мова викладання	Українська
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: PhD, Рязановський Кирило Денисович (k.riazanovskyi@kpi.ua) Практичні/Лабораторні: PhD, Рязановський Кирило Денисович (k.riazanovskyi@kpi.ua)
Розміщення курсу	Матеріали надаються викладачем

Програма навчальної дисципліни

1. Опис навчальної дисципліни, її мета, предмет вивчення та результати навчання

Силабус навчальної дисципліни складено відповідно до освітньої програми підготовки магістрів спеціальності F3 «Комп'ютерні науки».

Метою навчальної дисципліни є формування у студентів здатності описувати рій безпілотних апаратів формальною мовою, проєктувати та навчати політики керування методами навчання з підкріпленням і оцінювати їх у симуляційних середовищах. Курс веде студента від класичних законів керування одним апаратом до багатоагентних навчуваних політик, приділяючи окрему увагу тому, де навчання дає вигравш, а де надійніше працює класичний регулятор із гарантіями безпеки.

Компетентності, на формування яких спрямована дисципліна:

(ЗК 1) Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу під час дослідження складних автономних і багатоагентних систем.

(ФК 1) Здатність описувати динаміку мультикоптера й топологію зв'язку рою, застосовувати класичні закони керування та оцінювати стан апарата за зашумленими вимірами.

(ФК 2) Здатність формулювати задачу керування як задачу навчання з підкріпленням: визначати простір станів і дій, проєктувати функцію винагороди та обирати алгоритм під тип дій.

(ФК 3) Здатність застосовувати багатоагентне навчання до роїв: будувати спостереження, інваріантні до перестановки й розміру рою, використовувати централізоване навчання з децентралізованим виконанням і розв'язувати задачу розподілу заслуг.

(ФК 4) Здатність оцінювати навчені політики за придатними метриками, діагностувати типові патології навчання та аналізувати ризики перенесення політики із симуляції на апарат.

Програмні результати навчання:

- (ПРН 1) Застосовувати Python, PyTorch, gym-pybullet-drones та Stable-Baselines3 для моделювання мультикоптера й навчання політик керування.
- (ПРН 2) Реалізовувати класичні закони керування та порівнювати їх із навченими політиками за перехідними характеристиками, точністю утримання й витратами керування.
- (ПРН 3) Проектувати функції винагороди, проводити абляцію доданків і виявляти способи, якими політика експлуатує неточне формулювання задачі.
- (ПРН 4) Будувати багатоагентні політики для рою з кількох апаратів, вимірювати частоту зіткнень, відсоток покриття та деградацію при масштабуванні рою.

2. Пререквізити та постреквізити дисципліни

Для успішного засвоєння дисципліни студент повинен володіти базовими знаннями з дисциплін бакалаврського рівня: «Програмування (Python)», «Теорія ймовірностей та математична статистика», «Основи машинного навчання», «Алгоритми та структури даних». Бажаними є базові навички роботи з Linux, Git, Jupyter/IDE та віртуальними середовищами Python. Компетенції, одержані в процесі вивчення дисципліни, можуть бути використані у магістерських дисертаціях і науково-дослідних проєктах у сфері робототехніки, автономних систем та багатоагентного навчання.

3. Зміст навчальної дисципліни

Розділ 1. Рої БПЛА: опис, керування, основи навчання з підкріпленням

Тема 1.1. Вступ до роїв БПЛА. Означення ройової робототехніки, самоорганізація, робастність, масштабованість і гнучкість. Історія наряду й реальні проєкти. Межа між багатороботною системою і роєм.

Тема 1.2. Математичні основи роїв БПЛА. Системи координат і подання орієнтації (кути Ейлера, матриця повороту, кватерніон). Стійкість рівноваги та швидкість згасання, PID і стала похибка, запас тяги й запас керування після відмови гвинта. Оцінювання стану за зашумленими вимірами, фільтр Калмана. Граф рою: матриця Лапласа, алгебраїчна зв'язність, консенсус, жорсткість каркаса строю.

Тема 1.3. Керування роєм: строї та топології. Локальні правила руху: Voids, потенціальні поля, leader-follower. Класифікація формаційного керування за вимірюваною величиною (position, displacement, distance, bearing) і відповідні умови на граф. Вплив топології на швидкість збіжності, гранична затримка каналу, стійкість колонії, жорсткість каркаса та факторизовані метрики строю.

Тема 1.4. Навчання з підкріпленням: основи. Марковський процес прийняття рішень, віддача й дисконтування, рівняння Беллмана, Q-навчання, глибокі методи та методи політичного градієнта.

Тема 1.5. Багатоагентне навчання: моделі та виклики. Моделі багатоагентної взаємодії, концепції розв'язку, нестационарність, розподіл заслуг і масштабування на багато агентів.

Розділ 2. Глибоке навчання для роїв: від одного апарата до місії

Тема 2.1. Глибоке навчання з підкріпленням для БПЛА. Постановка задачі для одного апарата, простір спостережень і дій, рівні керування, складена функція винагороди, перенесення політики на реальний апарат.

Тема 2.2. Багатоагентний градієнт політики. Незалежне навчання та його межі. Багатоагентна теорема про градієнт політики. Централізовані критики стану й цінності дій, склад входу критика. Розподіл заслуг: різниці винагороди й контрфактична базова лінія. Вибір рівноваги в задачах рою.

Тема 2.4. Багатоагентне навчання для роїв БПЛА. Інваріантність до перестановки агентів і до розміру рою, агрегація спостережень сусідів, централізоване навчання з децентралізованим виконанням, декомпозиція цінності, спільні ваги.

Тема 2.5. Практика багатоагентного навчання. Подання історії спостережень агента. Однорідність рою та коректність спільних параметрів, обмін досвідом. Чесне подання результатів: криві навчання, число незалежних прогонів, бюджет пошуку гіперпараметрів. Діагностика типових збоїв навчання.

Тема 2.5. Конкретні задачі роїв. Покриття території, переслідування й уникнення, уникнення зіткнень, розподіл задач, кооперативне перенесення. Метрики оцінювання місії.

Тема 2.6. Безпека та робастність роїв БПЛА. Оцінювання справності апарата, сценарії відмов і безпечні реакції, робастність до збурень і атак, межі застосовності навчених політик.

Тема 2.7. Реалізація та інструменти. Симулятори й фреймворки навчання, відтворюваність експерименту, порівняння методів на однакових умовах, шлях від симуляції до заліза.

4. Навчальні матеріали та ресурси

Базова література:

1. Dorigo M., Theraulaz G., Trianni V. Swarm Robotics: Past, Present, and Future. Proceedings of the IEEE, 2021, 109(7), 1152–1165.
2. Quan Quan. Introduction to Multicopter Design and Control. Springer Nature Singapore, 2017.
3. Albrecht S. V., Christianos F., Schäfer L. Multi-Agent Reinforcement Learning: Foundations and Modern Approaches. MIT Press, 2024.
4. Azar A. T., Koubaa A., Mohamed N. A. et al. Drone Deep Reinforcement Learning: A Review. Electronics, 2021, 10(9), 999.
5. Fagundes-Junior L. A. et al. Machine Learning for Unmanned Aerial Vehicles Navigation: An Overview. SN Computer Science, 2024.

Допоміжна література:

6. Batra S., Huang Z., Petrenko A. et al. Decentralized Control of Quadrotor Swarms with End-to-end Deep Reinforcement Learning. Conference on Robot Learning (CoRL), 2021.
7. Hüttenrauch M., Šošić A., Neumann G. Deep Reinforcement Learning for Swarm Systems. Journal of Machine Learning Research, 2019, vol. 20.
8. Panerati J., Zheng H., Zhou S. et al. Learning to Fly: a Gym Environment with PyBullet Physics for Reinforcement Learning of Multi-agent Quadcopter Control. IEEE/RSJ IROS, 2021.
9. Vásárhelyi G. et al. Optimized flocking of autonomous drones in confined environments. Science Robotics, 2018, 3(20).
10. Preiss J. A., Hönig W., Sukhatme G. S., Ayanian N. CrazySwarm: A Large Nano-Quadcopter Swarm. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2017, pp. 3299–3304.
11. Документація gym-pybullet-drones, Stable-Baselines3 та Bitcraze Crazyflie.
12. Сайт курсу з лекціями, інтерактивними візуалізаціями та методичними вказівками до лабораторних робіт.

Навчальний контент

5. Методика опанування навчальної дисципліни

Лекційні заняття (36 годин / 18 пар)

№	Назва теми лекції та перелік основних питань
1	Тема 1.1. Вступ до роїв БПЛА. Означення ройової робототехніки, самоорганізація, емерджентна поведінка, відмінність рою від багатороботної системи.
2	Тема 1.1 (продовження). Властивості рою та реальні проекти. Робастність, масштабованість, гнучкість, історія напряду, задачі, які вирішує рій.
3	Тема 1.2. Математичні основи роїв БПЛА. Системи координат і подання орієнтації, стійкість рівноваги, ПІД і показники якості, запас тяги, оцінювання стану, граф рою та алгебраїчна зв'язність.
4	Тема 1.3. Керування роєм: строї та топології. Boids, потенціальні поля, класифікація формаційного керування, вплив топології на збіжність, гранична затримка каналу, жорсткість каркаса та метрики строю.
5	Тема 1.4. Основи навчання з підкріпленням. Марковський процес прийняття рішень, віддача й дисконтування, рівняння Беллмана, Q-навчання.
6	Тема 1.4 (продовження). Глибокі методи. Апроксимація функції цінності, DQN, методи політичного градієнта, PPO, вибір алгоритму під тип дій.

7	Тема 1.5. Моделі багатоагентної взаємодії. Матричні та стохастичні ігри, часткова спостережуваність, типи ігор за структурою винагород.
8	Тема 1.5 (продовження). Виклики багатоагентного навчання. Концепції розв'язку, нестационарність, розподіл заслуг, масштабування на багато агентів.
9	Тема 2.1. Глибоке навчання з підкріпленням для БПЛА. Вибір алгоритму, механіка РРО: обрізання, оцінка переваги, ентропійний бонус, гіперпараметри.
10	Тема 2.1 (продовження). Винагорода й перенесення на апарат. Складена функція винагороди, підбір ваг, рандомізація параметрів, обмеження симуляції.
11	Тема 2.2. Багатоагентний градієнт політики. Незалежне навчання, багатоагентна теорема про градієнт, централізовані критики, контрфактична базова лінія, вибір рівноваги.
12	Тема 2.3. Багатоагентне навчання для роїв БПЛА. Вибух розмірності, інваріантність до перестановки й розміру рою, агрегація сусідів.
13	Тема 2.3 (продовження). Централізоване навчання з децентралізованим виконанням. Декомпозиція цінності, спільні ваги, результати реальних польотів рою.
14	Тема 2.4. Практика багатоагентного навчання. Подання історії спостережень, однорідність рою й спільні параметри, обмін досвідом, чесне подання результатів, діагностика збоїв навчання.
15	Тема 2.5. Конкретні задачі роїв. Покриття території, переслідування й уникнення, уникнення зіткнень, кооперативне перенесення.
16	Тема 2.5 (продовження). Розподіл задач і метрики. Призначення цілей, метрики місії, типові режими відмов навчених політик.
17	Тема 2.6. Безпека та робастність роїв БПЛА. Оцінювання справності апарата, сценарії відмов і безпечні реакції, робастність до збурень, межі застосовності навчання.
18	Тема 2.7. Реалізація та інструменти. Симулятори й фреймворки, відтворюваність експерименту, чесне порівняння методів, шлях до реального апарата.

Лабораторні заняття (18 годин / 9 пар)

№	Назва теми заняття	Години
1	Лабораторна робота 1. Симулятор мультикоптера та ПІД-керування висінням.	3
2	Лабораторна робота 2. Перша політика навчання з підкріпленням для висіння.	4
3	Лабораторна робота 3. Проектування функції винагороди та політ до заданої точки.	4
4	Лабораторна робота 4. Рій із кількох апаратів: уникнення зіткнень.	4
5	Лабораторна робота 5. Покриття території роєм і метрики місії.	3

6. Самостійна робота студента

№ з/п	Вид самостійної роботи	Кількість годин СРС
1	Опрацювання лекційного матеріалу, читання літератури та документації	18

2	Реалізація симуляції та PID-регулятора, оформлення ноутбука до Лаб. №1	6
3	Написання середовища й навчання політики, ноутбук до Лаб. №2	8
4	Абляція функції винагороди та оформлення ноутбука до Лаб. №3	8
5	Реалізація багатоагентного середовища та ноутбук до Лаб. №4	8
6	Реалізація задачі покриття та ноутбук до Лаб. №5	6
7	Підготовка до Модульної контрольної роботи (МКР)	6
8	Підготовка до семестрового контролю (заліку)	6
	Всього:	66

7. Контрольні роботи

Метою проведення МКР є перевірка засвоєння теоретичного матеріалу та здатності застосовувати методи навчання з підкріпленням до автономних і багатоагентних систем. МКР проводиться у другій половині семестру і складається з теоретичного тесту та відкритого практичного завдання. Практичне завдання може включати проектування функції винагороди, вибір простору спостережень і дій для заданої задачі, схему багатоагентного навчання, аналіз причин невдалого навчання або план оцінювання безпеки системи.

Політика та контроль

8. Політика навчальної дисципліни

Правила відвідування занять: відповідно до нормативних документів Університету присутність або відсутність здобувача на аудиторному занятті не оцінюється балами. Водночас дисципліна містить складний прикладний матеріал, тому регулярна участь у лекціях і лабораторних суттєво підвищує ймовірність своєчасного виконання робіт.

Правила поведінки на заняттях: студент має можливість отримувати бали за відповідні види навчальної активності на лекційних і лабораторних заняттях, передбачені РСО дисципліни. Використання ноутбука або телефона для пошуку інформації на занятті здійснюється за вказівкою викладача.

Етикет цифрового зв'язку: при використанні цифрових засобів зв'язку з викладачем (електронна пошта, месенджери, форуми) слід дотримуватися загальноприйнятих етичних норм, зокрема бути ввічливим і обмежувати спілкування робочим часом викладача.

Політика щодо академічної доброчесності: Кодекс честі КПІ ім. Ігоря Сікорського (<https://kpi.ua/files/honorcode.pdf>) встановлює загальні моральні принципи та правила етичної поведінки осіб, які працюють і навчаються в університеті, і ними слід керуватися під час вивчення дисципліни та складання контрольних заходів. Використання відкритого коду, документації або фрагментів з відкритих джерел допускається лише з посиланням на джерело та за умови повного розуміння коду студентом. При виявленні плагіату, сліпого копіювання або неможливості пояснити реалізацію роботи анулюється.

Політика безпеки: лабораторні роботи виконуються у симуляційних або контрольованих навчальних середовищах. Курс не передбачає розробку або тестування небезпечних автономних сценаріїв у реальному просторі без затверджених процедур безпеки, нагляду відповідальних осіб та дотримання чинного законодавства. Усі алгоритми мають містити safety constraints, fallback logic або опис обмежень застосування.

Політика дедлайнів: кожна лабораторна робота має визначений термін здачі. Роботи, здані із запізненням без поважної причини, оцінюються зі зниженням максимального балу. Комунікація з викладачем здійснюється з дотриманням етичних норм та переважно у робочий час.

9. Види контролю та рейтингова система оцінювання (РСО)

Максимальний рейтинг студента складає 100 балів. Стартовий семестровий рейтинг становить 80 балів: 50 балів за лабораторні роботи та 30 балів за модульну контрольну роботу. Залікова контрольна робота оцінюється у 20 балів.

Календарний контроль: проводиться двічі на семестр як моніторинг поточного стану виконання вимог силабусу. Умовою позитивної атестації є значення поточного рейтингу не менше 50 % від максимально можливого на момент атестації.

Метод оцінювання	Кількість	Мінімальний бал (допуск)	Максимальний бал	Всього балів
Виконання та захист лабораторних робіт	5	5 за кожну	10 за кожну	50
Модульна контрольна робота (МКР)	1	0	30	30
Максимальний стартовий рейтинг				80
Залікова контрольна робота	1	0	20	20
Загальний підсумковий рейтинг				100

Критерії оцінювання лабораторних робіт:

9-10 балів: завдання виконано повністю, ноутбук виконується від початку до кінця без ручних правок, рішення має зрозумілу архітектуру, наведено таблиці вимірювань і аналіз помилок, студент вільно захищає роботу.

7-8 балів: завдання виконано, але є незначні технічні або методичні зауваження, неповний аналіз метрик чи невеликі порушення строків здачі.

5-6 балів: завдання виконано частково, ноутбук не проходить повний перезапуск, результати нестабільні або захист демонструє недостатнє розуміння використаних інструментів.

0 балів: програма не працює, роботу не захищено або виявлено критичний плагіат чи сліпе копіювання без розуміння.

МКР оцінюється у 30 балів: теоретична частина - до 15 балів; відкрите практичне завдання на проєктування системи та аналіз ризиків - до 15 балів.

Умови допуску до заліку: успішний захист усіх 5 лабораторних робіт та стартовий рейтинг не менше 36 балів.

Студенти, які набрали стартовий рейтинг 60 балів і більше та виконали умови допуску, можуть отримати залік автоматично. Для автоматичного заліку підсумкова оцінка визначається шляхом масштабування стартового рейтингу до 100-бальної шкали: $R = \text{round}(R_{\text{ст}} \times 100 / 80)$. Студенти, які бажають підвищити результат або мають стартовий рейтинг менше 60 балів, складають залікову контрольну роботу; у цьому випадку підсумковий рейтинг обчислюється як $R = R_{\text{ст}} + R_{\text{залік}}$, але не більше 100 балів.

Таблиця відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою:

Кількість балів	Оцінка
95 - 100	Відмінно
85 - 94	Дуже добре
75 - 84	Добре
65 - 74	Задовільно
60 - 64	Достатньо
Менше 60	Незадовільно
Менше 36 або не всі лабораторні роботи	Не допущено

10. Додаткова інформація з дисципліни

Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):

Складено: PhD, Рязановський Кирило Денисович

Ухвалено кафедрою штучного інтелекту (протокол № __ від __.__.202__)

Погоджено Методичною комісією факультету (протокол № __ від __.__.202__)