

ВІДГУК

офіційного опонента – доктора технічних наук, професора,
професора кафедри комп'ютерних наук
Хмельницького національного університету

Манзюка Едуарда Андрійовича

на дисертаційну роботу **Steця Сергія Юрійовича**

на тему **«Підвищення точності та швидкодії детектування зображень**

автомобілів засобами згорткової нейронної мережі YOLO»,

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії

за спеціальністю 121 – «Інженерія програмного забезпечення»

галузі знань 12 – «Інформаційні технології»

Актуальність теми дисертаційного дослідження.

Розвиток інтелектуальних транспортних систем, систем автоматичного відеоконтролю та технологій безпілотного транспорту висуває підвищені вимоги до методів комп'ютерного зору, орієнтованих на роботу в режимі реального часу. Детектування зображень автомобілів є важливим завданням для широкого кола прикладних задач: контролю та забезпечення безпеки дорожнього руху, управління паркінгами, виявлення та передбачення заторів, реалізація засобів автономного водіння. На даний час спостерігається значний прогрес у розвитку архітектур штучних нейронних мереж, призначених для детектування зображень, сімейства, моделей YOLO (You Only Look Once). Водночас досягнення оптимального компромісу між точністю та обчислювальною ефективністю для систем детектування зображень автомобілів залишається актуальною науково-технічною проблемою.

Складність застосування згорткових нейронних мереж (ЗНМ) полягає в тому, що ЗНМ малого розміру нерідко забезпечують низьку точність детектування об'єктів на зображеннях, особливо у складних умовах: при перекриттях об'єктів, різноманітних ракурсах зйомки та нестабільному освітленні. ЗНМ великого розміру забезпечують вищу якість детектування, але їх ресурсоемність обмежує використання на малопотужних апаратних платформах для вбудованих систем. Суттєвою проблемою залишається й формування спеціалізованих навчальних датасетів зображень: ручне

анотування вимагає значних витрат часу та є важко масштабованим. Підвищити точність ЗНМ малого розміру можливо через спрямоване донавчання, попередню обробку зображень та автоматизоване формування навчальних вибірок.

З огляду на викладене, науково-прикладна задача підвищення точності та швидкодії детектування зображень автомобілів засобами ЗНМ YOLO за допомогою попередньої обробки зображень, автоматизованого створення спеціалізованих датасетів та донавчання ЗНМ є актуальною та практично значущою. Тема дисертаційної роботи Стеця С.Ю. цілком відповідає сучасним викликам у галузі інформаційних технологій та комп'ютерного зору.

Аналіз змісту дисертації та основні результати роботи.

Дисертаційна робота включає перелік умовних позначень, вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел (184 найменування) та вісім додатків. Загальний обсяг роботи становить 230 сторінок, з яких 148 сторінок займає основний текст. Робота містить 59 рисунків та 3 таблиці.

У вступі сформульовано мету та завдання дослідження, обґрунтовано актуальність теми, визначено об'єкт і предмет дослідження, охарактеризовано методи, наукову новизну, теоретичне та практичне значення отриманих результатів, наведено відомості про їх апробацію.

Перший розділ містить ґрунтовний огляд існуючих підходів до розпізнавання та детектування транспортних засобів на зображеннях. Прослідковано еволюцію від класичних методів детектування зображень (HOG+SVM, метод Віоли–Джонса, SIFT, SURF) до сучасних глибоких нейронних мереж. Описано принципи побудови сучасних архітектур ЗНМ: залишкових мереж ResNet, архітектур MobileNet, детекторів об'єктів з блоком Inception, двоступеневого детектора Faster R-CNN, а також одноступеневих детекторів YOLO і SSD. Як програмні засоби-аналоги розглянуто хмарні платформи Google Cloud Vision, Amazon Rekognition та бібліотеку OpenCV. За результатами аналізу обґрунтовано вибір архітектури нейромережі YOLO як найбільш збалансованої за критеріями точності та обчислювальної ефективності.

Другий розділ присвячено розробці та програмній реалізації методики попередньої обробки вхідних зображень для підвищення точності детектування засобами YOLOv8. Детально описано архітектуру YOLOv8 та принципи попередньої обробки зображень, яка полягала у підвищенні їх контрасту. Запропоновано три підходи до підвищення контрастності зображень: глобальне вирівнювання гістограми, адаптивна еквалізація CLAHE та комбінований метод вирівнювання й центрування гістограми. Оцінювання якості детектування виконано за поширеними метриками Precision, Recall, F1-score та mAP. З'ясовано, що запропонований метод вирівнювання і центрування гістограм зображень забезпечує найвищу точність детектування, зокрема, за критерієм IoU отримано покращення на 16 %. Результати детектування зображень дослідженого засобами регресійного та кореляційного аналізу.

У третьому розділі розроблено методику донавчання різних версій ЗНМ YOLO на основі спеціалізованого датасету, розробленого у ручному режимі у середовищі Roboflow. Описано процес анотування зображень автомобілів, балансування класів об'єктів і аугментацію зображень шляхом зсувів, поворотів та інших перетворень зображень. У результаті аугментації розмір набору даних збільшено більш ніж у 2 рази. Проведено донавчання моделей ЗНМ на базі ваг, отриманих при навчанні на датасеті COCO. Встановлено, що донавчання дозволяє підвищити значення метрики Recall з 0,58 до 0,91, а mAP50-95 – з 0,37 до 0,72. Здійснено порівняльний аналіз ефективності версій YOLOv8m та YOLOv11m. Отримано, що при порівнянні точності (mAP50 \approx 0,96) модель YOLOv11m має на 22 % менший розмір вагових коефіцієнтів. Також програмно реалізовано трекінг зображень транспортних засобів засобами ЗНМ YOLO.

Четвертий розділ присвячено методиці автоматизованого формування датасету зображень автомобілів за допомогою ЗНМ YOLO великого розміру. Методика базується на глобальній і локальній селекції унікальних кадрів відеопотоку з використанням перцептивного хешування (pHash), що забезпечує скорочення надлишковості даних на 88 % (з 993 до 121 кадра у тестовому досліді). Для ідентифікації схожих об'єктів на зображеннях

застосовано угорський алгоритм з урахуванням метрик IoU та кореня середньої квадратичної помилки між дескрипторами. Запропоновано методику донавчання в рамках архітектури «Вчитель-Учень», де модель малого розміру (YOLOv8n) навчається на датасеті, який автоматично анотується мережею середнього розміру (YOLOv8m). Експериментально підтверджено зростання метрики mAP50 моделі «Учень» з 0,6864 до 0,9292. Розроблену систему реалізовано мовою Python і розгорнуто на платформі Raspberry Pi 5 з Docker-контейнеризацією. Передбачено веб-інтерфейс для керування і моніторингу системи. Розділ також містить відомості про заходи забезпечення кібербезпеки для системи, що розроблялася.

У висновках підтверджено наукову новизну та практичну значимість отриманих результатів. **Додатки** містять список публікацій здобувача, матеріали апробації, акти та довідки про впровадження, а також фрагменти розробленого програмного коду.

Наукова новизна, оцінка обґрунтованості наукових положень дисертаційного дослідження та їх достовірності.

Дисертаційна робота містить низку нових наукових результатів, отриманих на основі оригінальних авторських методик та аналізу реальних експериментальних даних. Зокрема, вперше запропоновано методику донавчання ЗНМ YOLO малого розміру із застосуванням підходу «Вчитель-Учень», де спеціалізований датасет автоматично формується мережею більшого розміру. Це дозволяє підвищити точність детектування до 24 % за метрикою mAP50, зберігаючи швидкодію компактної моделі. Вперше запропоновано метод попередньої обробки зображень для ЗНМ YOLO на основі поєднання еквалізації та центрування гістограм, що забезпечує підвищення точності на 16 % за метрикою IoU. Набула подальшого розвитку методика порівняльного аналізу результатів донавчання різних версій ЗНМ YOLO, а також методика автоматизованого формування датасетів із механізмом відсіювання дублікатів на основі перцептивного хешування.

Дисертація Стеця С.Ю. відзначається чіткою і послідовною структурою; робота являє собою цілісне і завершене наукове дослідження. Достовірність одержаних результатів забезпечено застосуванням

загальноприйнятих метрик оцінювання детектування (Precision, Recall, F1-score, mAP50, mAP50-95, IoU), коректним розбиттям даних на навчальні, валідаційні та тестові вибірки, а також порівнянням з результатами базових моделей і відомими експериментальними даними.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами.

Дисертаційну роботу виконано в рамках наукової діяльності Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича відповідно до плану науково-дослідних робіт кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем за держбюджетною темою «Дослідження, моделювання та розробка програмного забезпечення складних динамічних систем» (номер державної реєстрації 0121U109232). Тематика дослідження Стеця Сергія Юрійовича органічно вписується в коло наукових інтересів зазначеної кафедри та відповідає її стратегічним напрямам.

Теоретичне та практичне значення результатів.

Незважаючи на переважно прикладний характер, дисертаційна робота містить вагомі теоретичні узагальнення. Основні науково-теоретичні результати впроваджено в освітній процес Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича в межах дисциплін «Методи цифрової обробки зображень», «Комп'ютерні системи штучного інтелекту» та «Системи комп'ютерного зору», а практичні – у виробничу діяльність підприємств ТОВ «ДВА ВІДРА» та ТОВ «ТРК А.С.С.», що підтверджується актами впровадження. Розроблені програмні засоби мають широкий потенціал для застосування в системах моніторингу дорожнього трафіку, контролю паркомісць, детектування автомобілів на аерофотознімках, дорожньої безпеки та автономного керування транспортом. Принципово важливою перевагою є здатність системи функціонувати на обмежених апаратних ресурсах (Raspberry Pi 5), що робить її економічно доступною для широкого впровадження.

Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях.

Основні наукові результати дисертаційної роботи відображено у 10 наукових публікаціях, серед яких 3 статті у фахових виданнях України, 1 праця, що індексується у наукометричній базі Scopus та додатково

розкриває наукові результати дисертації, а також 6 тез доповідей у збірниках матеріалів міжнародних науково-практичних конференцій. Публікації охоплюють як теоретичні аспекти та розроблені методики, так і особливості їх програмної реалізації. Публікаційна активність здобувача відповідає встановленим вимогам до захисту дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертаційного дослідження.

1. У третьому розділі виконано аугментацію зображень шляхом застосування геометричних та фотометричних перетворень, зокрема, повороту (у діапазоні від -10° до $+10^\circ$) та зміни яскравості (в межах від -15% до $+15\%$). Проте, не обґрунтовано вибір таких діапазонів для параметрів під час аугментації. Не досліджено вплив параметрів аугментації на похибки навчання нейронної мережі.

2. Хоча методика попередньої обробки зображень підтвердила свою ефективність на обраному наборі даних, у роботі не проведено систематичного дослідження її поведінки за різних умов освітлення – нічних сцен, яскравого контрасту, туманних та дощових умов. Таке дослідження є важливим для підтвердження надійності методики в умовах реальної експлуатації. Бажано було б надати кількісні дані щодо ефективності методики в різних категоріях складних сцен.

3. При візуалізації детектованих об'єктів (зокрема, автомобілів на рис. 4.12), рамки об'єктів є візуально недостатньо помітними, що ускладнює подальший аналіз таких зображень для користувача. Крім цього, над рамками було б доречно виводити додаткову інформацію (назву класу, номер об'єкта та ін.).

Зазначені зауваження мають рекомендаційний характер і не знижують загальну позитивну оцінку роботи та її наукової і практичної цінності.

Загальний висновок.

Підсумовуючи аналіз дисертаційної роботи, слід констатувати, що за актуальністю тематики, обсягом та якістю виконаних досліджень, науковою значущістю і практичною цінністю отриманих результатів дисертаційна

робота Стеця Сергія Юрійовича на тему «Підвищення точності та швидкодії детектування зображень автомобілів засобами згорткової нейронної мережі YOLO» є самостійним і завершеним науковим дослідженням, яке робить помітний внесок у розвиток методів детектування об'єктів на основі ЗНМ YOLO шляхом попередньої обробки зображень, автоматизованого формування навчальних датасетів та застосування підходу «Вчитель-Учень» для донавчання нейронних мереж малого розміру.

Дисертація є завершеною науковою працею, яка повністю відповідає вимогам пунктів 6, 7, 8, 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 Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. №44 (зі змінами, внесеними згідно з Постановами Кабінету Міністрів України № 341 від 21.03.2022, № 502 від 19.05.2023, № 507 від 03.05.2024), а її автор Стець Сергій Юрійович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 121 – «Інженерія програмного забезпечення» у галузі знань 12 – «Інформаційні технології».

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри комп'ютерних наук
Хмельницького національного
університету

Едуард МАНЗЮК

