

Протасов А.Г.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Сторожик Д.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ТЕХНОЛОГІЇ АВТОМАТИЗАЦІЇ ДІАГНОСТИКИ ДОРОЖНЬОГО ПОКРИТТЯ

Дороги є основною транспортною системою у будь-якій країні, а в Україні вони складають 169,5 тис. км., що є найбільшим об'єктом критичної інфраструктури. Враховуючи, що дорожні покриття схильні до зносу та старінню, то ефективна та своєчасна оцінка їх стану стає вирішальною для забезпечення безпеки транспортної системи та для зниження надмірних витрат на ремонт та технічне обслуговування. Тому, метою цієї роботи став аналіз автоматизованих технологій виявлення та класифікації пошкоджень дорожнього покриття та визначення напряму подальшого розвитку цих технологій.

У статті розглядається використання деяких методів неруйнівного контролю для автоматизованого виявлення та класифікації пошкоджень дорожнього покриття, аналізуються їх переваги та недоліки. Багато дослідників використовували методи обробки зображень для автоматизації процесу обстеження та підвищення якості та точності результатів обстеження. Сьогодні, з розвитком теорії та практичного застосування нейронних мереж, спостерігається тенденція поєднання методів контролю з нейронними мережами, що дає можливість використання сучасних методів машинного навчання для автоматизації обробки та оцифрування даних. Наступна тенденція, що спостерігається в напрямку автоматизації моніторингу стану дорожнього покриття – це розробка мультисенсорних роботизованих систем. Використання таких систем дозволяє здійснювати автономний збір даних та надає можливість аналізу даних практично в реальному часі. В статті описуються деякі з останніх розробок в області автономних роботизованих платформ для неруйнівного контролю та моніторингу стану доріг та мостових конструкцій.

Ключові слова: автоматизація обробки зображень, неруйнівний контроль, моніторинг дорожнього покриття.

Постановка проблеми. Дорожньо-транспортне покриття пронизує країну наче артерії, що живлять економіку України. Автомобільні шляхи в Україні складають 169,5 тис. км., що є найбільшим об'єктом критичної інфраструктури в Україні. На ремонтні роботи цих об'єктів, спрямовується велика частина коштів, тому вивчення шляхів зменшення видатків є важливою задачею. Зазвичай, вартість реконструкції дороги, що погіршилася внаслідок відсутності технічного обслуговування, може більш ніж втричі перевищувати вартість збереження дороги, яка часто обслуговується [1].

ДСТУ 8954 виділяє 3 основні шляхи проведення діагностики якості дорожнього покриття [2]: експертно-візуальний метод; візуально-інструментальний метод та автоматизований метод. Сьогодні найбільш часто використовуються експертно-візуальний та візуально-інструментальний методи, де діагностику проводять експерти

оглядаючи дорожнє покриття або використовуючи спеціальні вимірювальні пристрої. При цьому, для обробки результатів використовують алгоритми на основі пікселів для визначення характеристик тріщини, але цей підхід вимагає багато часу Dare P. et al [3].

Метою цієї роботи є аналіз автоматизованих технологій виявлення та класифікації пошкоджень дорожнього покриття та визначення напряму подальшого розвитку цих технологій.

Технології з використанням видимого випромінювання

Зображення у видимому випромінюванні отримують з датчиків які розташовані на борту автомобіля або супутниках, іноді використовують фото з камери телефона. В більшості випадків, для обробки цих зображень використовують класичні алгоритмічні методи розпізнавання та реєстрації образів. Популярними методами обробки зображень дорожнього покриття є методи засновані на

використанні бінарних зображень [4, 5]. У роботі [6] запропоновано методи цифрової обробки вхідних бінарних зображень для спеціалізованого програмного забезпечення, яке об'єктивно та повністю автоматично визначає тип, ступінь та серйозність тріщини поверхні для гнучких дорожніх тротуарів.

Для реалізації процесу автоматичної обробки зображень покриття доріг і мостів, багато авторів використовують у своїх методах алгоритми, засновані на виявленні країв об'єктів. Так, у роботі [7] авторами було використано фільтри Гаора. При цифровій обробці зображень ці фільтри застосовуються для розпізнавання меж об'єктів, вони мають імпульсну перехідну характеристику, яка визначається у вигляді гармонійної функції, помноженої на гауссіан. Автори застосували фільтри Гаора для виявлення поздовжніх і поперечних тріщин у дорожньому покритті. Для вибору та об'єднання класифікаторів було застосовано алгоритм машинного навчання AdaBoost. Цей алгоритм покращує результати, що надаються одним класифікатором, але його недоліком є чутливість до шуму даних і викидів. Крайовий аналіз зображень для реалізації автоматизованої процедури виявлення тріщин пропонується й у роботі [8]. Автори розглядають використання двох алгоритмів – Кенні та швидкого перетворення Хаара ФНТ. У роботі використовується автоматизована статистична процедура, заснована на аналізі робочих характеристик приймача з метою знайти оптимальний набір його параметрів та теорії прийняття рішень Байеса. Запропонований метод проведення аналізу зображень застосовується для оцінки пошкоджень бетону – тріщин, викришування тощо. Застосування алгоритмів – Кенні для цифрової обробки зображень також було представлено у статті [9], де зображення тротуару розглядалося за шкалою сірого і зниження шуму було згладжено за допомогою фільтра Гауса. Перевага методу полягає в його здатності виявляти краї у присутності шуму та знаходити слабкі краї. Однак, при застосуванні фільтра Гауса відбувається згладжування меж, які вважаються високочастотною ознакою. Це збільшує можливість пропуску слабких країв і появи в результаті згладжування ізольованих країв.

Технології на основі нейронних мереж

Швидкий розвиток інтелектуальних алгоритмів виявлення на основі глибокого навчання дозволив ефективно вирішувати питання трудомісткого процесу перевірки стану доріг. Авторами роботи [10] розроблена на базі нейронних мереж система під назвою «Road Atlas» для класифікації та сегмента-

ції тріщин. Цю систему зроблено з використанням сучасних підходів web-розробки і вона має сучасний web-інтерфейс взаємодії з користувачем, який підтримує різні функції зовнішнього вигляду. Система має вбудований сервер, створений за допомогою мови програмування Python та мікро фреймворк (micro framework) для web-додатків Flask. Сервер дозволяє обмін даними з інтерфейсом і зберігає інформацію в базі даних MongoDB.

У роботі [11] запропоновано систему для автоматизованого виявлення тріщин та їх класифікації з використанням архітектури глибокої згорткової нейронної мережі (DCNN). Оптичне зображення дорожнього покриття автори сегментували на патчі та використали їх для навчального набору даних з вихідними тріщинами та навченої DCNN з фільтрами двох різних розмірів: 3x3 та 5x5. Для оцінки продуктивності мережі DCNN використовувався кількісний аналіз результатів класифікації тротуарної плитки. Ефективність виявлення тріщин була розрахована з використанням трьох характеристик: "recall", "precision" та "accuracy". Характеристику "recall" автори розглядали як відсоток зразків тріщин, що ідентифіковано мережею із загальної кількості тріщин у наборі даних. "Precision" – це відсоток прогнозованих тріщин, які насправді були тріщинами. Під характеристикою accuracy розумівся відсоток правильно класифікованих тріщин і зразків без тріщин із загальної кількості тріщин і зразків з відсутністю тріщин в наборі даних. Усі три параметри розраховувалися наступним чином [12]:

$$\text{recall} = \frac{TP}{TP + FN}; \quad \text{precision} = \frac{TP}{TP + FP};$$

$$\text{accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN},$$

де TP – дійсні позитивні результати; TN – дійсні негативні результати; FP – хибні позитивні результати; FN – помилкові негативні результати.

Результати проведених авторами експериментів, відносно продуктивності роботи запропонованої мережі по визначенню тріщин за характеристиками "recall", "precision" та "accuracy" показані в таблиці 1.

Таблиця 1 [11]

Результати експериментів

Розмір фільтру	Recall	Precision	Accuracy
3x3	98.1%;	99.1%	99.0%
5x5	98.0%;	99.0%	99.0%

Однак авторам не вдалося вирішити проблему наявності шумових візерунків, таких як тіні, мас-

ляні та водяні плями на поверхні дорожнього покриття. Наявність цих візерунків робить виявлення тріщин дуже складним завданням пропонованої DCNN і знижує ефективність класифікації.

У дослідній роботі [13] розглядається система виявлення дефектів тротуарів, заснована на нейронній мережі з глибоким навчанням YOLO. Мережа YOLO була використана для прогнозування можливого розташування та категорії дефекту. Комплексна точність виявлення сягнула 73,64%. Швидкість обробки зображень відповідала 0,0347 с/рис, що в 9 разів швидше, ніж у згорткової мережі на основі швидких областей Faster R-CNN і тільки на 70%, ніж у SSD – мережі, що призначена для виявлення об'єктів в режимі реального часу. Результати показали, що метод має обмежене застосування та залежить від відповідного освітлення.

Технології з використанням інфрачервоного випромінювання

На ринку вимірювальних приладів з'явилися тепловізійні камери з високою роздільною здатністю і високою термочутливістю, це дозволило використовувати інфрачервону термографію (ІЧТ) в нових областях, у тому числі і для оцінки якості поверхні асфальтового покриття. Разом з тим, поряд з успішним застосуванням ІЧТ виникає низка проблем. Одна з них, це складність автоматизації обробки й аналізу теплових зображень [14]. Друга проблема спричинена такими факторами, як коливаннями температури навколишньої температури, наявністю неоднорідності коефіцієнта випромінювання асфальтного покриття та тіней від придорожніх дерев, недостатньою частотою розгортки камери та ін. [15, 16].

Вирішенню таких проблем присвячена робота вчених Чеської республіки [17]. У роботі досліджувалась можливість використання тепловізійних камер для проведення діагностики стану дорожнього покриття на вимірювальному транспортному засобі. Дослідження показали, що дефекти на дорожньому покритті можуть бути виявлені за допомогою тепловізора (рис.1).

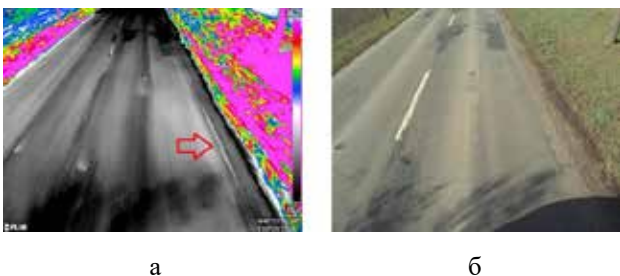


Рис. 1. Термограма (а) та цифрова фотографія (б) тріщини на тротуарі [17]

Червоною стрілкою на рис. 1а позначена тріщина в дорожньому покритті, яка зафіксована тепловізійною камерою. При порівнянні термограми з фотографією тієї ж ділянки (рис. 1б) можна побачити, що зображення тріщини більш помітне на термограмі. Разом з тим, існують певні обмеження у використанні тепловізорів для отримання теплових зображень дорожнього покриття – записи теплових зображень виявляються розмитими при швидкості автомобіля більшої за 40 км/год і кут нахилу камери відносно площини дороги мусить бути не менше 45°.

При стандартній частоті розгортки камери в 50 Гц було отримано настільки великий об'єм інформації, що її не вдалося опрацювати, тому дослідники змушені були зменшити частоту розгортки до 12 Гц.

Використання коефіцієнта випромінювання асфальтного покриття як основного інформаційного параметру при проведенні термографічного контролю доріг було запропоновано у роботі [18]. Зі старінням асфальту зменшується його масляниста складових, що призводить до збільшення на поверхні вапняку. Використовуючи високе поглинання вапняком ІЧ випромінювання на довжині хвилі 11,2 мкм, автори змогли виявити ділянки зношеності. Ця методика не може бути застосована в міських умовах через так званий ефект теплового острову – відбите випромінювання від навколишньої місцевості (яскравісні ефекти). Відбите випромінювання, поглинання випромінювання атмосферою та зовнішні фактори, такі як вітер, дощ або сонячне світло, впливають на місцеві температури та ускладнюють інтерпретацію інфрачервоних зображень [19].

Використання ІЧТ для виявлення порожнин під дорожнім покриттям було досліджено в роботі [20]. ІЧТ дає можливість виявляти під поверхневі дефекти, але вона не завжди ефективна при використанні традиційних методів обробки зображень, таких як, наприклад, похідні зображення. Тому, авторами було досліджено застосування сучасних методів аналізу ІЧ-зображень, таких як аналіз коефіцієнта детермінації (R2), термографія основних компонентів (PCT) і термографія розділених основних компонентів (S-PCT).

Перевірка ефективності цих методів та їх точність виявлення порожнин під дорожнім покриттям виконувалася на лабораторній моделі проїжджої частини. Поверхня моделі дороги прогрівалася протягом 6 годин для імітації сонячного нагріву, а потім, поки модель остигала, збиралися ІЧ-зображення. Зокрема зображення записува-

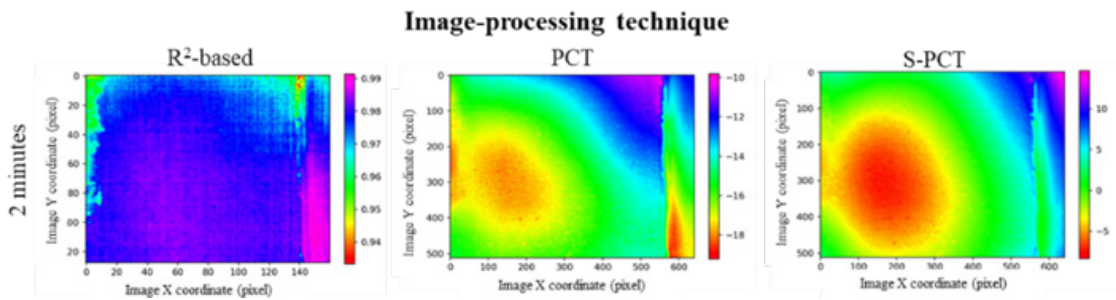


Рис. 2. Результати порівняння аналізу термограм методами на основі R2, PCT та S-PCT [20]

лися з інтервалами: 2 хвилини, 5 хвилин, 10 хвилин, 15 хвилин.

Для виконання методу PCT авторами роботи [20] було взято часовий ряд ІЧ-зображень, знятих у моменти часу $t = t_1, t_2, \dots, t_n$. Перед застосуванням PCT кожне інфрачервоне зображення перебудовувалося для створення вектора температури T_i . PCT – це метод лінійної декомпозиції, чутливий до шумів в зображенні та викидів. Для боротьби з нелінійністю та прихованими змінними була розроблена модифікована версія PCT, яка називається термографією розріджених основних компонентів (S-PCT). Найбільш істотною відмінністю від PCT є те, що головні компоненти витягуються за допомогою задачі оптимізації, заснованої на загальній кількості ненульових елементів у векторі температури та сумі всіх абсолютних значень у векторі [21]. Завдяки використанню ненульових елементів та особливостям розрідженості теплового розподілу S-PCT став надійнішим методом, ніж PCT, що підтвердили результати виявлення порожнин (рис. 2).

З трьох методів, що розглядалися в цьому дослідженні, S-PCT показує стійкіший відгук при всіх частотах дискретизації. Загалом середня точність S-PCT становить близько 90% з максимальною точністю 96%, коли ІЧ-зображення збираються з 2-хвилинною частотою дискретизації.

Marcello Stimolo [22] дає огляд пошкоджень, які можна виявити за допомогою ІЧТ у дорожньому та мостовому покритті. Особлива увага приділяється виявленню бульбашок у гідроізоляційних мембранах та настилах мостів. Термограми можуть бути використані як під час будівництва, так і в процесі експлуатації об'єкта. Однак цей метод не ефективний при контролі доріг із ямковим ремонтом. При аналізі термограм яма після ремонту виглядає як дефект покриття через свою схожість з порушенням суцільності.

Технології з використанням георадарів та лазерних сканерів

Принцип роботи георадара заснований на використанні відбитих електромагнітних імпульсів високої частоти (10 МГц – 2,6 ГГц) при скануванні поверхні доріг та побудови зображення під поверхневого шару.

У роботі [23] представлені дослідження можливості використання георадара з наземним зв'язком для виявлення неглибокого розшарування у покриттях із суцільного армованого бетону. У статті демонструються результати геолокації – розшарування розрізу бетонного покриття без розпилу і керн структури у місці, де підозрюється наявність дефекту (рис. 3).

Відсутність сильних відбитків сигналу від внутрішньої структури була оцінена як зона без дефекту («no defect area»). Зона розшарування («delamination area») мала більш явний сигнал георадару, вона відзначена маркером як «stack location» і інтерпретована як відшарування.

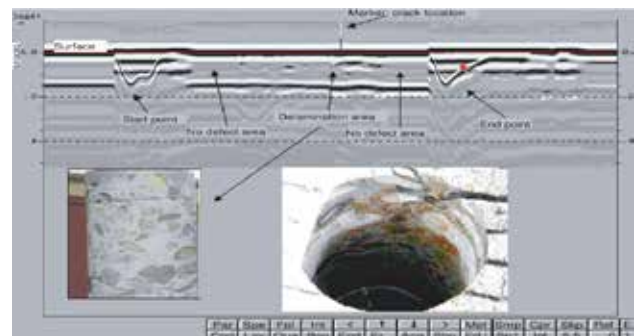


Рис. 3. Порівняння результатів георадара із зразком керна на повну глибину в зоні підтвердженого розшарування [23]

Цей підхід був оцінений авторами як потенційно перспективний, хоча отримане зображення дуже важко інтерпретувати – відрізнити область з дефектом від бездефектної дуже непросто.

Проблеми обробки та інтерпретації даних георадара присвячена робота [24]. Автори предста-

вили багатоступінний метод обробки даних, зібраних на реальній гнучкій дорожній конструкції. Цей метод передбачає корекцію вихідного сигналу, видалення низькочастотних гармонік, усунення дзвону антени радара, посилення сигналу та смугову фільтрацію. Автори дійшли висновку, що автоматизація процесу контролю стану доріг полягатиме в необхідності використання багатоканальних радіолокаційних систем та багатоканальної обробки георадарних даних. Принципи роботи георадарних систем, включаючи методи обробки сигналів та інтерпретації даних узагальнені у [25]. Наголошується, що важливим аспектом застосування георадару у дослідженнях дорожніх покриттів є розробка зручних програмних систем для поєднання результатів георадару з іншими методами.

Найпопулярніші та найкорисніші застосування георадара в діагностиці дорожнього покриття включають вимірювання товщини шару дорожнього покриття та виявлення пустот [26, 27].

Грунтовний аналіз рівня розвитку методів контролю транспортної інфраструктури з використанням георадару та сучасні результати досліджень з цієї тематики представлені у [28]. В роботі обговорюються переваги та недоліки георадарного обстеження. Зазначається, що сьогодні цікавою областю досліджень є поєднання георадару та інших засобів неруйнівного контролю з роботизованими платформами.

Суттєвим недоліком використання георадару залишається складність інтерпретування результатів обстеження. Грунт, що обстежується має невідомі діелектричні властивості, які неможливо врахувати при геолокації, а його неоднорідність призводить до зашумлення зображень. Без достатньої інформації про електромагнітні властивості підземних матеріалів метод буде не точним [28].

В останній час набуває популярності використання методу дистанційного зондування на основі лазерних сканерів або так званих лідарів (LiDAR – Light Detection and Ranging), що означає «виявлення та визначення дальності за допомогою світла». Технології на основі лідарів дозволяють створювати просторово точні цифрові моделі фізичних об'єктів з високою роздільною здатністю, відомих як «хмари точок» [29]. Застосування технологій 3D лазерного сканування з метою виявлення дефектів дорожнього покриття наведені у роботі [30]. В ході дослідження авторами проводилося лазерне сканування дорожнього полотна. В результаті були побудовані тривимірні зображення точок із «хмари точок».

У процесі обробки результатів на основі сітки було вилучено конкретні точки, що мають ознаки дефектності. Автори показують, як LiDAR та методи обробки даних на основі сітки можуть бути застосовані до проблемних ділянок дороги, таких як маленькі вибоїни, вибоїни великих площ та поверхневі латки.

3D-моделі поверхні можна використовувати для оцінки стану дорожньої та аеропортової інфраструктури, визначення низинних ділянок, схильних до дренажу та проблем із затопленням. Точність вимірювань таких нерівностей може складати до 2 см [31]. Експериментальні результати показують, що проблемні ділянки можуть бути точно та автоматично визначені. Таким чином, можна автоматизувати не тільки процес моніторингу характеристик дорожнього покриття, але й розрахунок необхідної кількості матеріалів для заповнення порожнин при ремонті. Одним із обмежень систем на основі LiDAR є те, що вони сканують та відображають лише видимі поверхні. Отже, вони можуть надати інформацію лише про поверхневі дефекти.

Комбіновані методи з використанням мульти-сенсорних систем

Використання двох або більше датчиків при моніторингу стану дорожнього покриття дає більш інформативний результат. У дослідженні [32] автори пропонують метод двосвітлової інспекції (DLI dual-light inspection) для зменшення хибних спрацьовувань при попаданні в поле огляду плям розливу оліви, нафти, тині або дорожньої розмітки. Традиційні методи обробки зображень часто помилково сприймають ці чинники як дефектність дорожнього полотна. Метод DLI використовує два зображення одного місця огляду при різному освітленні і складається з чотирьох основних етапів: (1) захоплення зображення об'єкта з різним освітленням; (2) віднімання зображення – два зображення віднімаються попіксельно, щоб отримати зображення, яке представляє відмінності між зображеннями для суміщення; (3) покращення зображення – для вилучення ознак дефектності застосовується метод виявлення меж та (4) класифікація зображень – алгоритм класифікації використовується для пошуку відмінностей у зображеннях, які включають дефектність та тих, що її не містять. На рис. 4 показано результати обробки зображень.

Автори порівняли точність методу DLI із традиційними методами, які використовують окремі зображення. Наприклад, значно підвищилася точність визначення розливу маслянистої рідини

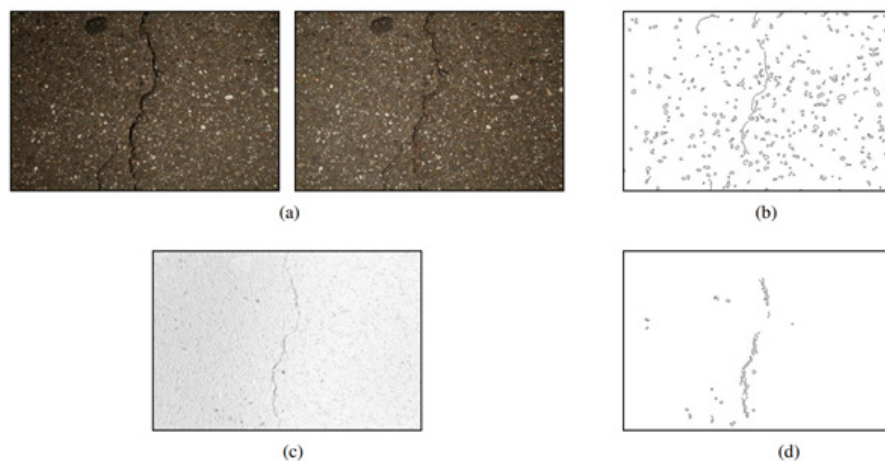


Рис. 4. Результат визначення поздовжньої тріщини: (а) зображення з різним освітленням; (б) застосовано метод виявлення країв до вихідних зображень; (с) зображення, що віднімається; (г) застосовано метод виявлення краю зображень, що віднімаються [32]

(традиційний: 18%, DLI: 82%) та виявлення поздовжніх тріщин (традиційні: 62%, DLI: 69%).

Порівняння поширених технологій дистанційного зондування з погляду їх застосування для класифікації дорожнього покриття представлено у статті [33]. Автори дають огляд застосування оптичних, лазерних, ультразвукових та мікрохвильових датчиків для класифікації поверхонь. З аналізу випливає, що об'єднання даних датчиків дозволяє отримати точніші і достовірні результати. З іншого боку, така технологія суттєво ускладнює автоматизацію процесу контролю.

У роботі [34] представлений метод виявлення тріщин на основі згорткової нейронної мережі та інфрачервоної термографії. Для створення еталонного набору даних були використані зображення трьох типів: видимі, інфрачервоні та злиття видимих та інфрачервоних зображень. На цьому наборі даних навчалися та оцінювалися сім моделей сегментації нейронної мережі. Результати показують, що точність та передбачення видимого зображення та зображення злиття практично ідентичні для всіх моделей і вони набагато кращі, ніж інфрачервоні зображення. У разі шорсткого фону або схожості тріщини з фоном, зображення злиття є найкращим вибором для виявлення тріщин. Порівняно з видимим зображенням, всі моделі сегментації мають більш стабільну продуктивність для злитого зображення. Серед моделей сегментації кращою була визначена модель Feature Pyramid Networks (FPN), оскільки вона має високу точність і низьку складність.

Комбіноване застосування георадару та інфрачервоної термографії для виявлення та визначення характеристик тріщин у дорожньому покритті та їх походження розглядається авторами роботи [35]. Інфрачервона термографія допомагає виявляти поверхневі та під поверхневі ушкодження та дефекти за рахунок реєстрації випромінювання в інфрачервоному діапазоні. Однак цей метод не дає інформації про глибину дефектів, оскільки вловлює випромінювання тільки з поверхні. Автори пропонують його комбінувати з іншими неруйнівними методами, такими як георадар. Дані, отримані двома методами при виявленні тріщин, доповнюють один одного.

Оглядова стаття Elseicy A. et al [36] наводить найбільш актуальні роботи, що присвячені комбінованому застосуванню георадару та інших методів неруйнівного контролю для моніторингу дорожнього покриття. Доводиться, що методи неруйнівного контролю разом із георадаром можуть надати докладні карти стану поверхні та під поверхневих шарів в одній і тій же області за різних погодних умов та умов освітлення. В результаті, обмеження застосування кожного методу НК зводяться до мінімуму, а загальна інформативність результатів зростає.

Автори стверджують, що при використанні комбінованих методів контролю поверхні, існують можливості використання сучасних методів машинного навчання для автоматизації обробки та оцифрування даних та використання цих даних для створення надійних моделей, які можуть навчатися. Використання сучасних роботизова-

них систем дозволяє здійснювати автономний збір даних та надає можливості аналізу даних практично в реальному часі.

Проте, під час роботи з комбінованими системами виникає безліч проблем. Процес збору даних відрізняється за часом та вартістю для різних методів НК. Спільна обробка даних також може бути складною через різноманітність даних та придатність до додатку, тому постає задача підвищення інформативності кожного з методів НК [37].

Розробка повністю автономної роботизованої платформи з великою кількістю датчиків для оцінки дорожнього покриття запропонована в [38]. Роботизована система оснащена кількома датчиками неруйнівного контролю та має здатність збирати дані в реальному масштабі часу та обробляти їх у квазіреальному часі. Наведено метод об'єднання датчиків, який успішно мінімізує час їх перевірки при виконанні контролю областей, що вимагають збирання більш детальних даних.

А. Навіб та його колеги [39] представили всебічний огляд сучасних роботизованих платформ, датчиків та алгоритмів, які були розроблені для огляду та оцінки мостів та цивільної інфраструктури загалом. У цьому огляді розглянуто деякі з останніх розробок у галузі автономних роботизованих платформ для неруйнівного контролю та моніторингу стану конструкції мостів. Автори відзначають три основні напрями досліджень. Перше відноситься до розробки технологічних роботизованих платформ, друге дослідження спрямоване на використання безлічі датчиків для цих платформ і третє – розробка алгоритмів та методів обробки та злиття інформації, отриманої від безлічі датчиків. Методи злиття були поділені на чотири групи:

1. Злиття на рівні даних – необроблені дані з різних датчиків перетворюються і об'єднуються разом.
2. Злиття на рівні функцій – елементи з мультимодальних даних зіставляються разом.
3. Злиття на рівні класифікатора – кілька різних класифікаторів використовуються разом для розробки гібридних класифікаторів.
4. Злиття на рівні результатів – для індивідуального аналізу даних із індивідуальних датчиків.

Поєднання датчиків у системах дозволяє підвищити ефективність отримання інформації. Методи злиття датчиків підвищують загальну

точність, а також знижують обсяг даних. До проблем, що виникають під час розробки роботизованих платформ з мультисенсорними системами, автори відносять великі витрати часу та ресурсів, які не завжди призводять до бажаних результатів.

Висновки

Теми, які обговорювалися у цій статті, пов'язані з автоматизованими методами виявлення та класифікації пошкоджень дорожнього покриття. Найбільш популярними на сьогодні можна вважати методи НК (ІЧТ, георадар, LiDAR та ін.). Кожен з методів має свої переваги та недоліки, але вони мають загальну проблему – необхідність в автоматизації обробки й аналізу зображень та їх інтерпретації.

Спостерігається тенденція поєднання методів НК з нейронними мережами, що дає можливість використання сучасних методів машинного навчання для автоматизації обробки та оцифрування даних та використання цих даних для створення надійних моделей, які можуть навчатися. Використання комбінованих методів зі штучним інтелектом дозволяє звузити певні обмеження у використанні методів НК, підвищити їх ефективність та проводити класифікацію дефектів, що може стати основою для створення надійних систем керування дорожніми покриттями.

Також в статті приділяється увага роботизованим платформам, які були розроблені для неруйнівного контролю. Використання таких систем дозволяє здійснювати автономний збір даних та надає можливість аналізу даних практично в реальному часі. З досягненнями в галузі розробки більш чутливих датчиків зображення та комп'ютерних технологій, стало можливим реалізація різних методів об'єднання датчиків з розробкою автономних роботизованих систем для неруйнівного контролю об'єктів. Поєднання датчиків у системах дозволяє підвищити ефективність отримання інформації, збільшити загальну точність, а також знизити обсяг даних. З іншого боку, може бути складною спільна обробка даних через різноманітність даних та придатність спільного додатку.

Подальші дослідження у цій сфері можуть бути направлені на розвиток методів інтеграції різних датчиків у роботизовані системи, об'єднанні даних та розробки нових алгоритмів для їх опрацювання.

Список літератури:

1. AASHTO (2009). Rough Roads Ahead: Fix Them Now or Pay for it Later. Joint publication of the American Association of State Highway and Transportation Officials and National Transportation Research Group, Washington, DC.

2. ДСТУ 8954 (2019). Автомобільні дороги. Оцінювання рівня дефектності дорожнього одягу.
3. Dare P. et al. An operational application of automatic feature extraction: The measurement of cracks in concrete structures." *Photogramm. Rec.*, 2002, 1799, 453–464.
4. Georgopoulos A, Loizos A, Flouda A. Digital image processing as a tool for pavement distress evaluation. *J Photogramm Remote Sens.*, 1995, 50(1):23–33.
5. Koutsopoulos H, El Sanhoury I. Methods and algorithms for automated analysis of pavement images. *Pavement Management: Data Collection, Analysis, and Storage*, 1991, (1311).
6. Oliveira H., Correia P. Automatic road crack detection and characterization. In: *Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2013, 14(1). IEEE, pp 155–168.
7. Zalama E., et al. Road Crack Detection Using Visual Features Extracted by Gabor Filters. *Computer-Aided Civil Infrastructure Eng.*, 2014, 29(5):342–358
8. Hutchinson T, Chen Z Improved image analysis for evaluating concrete damage. *J Comput Civil Eng.*, 2006, 20(3):210–216
9. Ouyang A., Luo C., Zhou C. Surface distresses detection of pavement based on digital image processing. *Computer and Computing Technologies in Agriculture IV*, 2011, pp 368–375.
10. Chen Z. et al. Roadatlas: Intelligent Platform for Automated Road Defect Detection and Asset Management. *ATM Multimedia Asia*, 2021, 1–3.
11. Yusof, N. A. M., et al. Deep convolution neural network for crack detection on asphalt pavement. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1349. No. 1. IOP Publishing,
12. Pauly L., Peel H., Luo S., Hogg D. and Fuentes R. Deeper Networks for Pavement Crack Detection 34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2017) p. 479–485.
13. Yuchuan Du., et al. Pavement distress detection and classification based on YOLO network, *International Journal of Pavement Engineering*, 2021, 22:13, 1659-1672, DOI: 10.1080/10298436.2020.1714047.
14. Сторожик Д.В., Протасов А.Г. та ін. Автоматизація процесу теплового неруйнівного контролю шляхом застосування методу комплексування термограм. Технічна діагностика і неруйнівний контроль, 2022, №2, ст. 20-23. <https://doi.org/10.37434/tdnk2022.02.03>.
15. Sham J. F., Memon S. A., and Lo Y. Application of continuous surface temperature monitoring technique for investigation of nocturnal sensible heat release characteristics by building fabrics in Hong Kong," *Energy buildings*, 2013, vol. 58, pp. 1-10.
16. Caracelas M., Lagüela S., Gonzales H. and Arias P. Approach to identify cracking in asphalt pavement using GPR and infrared thermographic methods: Preliminary findings *NDT&E Int.*, 2014, 62 pp 55-65.
17. Janků Michal, and Josef Stryk. Application of infrared camera to bituminous concrete pavements: measuring vehicle. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 236. No. 1. IOP Publishing.
18. Pascucci S., et al. Road asphalt pavements analyzed by airborne thermal remote sensing: preliminary results of the Venice highway. *Sensors*, 2008, 8(2):1278–1296.
19. Clark M., McCann D., Forde M. Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges. *NDT E Int.*, 2003, 36(4):265–275.
20. Kulkarni N. N. et al. Comparative analysis of infrared thermography processing techniques for roadways' sub-pavement voids detection." *NDT & E International*, 2022, 129: 102652.33.
21. Wang Q., Xia R., et al. Pixel-based thermal sequence processing algorithm based on R2 fractile threshold of non-linear fitting in active infrared thermography, *Infrared Physics & Technology*, 2020, vol. 109, p. 103-122
22. Stimolo Marcello. Practical utilization of thermography in road construction and in waterproofing systems. *Thermosense XXIV*, 2002, vol. 4710. SPIE.
23. Juanyu Liu, Zollinger D., Lytton R. Detection of Delamination in Concrete Pavements Using Ground-Coupled Ground-Penetrating Radar Technique. *Geology. Transportation Research Record*, 2008. DOI:10.3141/2087-08.
24. Ciampoli L., Tosti F., Economou N. and Benedetto F. Signal Processing of GPR Data for Road Surveys. *Geosciences* 2019, 9(2), 96; <https://doi.org/10.3390/geosciences9020096>.
25. Joshaghani A. and Shokrabadi M. Ground penetrating radar (GPR) applications in concrete pavements, *International Journal of Pavement Engineering*, 2021, pp. 1-28. DOI: 10.1080/10298436.2021.1954182.
26. Wang S., Zhao S., Al-Qadi I.L. Continuous real-time monitoring of flexible pavement layer density and thickness using ground penetrating radar. *NDT E Int.* 2018, 100, 48–54.
27. Doler, D. Kovačič, B. Improved decision-making geo-information system for continuous monitoring of deformations on airport infrastructure. *Isprs Int. J. Geo-Inf.*, 2019, 8, 1.
28. Solla M., Pérez-Gracia V., and Fontul S. A Review of GPR Application on Transport Infrastructures: Troubleshooting and Best Practices, *Remote Sensing*, 2021, vol. 13, no. 4, p. 672.
29. Lato M., Diederichs M., Hutchinson D., Harrap R. Evaluating roadside rock masses for rockfall hazards using LiDAR data: optimizing data collection and processing protocols. *Nat Hazards*, 2012, 60(3):831–864.

30. Chang K., Chang J., Liu J. Detection of pavement distresses using 3D laser scanning technology. In: Proceedings of the 2005 ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering.
31. Uddin W. Remote sensing laser and imagery data for inventory and condition assessment of road and airport infrastructure and GIS visualization. *Int J Roads Airports*, 2011, 1(1):53–67.
32. Su Y., Kang S., Chang J., Hsieh S. Using dual lights for robotic pavement inspection. In: Proceedings of SICE Annual Conference, 2010, vol 1.
33. Bystrov A. et al. Sensors for automotive remote road surface classification. *IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety*, 2018.
34. Fangyu L., Liu J., and Wang L. Asphalt Pavement Crack Detection Based on Convolutional Neural Network and Infrared Thermography. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022.
35. Solla M., Lagüela S., González-Jorge H.; Arias P. Approach to identify cracking in asphalt pavement using GPR and infrared thermographic methods: Preliminary findings. *NDT E Int.*, 2014, 62, 55–65.
36. Elseicy A., et al. Combined Use of GPR and Other NDTs for Road Pavement Assessment: An Overview *Remote Sens.*, 2022, 14, 4336. <https://doi.org/10.3390/rs14174336>.
37. Сторожик Д.В. Муравйов О.В., Протасов А.Г. та ін. Комплексування мультиспектральних зображень як метод підвищення їх інформативності при бінарній сегментації / *KPI Science News № 2*, 2020, стр. 82-87.
38. Gibb S., La H.M., Le T. et al. Nondestructive evaluation sensor fusion with autonomous robotic system for civil infrastructure inspection. *J. Field Robot*, 2018 35, 988–1004.
39. Habib A. et al. Review of Non-Destructive Civil Infrastructure Evaluation for Bridges: State-of-the-Art Robotic Platforms, Sensors and Algorithms. *Sensors*, 2020, 3954, doi:10.3390/s20143954.

Protasov A.G., Storozhyk D.V. AUTOMATION TECHNOLOGIES OF ROAD SURFACE DIAGNOSTICS

Roads are the main transport system in any country, and in Ukraine they make up 169.5 thousand km, which is the largest object of critical infrastructure. Given that road surfaces are prone to wear and aging, effective and timely assessment of their condition becomes crucial to ensure the safety of the transportation system and to reduce excessive repair and maintenance costs. Therefore, the main idea of this work was the analysis of automated technologies for detecting and classifying road surface damage and determining the direction of further development of these technologies.

The article considers the use of some methods of non-destructive testing for automated detection and classification of road surface damage, their advantages and disadvantages are analyzed. Many researchers have used image processing techniques to automate the examination process and improve the quality and accuracy of examination results. Today, with the development of the theory and practical application of neural networks, there is a tendency to combine control methods with neural networks, which makes it possible to use modern machine learning methods to automate data processing and digitization. The next trend observed in the direction of automation of road surface condition monitoring is the development of multi-sensor robotic systems. The use of such systems allows for autonomous data collection and enables data analysis in almost real time. The article describes some of the latest developments in the field of autonomous robotic platforms for non-destructive inspection and monitoring of the condition of roads and bridge structures.

Key words: *image processing automation, non-destructive testing, road surface monitoring.*