

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

доктора технічних наук, професора, професора кафедри комп'ютерної інженерії,
Західноукраїнський національний університет

Березького Олега Миколайовича,
на дисертаційну роботу Швандта Максима Альбертовича

на тему

**«МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ДЕТЕКТУВАННЯ, ТРЕКІНГУ ТА НАСКРІЗНОЇ
ІДЕНТИФІКАЦІЇ ЛАБОРАТОРНИХ ТВАРИН У ВІДЕОДАНИХ»,**

представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю
122 – Комп'ютерні науки, галузь знань 12 – Інформаційні технології

1 АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ ДИСЕРТАЦІЇ

Актуальність дисертаційної роботи Швандта М. А. визначається стрімким розвитком методів комп'ютерного зору та зростанням потреби в автоматизованому аналізі відеоданих у біологічних і медико-біологічних дослідженнях. Довготривале спостереження за лабораторними тваринами дає змогу реєструвати їхню рухову активність, взаємодії, реакції на зовнішні стимули та інші поведінкові показники. Водночас ручний аналіз таких відеозаписів залишається трудомістким, суб'єктивним і погано масштабується на тривалі експерименти та значні масиви відеоданих.

Сучасні методи детектування і трекінгу об'єктів забезпечують високу якість у відносно простих умовах, однак їх застосування до лабораторних відеозаписів ускладнюється нестаціонарним фоном, відблисками, тінями, артефактами, частковими та повними перекриттями, а також незначними візуальними відмінностями між окремими тваринами. Помилки локалізації, пропущені детектування та перемикання ідентифікаторів призводять до фрагментації траєкторій і зниження достовірності подальшого обчислення поведінкових показників. У цьому контексті розроблення моделей і методів, здатних забезпечувати не лише виявлення та супроводження об'єктів, а й стабільне збереження їхньої ідентичності протягом відеопослідовності, є актуальною науково-прикладною задачею.

Дисертаційне дослідження, у якому поєднано удосконалений метод

суперпіксельної сегментації SLIC, модифіковану нейромережеву модель Mask R-CNN із подвійною магістраллю екстракції ознак, механізми формування та асоціації треклетів, демонструє актуальність як з позиції розвитку методів комп'ютерного зору, так і в прикладному аспекті. Особливої практичної значущості набуває розроблений автором інтегрований конвеєр детектування, трекінгу та наскрізної ідентифікації, покладений в основу спеціалізованого застосунку для автоматизованої обробки лабораторних відеозаписів. Отже, робота відповідає сучасному рівню розвитку інформаційних технологій у задачах аналізу відеоданих і має вагомий потенціал для застосування у дослідженнях поведінки лабораторних тварин.

2 ЗВ'ЯЗОК РОБОТИ З НАУКОВИМИ ПРОГРАМАМИ, ПЛАНАМИ, ТЕМАМИ

Дисертацію виконано відповідно до тематичних планів науково-дослідних робіт Національного університету «Одеська політехніка» за період 2024–2026 рр. у межах держбюджетної теми № 264-73 «Методи та технології моделювання і забезпечення якості складних програмних систем у динамічних середовищах» (номер державної реєстрації 0125U003655).

3 ОЦІНКА ОБҐРУНТОВАНOSTІ НАУКОВИХ ПОЛОЖЕНЬ, ВИСНОВКІВ І РЕКОМЕНДАЦІЙ

Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані в дисертаційній роботі Швандта М. А., мають високий ступінь обґрунтованості, що підтверджується як логічною послідовністю викладу, так і наявністю повноцінного циклу дослідження: від аналізу існуючих методів і формулювання мети – до розроблення, програмної реалізації та експериментальної перевірки отриманих результатів. Автором послідовно обґрунтовано удосконалення методу SLIC, моделі Mask R-CNN, концептуальної моделі Mask-TAUDL та інтегрованого конвеєра обробки відеоданих.

Кожне з положень, що виносяться на захист, має відповідну доказову базу: формалізований опис, програмну реалізацію, графічні ілюстрації, експериментальні

результати та порівняння з базовими методами. Зокрема, удосконалений метод SLIC забезпечив підвищення якості детектування і локалізації більш ніж на 6%, а модифікована Mask R-CNN продемонструвала mAP50 до 0,90, Precision і Recall до 0,92 за прийнятного часу обробки, що підтверджує обґрунтованість запропонованих рішень.

Обґрунтованість висновків також підкріплюється експериментами на синтетичній контрольованій сцені та реальних відеозаписах із мишами й рибами-бичками. Оцінювання за показниками збереження ідентичності, часової узгодженості та безперервності траєкторій підтвердило працездатність інтегрованого конвеєра. Наявність спеціалізованого програмного застосунку робить дослідження відтворюваним і придатним до практичного використання в лабораторному відеомоніторингу.

4 ДОСТОВІРНІСТЬ НАУКОВИХ ПОЛОЖЕНЬ, РЕКОМЕНДАЦІЙ ТА ВИСНОВКІВ

Достовірність результатів дослідження підтверджується комплексною експериментальною перевіркою розроблених методів і моделей на синтетичних даних та реальних лабораторних відеозаписах із мишами й рибами-бичками. Усі етапи – від детектування та сегментації до трекінгу й наскрізної ідентифікації – супроводжуються кількісним оцінюванням, порівнянням із базовими підходами, візуалізацією результатів і використанням метрик якості. Узгодженість одержаних показників, а також програмна реалізація інтегрованого конвеєра забезпечують відтворюваність дослідження та підтверджують обґрунтованість сформульованих висновків.

5 НАУКОВА НОВИЗНА РЕЗУЛЬТАТІВ, ВИКЛАДЕНИХ У ДИСЕРТАЦІЇ

Основні наукові результати дисертації такі:

1. Удосконалено метод суперпиксельної сегментації SLIC за рахунок використання багатопланового простору ознак, який базується на LAB-моделі зображення, враховує різнищеве зображення та результати перевірки однорідності

пікселів у локальному оточенні, що дозволило підвищити якість локалізації лабораторних тварин у відеоданих за умов нестаціонарного фону та наявності артефактів.

2. Удосконалено метод детектування лабораторних тварин у відеоданих шляхом використання методу суперпіксельної сегментації SLIC і контекстної фільтрації, що дозволило підвищити якість детектування лабораторних тварин за умов нестаціонарного фону.

3. Удосконалено нейромережеву модель Mask R-CNN за рахунок введення подвійної магістралі екстракції ознак із керованим SE-злиттям ($B \rightarrow A$), що дозволило підвищити якість детектування та сегментації лабораторних тварин у відеоданих за умов часткових перекриттів, злиття та подальшого розділення об'єктів зі збереженням прийнятної оперативності.

4. Вперше запропоновано концептуальну модель наскрізної ідентифікації лабораторних тварин у відеоданих без використання ручного маркування Mask-TAUDL, яка інтегрує механізм отримання ознак на основі удосконаленої нейромережевої моделі Mask R-CNN із подвійною магістраллю екстракції ознак, масково-зважені ROI-ознаки та механізми асоціації треклетів без використання ручного маркування TAUDL, що забезпечує формування нормалізованих векторів вбудовувань і стабільне збереження ідентичності лабораторних тварин протягом відеопослідовності.

6 ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ ОДЕРЖАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Результати дисертаційної роботи мають як наукову новизну, так і практичну значимість. З наукової точки зору, удосконалено методи детектування, локалізації та сегментації лабораторних тварин у відеоданих за умов нестаціонарного фону, артефактів і перекриттів, а також розвинено нейромережеві засоби формування ознак та збереження ідентичності об'єктів. Запропонована концептуальна модель Mask-TAUDL і побудований на її основі інтегрований конвеєр поглиблюють методологічні засади наскрізної ідентифікації об'єктів у довготривалих відеопослідовностях без використання ручних ID-міток. Практична цінність полягає у створенні спеціалізованого застосунку для автоматизованої обробки лабораторних

відеозаписів, формування траєкторій та подальшого обчислення кількісних показників поведінки тварин.

Крім того, розроблений застосунок використовується у лабораторних дослідженнях, що проводяться на базі біологічного факультету Одеського національного університету імені І. І. Мечникова. Результати роботи також упроваджено у науково-дослідницьку діяльність та навчальний процес Національного університету «Одеська політехніка», а також у навчальний процес Одеського національного університету імені І. І. Мечникова.

7 ПОВНОТА ВИКЛАДУ РЕЗУЛЬТАТІВ У ПУБЛІКАЦІЯХ ТА ДОТРИМАННЯ АКАДЕМІЧНОЇ ДОБРОЧЕСНОСТІ

За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 12 наукових праць, серед яких 6 статей у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань МОН України, 3 з яких індексуються у міжнародній наукометричній базі Scopus, та 6 матеріалів конференцій.

Участь здобувача у працях, опублікованих у співавторстві, а також його особистий внесок в одержання представлених наукових результатів належним чином зазначено в дисертаційній роботі.

Опубліковані праці повною мірою відображають основні наукові положення та результати дисертації, а їх кількість, зміст і рівень видань відповідають вимогам пункту 8 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. № 44.

8 АНАЛІЗ ФОРМИ ТА ЗМІСТУ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

У дисертаційній роботі Швандта М. А. розв'язано актуальну науково-прикладну задачу підвищення якості детектування, трекінгу та наскрізної ідентифікації лабораторних тварин у відеоданих. Дослідження охоплює вдосконалення методів сегментації, нейромережевого детектування, повторної

ідентифікації та їх інтеграцію у спеціалізований конвеєр обробки лабораторних відеозаписів.

У першому розділі проаналізовано класичні та нейромережеві методи детектування, трекінгу і збереження ідентичності об'єктів у контрольованих сценах. Визначено їхні переваги й обмеження за умов нестаціонарного фону, артефактів та перекриттів, обґрунтовано вибір базових підходів і сформульовано завдання дослідження.

У другому розділі розроблено методи детектування й локалізації лабораторних тварин на основі суперпіксельної сегментації SLIC. Запропоновано багатопаровий простір ознак і контекстну фільтрацію сегментів. Експериментально підтверджено підвищення якості детектування та локалізації більш ніж на 6 % порівняно з базовим методом.

Третій розділ присвячено вдосконаленню нейромережевої моделі Mask R-CNN. Розроблено подвійний екстрактор ResNet18 для базових і додаткових каналів із керованим SE-злиттям ознак. Результати навчання й тестування підтвердили високу якість детектування та сегментації лабораторних тварин за прийнятною оперативності.

У четвертому розділі запропоновано концептуальну модель Mask-TAUDL для наскрізної ідентифікації без ручного маркування. Модель поєднує формування треклетів, масково-зважені ROI-ознаки, нормалізовані вбудовування та асоціацію за принципами TAUDL, що підвищує стійкість ідентифікації за перекриттів і фрагментації траєкторій.

У п'ятому розділі розроблено й експериментально перевірено інтегрований конвеєр, що поєднує попередню обробку, дві гілки детектування, арбітраж, сегментацію, трекінг, формування та асоціацію треклетів. Тестування на синтетичній сцені й реальних відеозаписах із мишами та бичками підтвердило його працездатність і практичну придатність.

9 ЗАУВАЖЕННЯ ДО ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Зауваження до дисертації такі:

1. Експериментальну перевірку запропонованих методів і моделей проведено

на трьох тестових відеопослідовностях: синтетичній, з мишами та з рибами-бичками. У роботі недостатньо досліджено узагальнювальну здатність розробленого конвеєра для інших видів тварин, камер, умов освітлення та геометрії лабораторних сцен.

2. Оцінювання наскрізної ідентифікації у п'ятому розділі переважно виконано за проксі-метриками у зв'язку з відсутністю повної покадрової розмітки з еталонними ідентифікаторами. Доцільно було б сформувати обмежений еталонний набір даних і провести на ньому порівняння з існуючими методами багатооб'єктного трекінгу та повторної ідентифікації.

3. В удосконаленому SLIC, механізмі арбітражу детектувань і процедурі зшивання треклетів використано низку порогових та геометричних параметрів, однак недостатньо досліджено чутливість результатів до їх вибору.

4. У роботі недостатньо чітко визначено, на яких етапах запропонованого конвеєра концептуальна модель Mask-TAUDL не потребує ручного присвоєння ID-міток, а на яких використовується піксельна розмітка для навчання детектора та сегментатора.

5. У роботі зазначено можливість застосування концептуальної моделі наскрізної ідентифікації Mask-TAUDL у багатокамерних системах спостереження, однак її експериментальну перевірку на синхронізованих відеозаписах, отриманих із різних ракурсів, не проведено.

6. Опис спеціалізованого програмного застосунку доцільно було б доповнити вимогами до програмно-апаратного середовища, описом форматів вхідних і вихідних даних та порядком повторного навчання моделей на нових відеозаписах.

7. У тексті дисертації трапляються окремі орфографічні й граматичні помилки, а також стилістичні та термінологічні неточності, на які вказано здобувачеві.

Зазначені зауваження мають переважно уточнювальний і рекомендаційний характер та визначають можливі напрями подальшого розвитку дослідження. Вони не зменшують наукової та практичної цінності дисертаційної роботи, яка в цілому виконана на високому рівні.

10 ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА ОЦІНКА ДИСЕРТАЦІЇ

Дисертаційна робота Швандта Максима Альбертовича «Моделі та методи детектування, трекінгу та наскрізної ідентифікації лабораторних тварин у відеоданих» за своїм змістом відповідає спеціальності 122 – Комп'ютерні науки. Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, яка розв'язує важливу науково-практичну задачу, що полягає у підвищенні точності й стійкості детектування, трекінгу та наскрізної ідентифікації лабораторних тварин у відеоданих за умов нестаціонарного фону, оклюзій, злиття та розділення об'єктів, обмежених ресурсів і локальної обробки тривалих відеоспостережень.

Робота відповідає вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії, а саме вимогам пунктів 6, 7, 8 і 9 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого Постановою КМУ від 12.01.2022 р. №44, а здобувач Швандт Максим Альбертович заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 – Комп'ютерні науки.

Офіційний опонент,
доктор технічних наук, професор
професор кафедри комп'ютерної інженерії
Західноукраїнського
національного університету

Олег БЕРЕЗЬКИЙ