

РЕЦЕНЗІЯ

доктора технічних наук, професора,
завідувача кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки
Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича

Саміли Андрія Петровича

на дисертаційну роботу аспіранта **Стеця Сергія Юрійовича**
«Підвищення точності та швидкодії детектування зображень автомобілів
засобами згорткової нейронної мережі YOLO»,
подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії
з галузі знань 12 – «Інформаційні технології»
за спеціальністю 121 – «Інженерія програмного забезпечення»

Актуальність дисертаційного дослідження

Інтенсивний розвиток систем автоматизованого відеоаналізу, безпілотного транспорту та інтелектуальних транспортних інфраструктур зумовлює зростаючий попит на ефективні та ресурсощадні алгоритми комп'ютерного зору. Серед задач розпізнавання дорожньої обстановки особливе місце посідає детектування автомобілів як ключовий елемент систем моніторингу дорожнього трафіку, управління паркомісцями, дистанційного спостереження засобами БПЛА та технологій активної безпеки. Незважаючи на суттєвий прогрес у галузі глибокого навчання, зокрема, у розвитку сімейства детекторів YOLO (You Only Look Once), практичні системи стикаються з протиріччям між точністю та обчислювальною ефективністю. Малорозмірні моделі характеризуються недостатньою точністю за складних умов зйомки, тоді як масштабні нейронні мережі потребують апаратних ресурсів, несумісних із вимогами вбудованих і мобільних платформ. Водночас ручне анотування спеціалізованих навчальних вибірок залишається вкрай ресурсомістким процесом.

З огляду на зазначене, вирішення задачі підвищення точності та швидкодії детектування зображень автомобілів засобами згорткових нейронних мереж (ЗНМ) YOLO через удосконалення попередньої обробки зображень, оптимізацію процедури донавчання та автоматизацію формування навчальних датасетів є науково обґрунтованим і практично затребуваним напрямом досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційну роботу Стеця С.Ю. виконано на кафедрі програмного забезпечення комп'ютерних систем Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича в рамках держбюджетної теми «Дослідження, моделювання та розробка програмного забезпечення складних динамічних систем» (Державний реєстраційний номер 0121U109232). Напрямок дослідження відповідає профілю кафедри та органічно вписується у стратегічні пріоритети науково-дослідної діяльності університету.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків, рекомендацій, сформульованих у дисертації

Наукові положення та результати дисертаційного дослідження Стеця С.Ю. обґрунтовано із залученням сучасного апарату машинного навчання та цифрової обробки сигналів: методів глибокого навчання для ЗНМ архітектури YOLO, алгоритмів підвищення контрасту зображень, перцептивного хешування для дедублікації даних, регресійного та кореляційного аналізу, а також угорського алгоритму в задачах комбінаторного зіставлення. Вірогідність отриманих результатів підкріплена коректним розбиттям даних на навчальну, контрольну та тестову вибірки, застосуванням стандартизованих метрик оцінювання точності детектування (Precision, Recall, F1-score, mAP, IoU) та зіставленням результатів із показниками аналогічних систем і відомими теоретичними даними. Здобувач виявляє впевнене володіння сучасним методологічним інструментарієм та демонструє вміння коректно інтерпретувати й аргументовано подавати одержані результати. Дисертація виконана як самостійне і цілісне наукове дослідження.

Матеріали дисертаційного дослідження висвітлено у 10 наукових публікаціях: 3 статті у фахових виданнях України, 6 тез доповідей у матеріалах міжнародних конференцій, а також 1 наукова праця, що індексується у базі Scopus.

Структура дисертації

Дисертаційна робота містить вступ, чотири розділи, загальні висновки, список використаних джерел (184 позиції), вісім додатків та перелік публікацій здобувача (10 наукових праць). Обсяг основного тексту становить 148 сторінок, загальний обсяг – 230 сторінок. Ілюстративний матеріал представлено 59 рисунками та 3 таблицями. Основні результати роботи у повній мірі відображено в публікаціях автора.

У вступі визначено актуальність, мету, завдання та методи дослідження, сформульовано наукову новизну й практичне значення результатів, охарактеризовано особистий внесок здобувача та наведено відомості про публікації й апробацію роботи.

Перший розділ містить систематизований огляд сучасних методів та засобів детектування транспортних засобів на зображеннях. Розглянуто архітектурні принципи ЗНМ ResNet, MobileNet, EfficientNet, Inception, двостадійних (Faster R-CNN) та одностадійних (YOLO, SSD) детекторів. Обґрунтовано вибір архітектури YOLO. Проаналізовано хмарні платформи та програмні інструменти комп'ютерного зору.

У другому розділі розроблено методику попередньої обробки вхідних зображень для ЗНМ версії YOLOv8. Досліджено три підходи до підвищення контрасту: глобальне вирівнювання гістограми, CLAHE та комбіноване вирівнювання гістограми з центруванням. Встановлено перевагу останнього підходу; проведено регресійний та кореляційний аналіз залежностей між метриками детектування.

Третій розділ присвячено методиці донавчання моделей ЗНМ YOLO на датасеті, анотованому в ручному режимі. Висвітлено збирання, анотування та аугментацію набору даних (з 1542 до 3578 зображень), проведено порівняльний аналіз ЗНМ різних версій (YOLOv8m і YOLOv11m), розглянуто реалізацію трекінгу об'єктів на зображеннях.

Четвертий розділ присвячено автоматизованому формуванню датасету з використанням перцептивного хешування (pHash) та угорського

алгоритму. Описано підхід «Вчитель-Учень» для донавчання компактної моделі YOLO, для якої в якості апаратної платформи використано мікрокомп'ютер Raspberry Pi5. Програму для детектування зображень автомобілів реалізовано з Docker-контейнеризацією та веб-інтерфейсом, а також передбачено заходи кібербезпеки.

Висновки резюмують ключові результати дослідження. **Додатки** включають публікації, матеріали апробації, акти про впровадження та фрагменти програмного коду.

Наукова новизна

За результатами дисертаційного дослідження отримано такі елементи наукової новизни:

1) вперше розроблено:

- методику донавчання згорткової нейронної мережі YOLO малого розміру для задачі детектування зображень автомобілів, яка базується на автоматизованому формуванні спеціалізованого датасету зображень за допомогою нейронної мережі YOLO більшого розміру в рамках підходу «Вчитель-Учень», що дозволяє підвищити точність детектування до 24 % за метрикою mAP50 при збереженні високої швидкодії;
- методику попередньої обробки вхідних зображень для моделей згорткових нейронних мереж з архітектурою YOLO, яка включає узгоджене застосування еквалізації та центрування гістограм зображень з метою підвищення їх контрасту, що забезпечує збільшення точності детектування зображень автомобілів на 16 % за метрикою IoU.

2) подальшого розвитку отримала:

- методика для донавчання різних версій ЗНМ YOLO з використанням датасетів, створених у ручному режимі, особливістю якої є порівняльний аналіз результатів донавчання, що забезпечує цілеспрямований вибір версії YOLO відповідно вимогам до точності, швидкодії та обсягу використаних ресурсів при вирішенні конкретної задачі детектування зображень автомобілів;

– методика для автоматизованого створення набору даних із зображень автомобілів засобами моделі згорткової нейронної мережі YOLO середнього або великого розміру, особливістю якої є селекція унікальних кадрів відеопотоку з використанням перцептивного хешування, що дає змогу суттєво скоротити час формування датасету і отримувати спеціалізовані набори без дублювання даних із мінімальною участю людини-експерта.

Практичне значення одержаних результатів

Розроблені методики та програмні засоби придатні до безпосереднього застосування у прикладних системах комп'ютерного зору для автоматизованого детектування транспортних засобів та інших учасників дорожнього руху. Реалізація системи на одноплатному комп'ютері Raspberry Pi 5 з Docker-контейнеризацією суттєво знижує вартість впровадження і підвищує масштабованість рішення.

Практичні результати дослідження впроваджено у ТОВ «ДВА ВІДРА» та ТОВ «ТРК А.С.С.» для автоматизованого визначення стану паркомісць та розташування автомобілів, а також в освітній процес кафедри комп'ютерних систем та мереж Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича в межах дисциплін «Методи цифрової обробки зображень», «Комп'ютерні системи штучного інтелекту» та «Системи комп'ютерного зору» (наведено акти впровадження).

Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертаційного дослідження

1. У четвертому розділі застосовано перцептивне хешування (pHash) для відбору унікальних кадрів із фіксованим пороговим значенням. Разом з тим, у роботі відсутній аналіз впливу цього порогу на склад сформованого датасету та на кінцеву точність навченої моделі нейромережі. Включення такого аналізу дозволило б запропонувати практичні рекомендації щодо вибору порогу для відеозаписів різних типів.

2. Методику «Вчитель-Учень» перевірено в межах однорідного набору даних. Проте, не досліджено, як накопичення хибних анотацій від мережі-«Вчителя» позначається на якості моделі-«Учня» за умов значної різнорідності вхідних зображень. Доцільно було б запропонувати і перевірити критерії відбору надійних автоматичних анотацій, що підвищило б стійкість підходу.

3. Порівняльний аналіз у третьому розділі охоплює виключно версії сімейства YOLO. Було б корисним зіставити запропоновані рішення хоча б з одним представником альтернативних сучасних підходів (наприклад, трансформерних детекторів або anchor-free архітектур) для повнішої оцінки конкурентоспроможності отриманих результатів.

4. Розгорнутий аналіз продуктивності системи на платформі Raspberry Pi 5 обмежується показниками точності. Кількісна характеристика швидкодії (FPS) та споживання ресурсів у режимі реального часу, а також оцінка поведінки системи за різних умов освітлення, суттєво збагатили б практичний розділ роботи.

Наведені зауваження носять рекомендаційний характер, не применшують наукового значення дисертаційного дослідження Стеця Сергія Юрійовича та не впливають на його загальну позитивну оцінку.

Загальний висновок

Дисертаційна робота Стеця Сергія Юрійовича є актуальним, науково обґрунтованим і практично значущим дослідженням. Сформульовані наукові положення і висновки мають належну теоретичну обґрунтованість і відповідний рівень новизни. Робота являє собою самостійне завершене дослідження, яке робить вагомий внесок у розвиток методів детектування зображень автомобілів засобами ЗНМ YOLO завдяки вдосконаленню попередньої обробки зображень, автоматизації формування датасетів та застосуванню підходу «Вчитель-Учень».

Дисертаційна робота Стеця Сергія Юрійовича «Підвищення точності та швидкодії детектування зображень автомобілів засобами згорткової

нейронної мережі YOLO», подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 121 – «Інженерія програмного забезпечення» в галузі знань 12 – «Інформаційні технології», за рівнем актуальності, науково-теоретичним обґрунтуванням, новизною та практичним значенням результатів цілком відповідає пунктам 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 постановами Кабінету Міністрів України № 44 від 12.01.2022 р. (зі змінами, внесеними згідно з Постановою Кабінету Міністрів України № 341 від 21.03.2022 р., № 502 від 19.05.2023 р., № 507 від 03.05.2024 р.), а також «Вимогам до оформлення дисертації», затверджених Наказом Міністерства освіти і науки України №40 від 12.01.2017 р.

Вважаю, що Стець Сергій Юрійович заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 121 – «Інженерія програмного забезпечення» в галузі знань 12 – «Інформаційні технології».

Рецензент

доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки
Чернівецького національного університету
імені Юрія Федьковича

Андрій САМІЛА

