

РЕЦЕНЗІЯ

кандидата технічних наук,

асистента кафедри комп'ютерних наук

Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича

Дворжак Валентини Володимирівни

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 теми та змісту дисертаційного дослідження

Стрімкий розвиток інтелектуальних транспортних систем, систем відеоспостереження та технологій автономного водіння висуває підвищені вимоги до точності, швидкодії та надійності алгоритмів аналізу дорожньої обстановки. Детектування зображень автомобілів є поширеним завданням комп'ютерного зору у широкому колі прикладних задач: оцінки дорожнього трафіку, контролю місць на автомобільних парковках, моніторингу безпеки дорожнього руху. На даний час спостерігається значний прогрес у розробці архітектур згорткових нейронних мереж (ЗНМ), призначених для детектування (виявлення) зображень. Наприклад, ЗНМ сімейства YOLO (You Only Look Once) містять ряд версій, кожна з яких складається з моделей ЗНМ різних розмірів. Проте, наявні підходи не повністю задовольняють вимоги практичних систем: моделі ЗНМ малого розміру демонструють недостатню точність, а моделі великого розміру потребують значних обчислювальних ресурсів, що ускладнює їх застосування у мобільних та вбудованих системах. Крім того, формування спеціалізованих навчальних наборів зображень для навчання нейронних мереж є досить трудомістким.

Таким чином, підвищення точності та швидкодії детектування зображень автомобілів засобами ЗНМ YOLO є актуальною науковою задачею, яку в даній роботі пропонується вирішувати за рахунок попередньої

обробки зображень, створення спеціалізованих наборів зображень та донавчання ЗНМ на таких наборах. Таке застосування засобів штучного інтелекту для вирішення прикладних завдань відповідає сучасним тенденціям у галузі комп'ютерного зору.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційне дослідження Стеця С.Ю. виконано на кафедрі програмного забезпечення комп'ютерних систем Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича за держбюджетною тематикою: «Дослідження, моделювання та розробка програмного забезпечення складних динамічних систем» (Державний реєстраційний номер 0121U109232). Дослідження, викладені в дисертаційній роботі Стеця Сергія Юрійовича, відповідають напрямам науково-дослідних робіт кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем.

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

Наукові положення, висновки та результати дисертації Стеця Сергія Юрійовича обґрунтовані за рахунок застосування сучасних методів глибокого навчання для ЗНМ архітектури YOLO, методів цифрової обробки зображень, інтелектуального аналізу даних, перцептивного хешування та методів комбінаторної оптимізації (угорський алгоритм). Достовірність результатів забезпечується формуванням релевантних навчальних датасетів, їх поділом на навчальну, контрольну та тестові вибірки, використанням загальноприйнятих метрик якості детектування об'єктів (Precision, Recall, F1-score, mAP, IoU), а також порівнянням отриманих результатів із результатами програм-аналогів та відомими експериментальними даними. Аналіз роботи засвідчує, що здобувач досконало володіє сучасними методами наукового дослідження та цілеспрямовано їх застосовує. Результати дисертаційної роботи викладені чітко, логічно та аргументовано. Дисертаційне дослідження є самостійною науковою працею.

Результати, отримані в ході виконання дисертаційного дослідження, опубліковано у 10 наукових роботах. Основні результати опубліковано у трьох наукових статтях у фахових виданнях України та представлено в матеріалах шести міжнародних наукових конференцій. Додатково результати дисертації відображено в одній науковій праці, що індексується у наукометричній базі Scopus.

Структура дисертації

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів та висновків до них, загальних висновків, переліку використаних джерел (184 найменування), восьми додатків та списку публікацій автора за темою дисертації (10 наукових робіт). Робота містить 59 рисунків, 3 таблиці. Загальний обсяг роботи складає 230 сторінок, обсяг основного тексту – 148 сторінок. Основні результати дисертації у повній мірі відображені у публікаціях автора.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання проведених досліджень, описано наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, представлено методи, об'єкт і предмет досліджень, вказано особистий внесок здобувача, наведено дані щодо публікацій та апробації за темою дисертації.

У першому розділі дисертації здійснено комплексний аналіз сучасних методів та програмних засобів, призначених для детектування зображень об'єктів, зокрема, автомобілів. Детально розглянуто структуру та принципи роботи ЗНМ з архітектурами ResNet, MobileNet, EfficientNet, Inception. Проаналізовано можливості сучасних двостадійних та одностадійних детекторів зображень. Особливу увагу приділено одностадійним детекторам (YOLO). Обґрунтовано вибір архітектури YOLO як базової для подальших досліджень з огляду на її високі показники точності та швидкодії. Проаналізовано можливості наявних рішень для детектування зображень: від готових комерційних хмарних платформ (Google Cloud Vision, Amazon Rekognition) до відкритих програмних бібліотек (OpenCV), які надають

необхідний інструментарій для розробки власних систем на базі архітектури YOLO.

Другий розділ присвячений розробці та програмній реалізації методики попередньої обробки вхідних зображень для ЗНМ YOLO. Попередня обробка зображень, яка полягає у підвищенні їх контрасту, призначена для підвищення точності детектування об'єктів. Описано архітектурні особливості моделі YOLOv8 та інтеграцію модуля попередньої обробки до її конвеєра. Розглянуто три способи підвищення контрасту зображень: глобальне вирівнювання гістограми, адаптивна еквалізація CLAHE та запропонований спосіб комбінованого вирівнювання з центруванням гістограми. Встановлено, що саме останній спосіб забезпечує найвищу точність детектування рамок автомобілів, особливо для зображень із неоднорідним освітленням. Проведено регресійний та кореляційний аналіз результатів детектування, який дозволив знайти взаємозв'язки між метриками якості детектування зображень.

У **третьому розділі** розроблено методику донавчання різних версій моделей YOLO на основі спеціалізованого датасету, створеного в ручному режимі засобами Roboflow. Спеціалізація датасету полягає у використанні зображень автомобілів у певних дорожніх умовах. Описано процес створення датасету: відбору початкових зображень, їх анотування (встановлення правильного положення об'єктів) та аугментації зображень за рахунок геометричних та фотометричних перетворень (повороту, зсуву, зміни яскравості та ін.). У результаті аугментації набір даних розширено з 1542 до 3578 зображень. Виконано донавчання моделей YOLO, які були попередньо навчені на датасеті COCO. Після донавчання отримано покращення метрик якості детектування для різних версій ЗНМ (YOLOv8m та YOLOv11m). Програмно реалізовано трекінг (відслідковування) зображень автомобілів, досліджено його результати.

Четвертий розділ присвячений програмній реалізації та експериментальному дослідженню інтелектуальної системи детектування

зображень автомобілів із автоматизованим формуванням датасетів і донавчанням ЗНМ. Розроблено методику автоматизованого формування датасету зображень автомобілів засобами ЗНМ YOLO великого розміру з використанням перцептивного хешування (pHash) для відбору унікальних кадрів відеопотоку та угорського алгоритму для оптимального зіставлення об'єктів при відстеженні. Представлено методику з архітектурою «Вчитель-Учень» для донавчання YOLO малого розміру. Описано програмну реалізацію інтелектуальної системи, її функції веб-інтерфейс.

У **висновках** наведено основні результати дисертаційного дослідження, які відповідають змісту роботи. **Додатки** містять список публікацій автора, відомості про апробацію результатів, акти про впровадження результатів роботи та лістинги коду розроблених програм.

Наукова новизна

У результаті виконання дисертації отримано результати, які містять такі пункти наукової новизни:

1) вперше:

- розроблено методику донавчання ЗНМ YOLO малого розміру в рамках підходу «Вчитель-Учень», у якій спеціалізований датасет зображень формується автоматизовано засобами ЗНМ YOLO більшого розміру, що забезпечує підвищення точності детектування до 24 % за метрикою mAP50 при збереженні високої швидкодії порівняно з базовою моделлю YOLO малого розміру без донавчання;
- запропоновано методику попередньої обробки вхідних зображень для ЗНМ з архітектурою YOLO, яка ґрунтується на узгодженому застосуванні еквалізації та центрування гістограм, що забезпечує підвищення точності детектування автомобілів на 16 % за метрикою IoU.

2) набули подальшого розвитку:

- методика донавчання різних версій ЗНМ YOLO з використанням датасетів, сформованих у ручному режимі, доповнена порівняльним аналізом

результатів донавчання, що забезпечує цілеспрямований вибір версії YOLO за вимогами до точності, швидкодії та обсягу ресурсів;

– методика автоматизованого формування датасету зображень автомобілів засобами ЗНМ YOLO, яка доповнена механізмом відбору унікальних кадрів відеопотоку на основі перцептивного хешування, що дозволяє скоротити надлишковість даних на 88 % та суттєво зменшити участь людини-експерта.

Практичне значення одержаних результатів

Практичне значення результатів дослідження полягає у можливості застосування розроблених методик та програмних засобів для автоматизованого донавчання ЗНМ YOLO та високоточного детектування зображень автомобілів та інших учасників дорожнього руху в прикладних системах комп'ютерного зору. Розроблена інтелектуальна система функціонує на базі одноплатного комп'ютера Raspberry Pi 5 з використанням контейнеризації (Docker), що значно знижує вартість впровадження системи у реальних умовах.

Результати дисертаційного дослідження впроваджено у ТОВ «ДВА ВІДРА» та ТОВ «ТРК А.С.С.» для визначення стану місць на стоянці та положення автомобілів за їхніми зображеннями (акти впровадження від 10 грудня 2025 р.), а також в освітній процес кафедри комп'ютерних систем та мереж Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича для навчальних дисциплін «Методи цифрової обробки зображень», «Комп'ютерні системи штучного інтелекту» та «Системи комп'ютерного зору» (акт впровадження від 23 грудня 2025 р.), що підтверджується відповідними актами.

Недоліки та зауваження до змісту дисертаційної роботи

1. У роботі проведено дослідження моделей YOLO версій 8, 9 та 11, проте доцільно було б розширити порівняльний аналіз, включивши архітектурно відмінні рішення (наприклад, YOLOv10 або RT-DETR). Оскільки ці версії використовують альтернативні підходи до оптимізації (наприклад, позбавлення від NMS або використання трансформерів), їх

порівняння з обраними моделями дозволило б більш глибоко обґрунтувати вибір базової архітектури для вбудованих систем.

2. Слід зазначити, що в роботі відсутня кількісна оцінка стійкості розробленої системи до різних умов освітлення та погодних явищ при роботі у реальних умовах, що було б корисним для практичного застосування.

3. У розділі 3 при описі процесу аугментації зображень не пояснено, що означає зсув зображення у діапазоні до 5° , а також не обґрунтовано вибір діапазонів зміни параметрів зображень (повороту, зсуву та ін.) при аугментації.

4. У дисертаційному дослідженні використано моделі YOLO без зміни їх структури з урахуванням особливостей зображень автомобілів, до яких належить, зокрема, присутність чітких контурів, деталей автомобілів характерної форми. Така зміна структури нейромереж потенційно дозволила б підвищити точність детектування зображень.

Зазначені зауваження не применшують наукового значення дисертаційного дослідження Стеця Сергія Юрійовича та не впливають на його загальну позитивну оцінку як самостійного і завершеного наукового дослідження.

Загальний висновок

Дисертаційна робота Стеця Сергія Юрійовича є актуальною, має високу теоретичну та практичну цінність. Висновки й основні положення дисертації є обґрунтованими і мають наукову новизну. Під час аналізу матеріалів дисертаційної роботи порушень академічної доброчесності не виявлено. Розглянута дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, у якому зроблено значний внесок у розвиток методів детектування зображень автомобілів засобами ЗНМ YOLO шляхом попередньої обробки зображень, автоматизації формування датасетів та застосування підходу «Вчитель-Учень» для донавчання нейронних мереж.

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 її актуальністю, науково-теоретичним рівнем, новизною розв’язання поставлених завдань, практичним значенням отриманих 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

кандидат технічних наук,

асистент кафедри комп’ютерних наук

Чернівецького національного університету

імені Юрія Федьковича

Валентина ДВОРЖАК

