

Покращення метрологічної ефективності оптичних вимірювань розміру тріщин у висотних бетонних будівлях за допомогою безпілотних літальних апаратів

Вашипанов Юрій Олександрович

доктор фізико-математичних наук, професор

Одеська державна академія будівництва і архітектури, Україна

Чон-Йонг Сон, проф., Університет Коньянг, Республіка Корея

e-mail: yuriy.vashpanov@gmail.com

Анотація

Безконтактні оптичні методи вимірювання тріщин у бетоні малого розміру (менше 3 мм) для дистанційної діагностики важкодоступних поверхонь будівель за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА) розвиваються в цій статті. Цифрова камера з високою роздільною здатністю знімає бетонну поверхню зблизка за умов високої інтенсивності освітлення. Спеціальний контактний посадковий модуль БПЛА дозволив зафіксувати відстань між камерою та бетонною поверхнею, що фотографується. Це дозволило досягти лабораторних умов зйомки та підвищило точність вимірювань. Цифрове зображення тріщини перетворюється програмою Origin Lab в матрицю даних, кожен елемент якої містить інформацію про рівень відбитого світла від поверхні бетону та тріщини. Використовуючи отримані нами раніше формули, за допомогою комп'ютерної обробки зображення можна розрахувати морфологію тріщини в реальних геометричних розмірах. За допомогою спеціальних комп'ютерних інструментів геометричні параметри тріщини можна виміряти максимально точно. Похибка вимірювання довжини та ширини становить 0,026 мм. Запропонований дистанційний оптичний метод безконтактного виявлення тріщин у бетоні під час фотографування з близької відстані дозволяє досягти стандартної похибки вимірювання глибини близько 1,52 мм. Цей оптичний метод може бути корисним для діагностики стану початкових стадій руйнування висотних бетонних будівель, величезних дамб та мостів за нормальних погодних умов.

Ключові слова

Оптичні вимірювання, розмір тріщин у бетоні, лабораторні порівняння, контроль якості та метрологічна підтримка

1. Вступ

Наразі оптичні методи вимірювання дозволяють вивчати геометричні характеристики та якість поверхні деталей, створюючи тривимірні (3D) топографії та є надзвичайно ефективними та важливими для практичного використання [1]. Оптичні вимірювання мають першорядне значення в різних інтелектуальних виробництвах [2]. У цивільному будівництві тріщини в бетоні можуть призвести до аварій у будівельних конструкціях [3,4], тому потрібен постійний моніторинг для забезпечення громадської безпеки. Використання стандартних контактних методів діагностики бетонних конструкцій вимагає встановлення обладнання на їхню поверхню, що є трудомістким та дорогим [5]. Оптичні методи виявлення тріщин у бетонних конструкціях є найбільш доступними та вивченими в тепершній час (див., наприклад, [6,7]). Інспекція поверхні будівель за допомогою дрона (безпілотного літального апарату - БПЛА) є актуальною галуззю інженерії у зв'язку з розвитком технології БПЛА [8-12]. Ця інспекція особливо цінна для діагностики важкодоступних ділянок бетонних конструкцій, наприклад, для висотних бетонних будівель.

Раніше нами було запропоновано метод визначення глибини тріщини шляхом обробки зображень, отриманих на близькій відстані та при високій інтенсивності світла, шляхом математичної обробки інтенсивності пікселів зображення [13]. Метод підходить для точного визначення геометричних розмірів поверхонь з високим рівномірним розсіюванням світла. Бетонна поверхня має ці властивості. Бетонна поверхня дифузно відбиває світло [14] та має коефіцієнт відбиття (альbedo) порядку 36-69% [15]. Цей метод дозволяє за наявності високої інтенсивності світла та близької відстані до об'єкта дослідження отримати достатньо точні результати вимірювання геометричних розмірів (довжини, ширини та глибини) тріщин у бетоні. Однак застосування цього методу на значній відстані від камери до об'єкта дослідження обмежене.

Особливістю фотографічного зображення бетонної поверхні є те, що відбиті світлові промені від елементів поверхні збираються об'єктивом у зображення. При використанні цифрових камер використовується матриця фотодетекторів, які формують пікселі зображення. Інтенсивність світла, зареєстрована кожним пікселем

зображення, відповідає інтенсивності відбитого випромінювання певних ділянок реальної поверхні. За наявності тріщини в бетоні виникає різкий контраст відбитого світла. Тому за їх зображеннями можна описати реальну поверхню матеріалу.

У [13] було проведено лабораторні дослідження тріщин у бетоні. Усі фотографічні параметри можна було контролювати з максимальною можливою точністю. Основною проблемою використання цього методу є точний контроль відстані між камерою та бетонною поверхнею під час позиціонування дрона. У цій статті ми пропонуємо використовувати цей метод для діагностики бетонних поверхонь за допомогою стикувальних пристроїв із заданою відстанню між камерою та поверхнею.

2. Недоліки

Раніше нами в [16] було запропоновано метод використання дронів для виявлення бетону у великих будівлях та спорудах. Цифрова камера високої роздільної здатності на дроні робить крупні плани, віддалені фотографії бетонної поверхні за високої інтенсивності освітлення. За допомогою спеціальних комп'ютерних програм геометричні параметри тріщини можна виміряти з максимальною точністю. Однак цей метод вимагає точного позиціонування дрона поблизу бетонної поверхні, чого важко досягти у вітряних умовах. Точне вимірювання відстані між об'єктивом камери та поверхнею є критично важливим для максимальної точності вимірювання.

3. Мета

Метою цього дослідження є покращення метрологічної ефективності оптичних вимірювань розміру тріщин у бетонних будівлях за допомогою безпілотних літальних апаратів. У цій роботі ми пропонуємо використовувати цей метод для діагностики бетонних поверхонь за допомогою стикувальних пристроїв із заданою відстанню між камерою та поверхнею.

4. Експериментальна установка для візуалізації тріщин на бетонних поверхнях за допомогою БПЛА

Ми використовували добре розроблені технології машинного зору від USA National Instrument ((NI), які мають спеціалізовані інструменти та обладнання для комп'ютерної обробки зображень [17]. Оскільки математична обробка зображень за нашим методом [18] вимагає достатньо потужного комп'ютера з встановленим NI LabView, БПЛА може зберігати зображення високої роздільної здатності у своїй пам'яті. Математична обробка даних вимагає потужного процесора та часу і можлива після повернення БПЛА. Робота БПЛА та технологія оптичних вимірювань детальніше описані в [16].

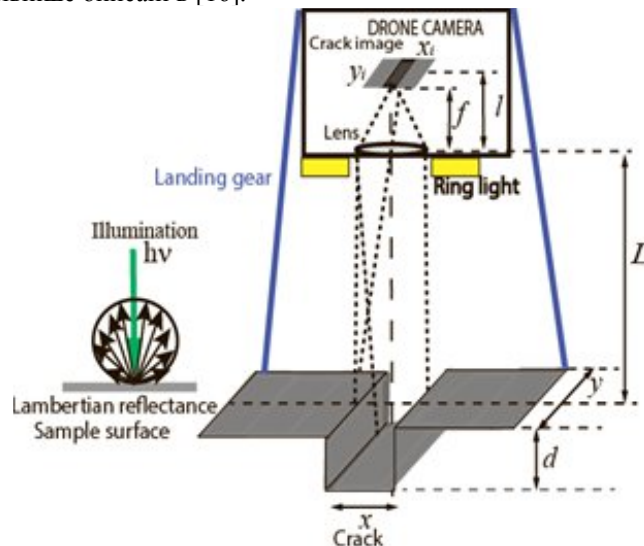


Рис. 1. Оптична схема отримання зображення тріщини в бетоні за допомогою механізму стикування БПЛА до поверхні стіни.

На рисунку 1 показано оптичну схему отримання зображення дрібних тріщин у бетоні для максимально близької відстані при високій інтенсивності освітлення з використанням штатива-механізму для стикування (посадки) дрона до поверхні стіни. Стикувальний пристрій має рівноплечий штатив, що забезпечує правильне позиціонування камери лише на рівній поверхні бетонної стіни будівель. Висотні бетонні будівлі мають саме таку поверхню. У цьому випадку положення камери на дроні буде суворо перпендикулярним до бетонної поверхні. Камера оснащена високо інтенсивним (освітленість 25 кЛк на фіксованій відстані L) кільцевим LED джерелом світла. Освітленість бетонної поверхні від світлодіодних кільцевих ламп вимірюється вимірювачем освітленості T10 від Konica Minolta Sensing Inc. Важливо проводити вимірювання в умовах значно нижчої освітленості сонячним світлом. Параметри освітлення бетонної поверхні також відповідають лабораторним

значенням. Отже, відстань між камерою та поверхнею буде дорівнювати заданому значенню L , а результати оптичних вимірювань близькі до лабораторних налаштувань параметрів фотографування та можуть бути максимально точними. Типове 16-бітне зображення бетонної поверхні з тріщиною, отримане за допомогою камери з роздільною здатністю 3280×2464 пікселів та розміром пікселя $1.12 \mu\text{m} \times 1.12 \mu\text{m}$ показано на рисунку 2. Фокусна відстань камери становила 3,6 мм.

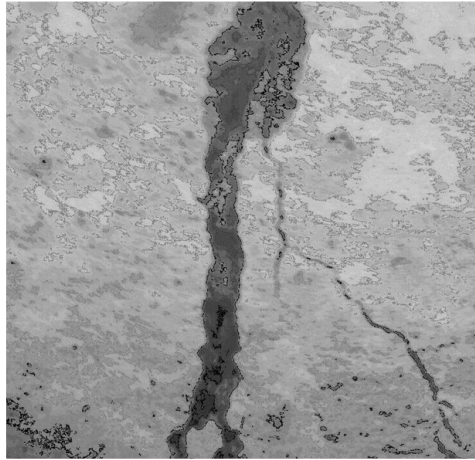


Рис. 2. Типове 16-бітне зображення бетонної поверхні з тріщиною, отримане за допомогою камери, має роздільну здатність 3280×2464 пікселів з розміром пікселя $1.12 \mu\text{m} \times 1.12 \mu\text{m}$

5. Обробка зображень для визначення ширини, довжини та глибини тріщини

Цифрові зображення тріщин були перетворені в набір даних, кожен елемент якого містить інформацію про рівень відбитого світла від поверхні бетону та тріщин. У роботі [13] отримано формули для визначення ширини, довжини та глибини тріщини.: $x = x_i \frac{L - f}{f}$; $y = y_i \frac{L - f}{f}$; $d @ \left(\frac{1}{\sqrt[4]{x}} - 1 \right)$, де $z = L/f$, L – відстань між об'єктивом камери та бетонною поверхнею, f – фокусна відстань камери. Ці формули необхідно перетворити на дискретну форму. Дані пікселів цифрового зображення були перетворені на реальні геометричні параметри (ширину та довжину) за формулами: $x_i = n_i d(z - 1)$, $y_j = n_j d(z - 1)$, де d розмір пікселя камери, i і j – кількість пікселів по ширині та довжині зображення, захопленого камерою (рис. 2). Для отримання даних про глибину тріщини матрицю даних було перераховано за формулою: $d_{i,j} @ \left(1 / \sqrt[4]{x_{i,j}} - 1 \right)$, де $x_{i,j} = I_d^{i,j} / I_s$, I_s і $I_d^{i,j}$ – експериментальні значення інтенсивності світла з непошкодженої бетонної поверхні та з різної глибини тріщини.

	729	730	731	732	733
71	47005	46177	46453	47005	47283
72	47283	47283	47283	47283	47283
73	47727	48281	48003	46895	46895
74	48559	49115	48559	47449	47173
75	49395	49115	48837	48559	48559
76	49395	48559	48281	49115	49395
77	49041	48763	49041	49319	49319
78	49319	49319	49319	49599	49599
79	49599	49599	49599	49599	49599
80	49041	49041	49319	49599	49599
81	49041	49041	49041	49599	50157
82	49319	49319	49319	49599	50157
83	49319	49599	49599	49599	49599
84	49319	49877	49877	49041	48763
85	49599	49599	49599	48763	48207
86	48763	49041	49599	49599	49319
87	49041	48763	48763	48763	49041
88	49041	48485	48207	47929	47929
89	48207	47929	48207	48485	48485
90	48207	47929	48207	48485	48763
91	48763	47929	47651	48207	48763
92	47929	47375	47651	49041	49599
93	47375	47375	47929	48763	48763
94	48207	47651	47929	48485	47929
95	48485	47651	47651	47929	47097
96	47651	46821	47097	47375	46821
97	47375	46545	46545	47097	46545
98	47375	46821	46545	46545	45993
99	47375	47097	46821	46545	45993
100	47097	47097	47097	46269	45993
101	47619	46789	46513	46513	46789
102	47619	47065	46789	46513	46513
103	47619	47619	47343	47343	46789
104	46789	47343	47897	48175	47343
105	46567	46513	47897	48453	47897

a)

	A(X1)	B(Y1)	C(Z1)	D(X2)	E(Y2)	F(Z2)
Long Name				x	y	d
Units				mm	mm	mm
Comments						
F(x)				A*0.026	B*0.026	(52685/C)*0
473473	293	1156	41023	7.618	30.056	8.39113
473474	293	1157	41023	7.618	30.082	8.39113
473475	293	1158	40215	7.618	30.108	9.08109
473476	293	1159	39139	7.618	30.134	10.02728
473477	293	1160	38335	7.618	30.16	10.75578
473478	293	1161	38069	7.618	30.186	11.00101
473479	293	1162	38719	7.618	30.212	10.40548
473480	293	1163	39523	7.618	30.238	9.68592
473481	293	1164	38855	7.618	30.264	10.28246
473482	293	1165	39123	7.618	30.29	10.0416
473483	293	1166	39123	7.618	30.316	10.0416
473484	293	1167	38855	7.618	30.342	10.28246
473485	293	1168	38451	7.618	30.368	10.6495
473486	293	1169	38451	7.618	30.394	10.6495
473487	293	1170	38881	7.618	30.42	10.259
473488	293	1171	39151	7.618	30.446	10.01655
473489	293	1172	38269	7.618	30.472	10.81643
473490	293	1173	38803	7.618	30.498	10.32943
473491	293	1174	39121	7.618	30.524	10.04339
473492	293	1175	39387	7.618	30.55	9.80634
473493	293	1176	39657	7.618	30.576	9.56777
473494	293	1177	40195	7.618	30.602	9.09839
473495	293	1178	39925	7.618	30.628	9.33296
473496	293	1179	39121	7.618	30.654	10.04339
473497	293	1180	38851	7.618	30.68	10.28607
473498	293	1181	39657	7.618	30.706	9.56777
473499	293	1182	39955	7.618	30.732	9.3068
473500	293	1183	39955	7.618	30.758	9.3068
473501	293	1184	39687	7.618	30.784	9.54139
473502	293	1185	39687	7.618	30.81	9.54139
473503	293	1186	39417	7.618	30.836	9.77973

b)

Рис. 3. Алгоритм перетворення 16-бітної матриці зображення (а) в таблицю даних (б) з подальшим розрахунком фактичних геометричних розмірів тріщини в програмі OriginLab

Реальні координати x , y та значення глибини тріщини d з даних зображення обчислюються за формулами (1) та (2). Алгоритм перетворення 16-бітної матриці зображення (а) у таблицю даних (б) з подальшим обчисленням фактичних геометричних розмірів тріщини в програмі OriginLab показано на рисунку 3. Таким чином, можна реалізувати оптичні вимірювання геометричних розмірів тріщин у бетоні. Похибка вимірювання довжини та ширини становить 0,026 мм. Точність вимірювання ширини та довжини тріщини повинна залежати від роздільної здатності камери. Більш точні результати можна отримати, зменшуючи розміри пікселів та збільшуючи їх кількість. У нашому випадку стандартна похибка вимірювання глибини становить близько 1,52 мм. Точність вимірювання глибини залежить від динамічного діапазону камери. Доцільно також використовувати технологію HDR (High Dynamic Range). Швидкий розвиток нанотехнологій значно збільшить роздільну здатність камер, що дозволить у майбутньому точніше вимірювати параметри тріщин у бетоні. На рисунку 4 показано типовий 3D-графік тріщини в бетоні з перерахованими даними для реальних геометричних параметрів у програмі OriginLab (USA). Візуалізація тріщини в реальних геометричних розмірах важлива для аналізу формування та зростання тріщини з часом. Кілька фотографій тріщин, зроблених з дрона в різні моменти часу, дозволяють контролювати прогрес деградації у важкодоступних місцях бетонних конструкцій (особливо у висотних будівлях). Це особливо актуально для застосувань безпеки в цивільному будівництві.

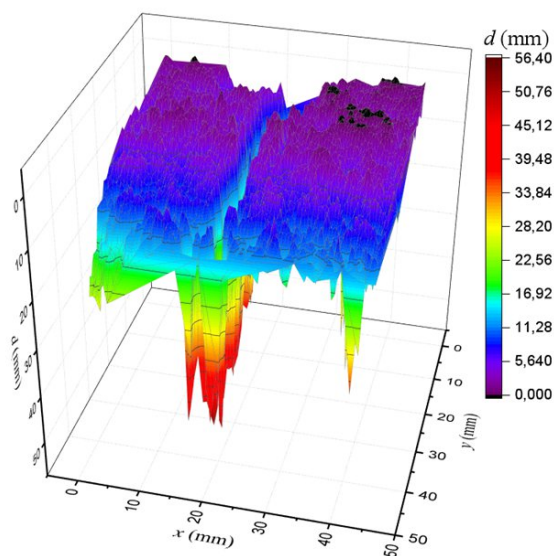


Рис. 4. Типова 3D-морфологія тріщини в бетоні з перерахованими даними для реальних геометричних параметрів в програмі OriginLab

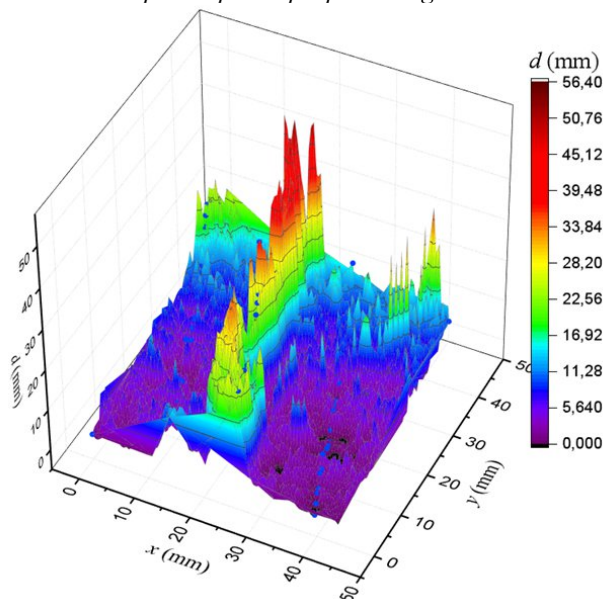


Рис. 5. 3D-графік інвертованої тріщини в бетоні з перерахованими даними для реальних геометричних параметрів в програмі OriginLab

Програма OriginLab дозволяє отримати інвертований 3D-графік тріщини, що важливо для аналізу морфології утворення таких дефектів у бетоні під навантаженням. На рисунку 5 показано інвертований 3D-графік тріщини

в бетоні з перерахованими даними для реального геометричного параметра в програмі OriginLab. Вперше можна візуалізувати дно тріщини. Використовуючи дані на рисунку 5, легко визначити глибину найглибших тріщин, що пришвидшує аналіз механізмів утворення тріщин у бетоні. Такі дані є особливо цінними для дослідження процесів руйнування бетонних конструкцій [19-22].

На рисунку 6 показано профіль зображення з перерахованими даними для реального геометричного параметра тріщини в бетоні за допомогою програми OriginLab. Комп'ютерні засоби дозволяють отримати статистичну інформацію про характер пошкодження бетону в будь-якому перерізі. Профілі даних зображень (рисунок 6) дозволяють знайти геометричний розмір тріщини в площині ху, тобто реальні видимі розміри тріщин на поверхні бетонної конструкції. У цьому випадку можна отримати профілі як по вертикальній, горизонтальній осях, так і по похилій (розподіл угорі праворуч)

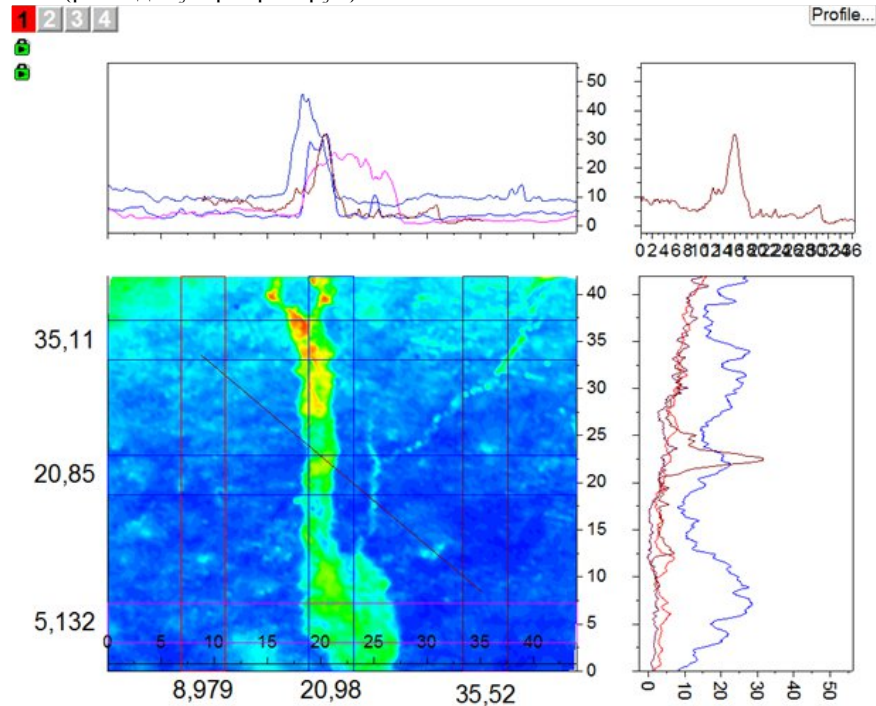


Рис. 6. Аналіз профілів глибини тріщин за допомогою програмного забезпечення OriginLab

Важливо отримувати фактичні геометричні розміри тріщин у бетоні в режимі реального часу. Передача зображення у вигляді великої кількості даних на настільний комп'ютер для розрахунку геометричних розмірів тріщин у бетоні за допомогою нашого методу можлива завдяки розвитку технології 6G для бездротового зв'язку. Такі дослідження можуть бути предметом майбутніх досліджень.

5. Висновки

Дистанційні оптичні вимірювання за допомогою БПЛА з встановленою камерою високої роздільної здатності можуть бути ефективно використані для моніторингу стану бетонних конструкцій у важкодоступних місцях та дозволяють отримувати високоякісні зображення пошкодженої поверхні бетону з близької відстані. У цьому випадку використання комп'ютерної обробки зображень за методом, запропонованим у [13], дозволяє розрахувати геометричні розміри тріщин у бетоні для оцінки критичного стану конструкції. Використання новітніх мегапіксельних камер з вищою роздільною здатністю та вдосконаленою оптикою може підвищити точність вимірювань. Однак збільшення розміру зображення призводить до проблем з комп'ютерною обробкою великих даних. Подальший розвиток цього оптичного методу буде пов'язаний з розробкою нового програмного та апаратного забезпечення. Також розроблено апаратне забезпечення National Instrument та програмні модулі Origen Lab для геометричного методу визначення тріщин у будівельних конструкціях та для керування та зв'язку дронами. Використання новітніх оптичних матриць з високою роздільною здатністю та спеціальних лінз дозволяє підвищити метрологічну точність вимірювань геометричних параметрів тріщин у бетоні. Важливо також відзначити можливість отримання інвертованого зображення порожнини тріщини, що дозволяє детальніше вивчити її морфологію..

Запропонований оптичний метод призначений для максимально точного вимірювання тріщин малого розміру в бетоні (початкові стадії руйнування бетону), моніторинг яких важливий для завдань громадської безпеки. Метод не застосовується в умовах сильного туману, проливної дощі, штормового вітру, налипання снігу на бетонну поверхню, високих температур (пожежа в будівлі) тощо. Руйнування бетонної конструкції внаслідок утворення та зростання тріщин – це досить тривалий процес. Для безперервного моніторингу стану висотної будівлі за допомогою цього оптичного методу підходять комфортні ідентичні умови навколишнього середовища.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає жодних фінансових чи інших потенційних конфліктів щодо цієї роботи.

Список літератури

- [1] Fanwei Jiao, Lei Liu, Weisheng Cheng, Chen Li, Xiaodong Zhang “Review of optical measurement techniques for measuring three-dimensional topography of inner-wall-shaped parts”, *Measurement*, Volume 202, 111794, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111794>.
- [2] X.L. Jing, Q.M. Liao, M.S. Liang “Three-dimensional measurement enabled by single-layer all-in-one transmitting-receiving optical metasystem”, *Opto-Electron Adv*, 8, 240299, 2025. <https://doi.org/10.29026/oea.2025.240299>.
- [3] Grzegorz Ludwik Golewski “The Phenomenon of Cracking in Cement Concretes and Reinforced Concrete Structures: The Mechanism of Cracks Formation, Causes of Their Initiation, Types and Places of Occurrence, and Methods of Detection. A Review”. *Buildings*, 13(3), 765, 2023. <https://doi.org/10.3390/buildings13030765>.
- [4] Nicola Giulietti, Gian Marco Revel, Paolo Chiariotti “Automated vision-based concrete crack measurement system”, *Measurement* Volume 242, Part A, 115858, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115858>.
- [5] J. Deng, A. Singh, Y.Zhou, Y.Lu, V.C.-S.Lee “Review on computer vision-based crack detection and quantification methodologies for civil structures”, *Constr. Build. Mater.*, 356 Article 129238, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129238>.
- [6] Mingyang Ren, Yancheng Li, Tasneem Hussain, Yingjie Wu, Jianchun Li “Pixel-level concrete crack quantification through super resolution reconstruction and multi-modality fusion” *Advanced Engineering Informatics*, Volume 69, Part A, 103807, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2025.103807>.
- [7] Y. Wu, S. Li, J. Li, Y. Yu, J. Li, Y. Li “Deep learning in crack detection: A comprehensive scient metric review”, *J. Infrastruct. Intell. Resil.*, 4, Article 100144, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.iintel.2025.100144>.
- [8] Yue Pan, Linfeng Li, Jianjun Qin, Jin-Jian Chen, Paolo Gardoni “Unmanned aerial vehicle–human collaboration route planning for intelligent infrastructure inspection”, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 1–31, 2024. <https://doi.org/10.1111/mice.13176>.
- [9] Xiao Pan, Sina Tavasoli, T. Yang “Autonomous 3D vision-based bolt loosening assessment using micro aerial vehicles”, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 38, 17, 2443–2454, 2023. <https://doi.org/10.1111/mice.13023>.
- [10] Sina Tavasoli, Xiao Pan, T.Y. Yang “Real-time autonomous indoor navigation and vision-based damage assessment of reinforced concrete structures using low-cost nano aerial vehicles”, *Journal of Building Engineering* 68(4):106193, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106193>.
- [11] Yi Tan, Silin Li, Hailong Liu, Penglu Chen, Zhixiang Zhou “Automatic inspection data collection of building surface based on BIM and UAV”, *Automation in Construction* 131, 103881, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103881>.
- [12] Nur'Ain Idris, Masiri Kaamin, Abdsukor bin Sarif, Muhammad Shahruikram “High-Rise Building Inspection by Using Unmanned Aerial Vehicles”, *Construction Technologies and Architecture*, 4:195–209, 2023. <https://doi.org/10.4028/p-dcbmba>.
- [13] Yuriy Vashpanov, Jung-Young Son, Gwanghee Heo, Tatyana Podousova, and Yong Suk Kim “Determination of Geometric Parameters of Cracks in Concrete by Image Processing” *Advances in Civil Engineering*, Article ID 2398124, 14 pages, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/2398124>.
- [14] Albedo: a measure of pavement surface reflectance. *American Concrete Pavement Association*, Rosemont, IL. 2002. www.acpa.org/. Ryer Alex. *Light Measurement Handbook*, 1998. ISBN 0-9658356-9-3, <http://www.intl-light.com>.
- [15] R. Levinson, and H. Akbari “Effects of composition and exposure on the solar reflectance of Portland cement concrete”, *Cement and Concrete Research*, 32(11), 1679–1698, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00835-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00835-9).
- [16] Y. Vashpanov, G. Heo, J.-Y. Son and T. Podousova “Remote optical measurements of cracks in concrete structures using computer image processing” *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 1141 012028, 2021. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1141/1/012028>.
- [17] National Instrument Corporation (USA). Available from: https://www.ni.com/en-us/shop/category/machine-vision.html?srltid=AfmBOorbrlafxILV-qmQPDMoOu8qxlGPF7MAymPI0TgLz_IRohw6ErNz.
- [18] AR Drone Toolkit for LabVIEW–LVH. https://www.ni.com/en/support/downloads/tools-network/download.ar-drone-toolkit.html?srltid=AfmBOoo4zY0cPLP0BsbCFSSCrFay2RX-u-qP9fEq807SZbO1Euy1Qj0_#374293.
- [19] Valerii Makarenko, Volodymyr Hots, Alla Maistrenko, Volodymyr Azutov, and Olena Chyhyrynets “Features of reinforced concrete corrosion processes in aggressive environments and methods of corrosion protection of building structures” *Strength of Materials and Theory of Structures*, No. 114, 2025. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2025.114.255-264>.
- [20] Jinghua Zhang, Lisha Peng, Shuzhi Wen and Songling Huang “A Review on Concrete Structural Properties and Damage Evolution Monitoring Techniques”, *Sensors*, 24(2), 620, 2024. <https://doi.org/10.3390/s24020620>.
- [21] J. Luchko, B. Nazarevich, V. Kovalchuk “Degradating concrete and reinforced concrete building structures and long-term structures”, *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, no. 86, page 35–46, 2022. <https://doi.org/10.31650/2415-377X-2022-86-35-46>.
- [22] Janusz Krentowski “Assessment of Destructive Impact of Different Factors on Concrete Structures Durability”, *Materials* 15(1), 225, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15010225>.

ISSN: 2617-846X (online)

Вашпанов Юрій Олександрович

Номер ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0199-613X>

Чон-Йонг Сон

Номер ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6099-0577>

Дата отримання статті -27.09.25.

Дата отримання фінального варіанту статті – 06.11.25.

Дата публікації- 30.12.25.