

ОПТИМІЗАЦІЙНИЙ МЕТОД СЕГМЕНТАЦІЇ КОМПОНЕНТ БЕТОНУ ЗА ЦИФРОВИМИ ЗОБРАЖЕННЯМИ ЗРІЗІВ ТЕСТОВИХ ЗРАЗКІВ

Т. С. Мандзій¹, І. Б. Івасенко^{1,2}, О. Р. Берегуляк¹, Р. А. Воробель¹,
О. П. Максименко¹, Я. Л. Іваницький¹

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

² Національний університет “Львівська політехніка”, Львів

E-mail: roman.vorobel@gmail.com, olena.berehulyak@gmail.com,
ivasenko.iryana@gmail.com, teodor.mandziy@gmail.com

Розглянуто застосування оптимізаційного методу сегментації зображень для оцінки відсоткового вмісту компонент бетону. Розроблено метод сегментації кольорових зображень зрізів тестових зразків бетону на основі методу суміші гауссіанів та моделі рівнів. Налаштовано параметри моделі сегментації. Проаналізовано експериментальні результати сегментації кольорових зображень зрізів тестових зразків бетону запропонованим методом.

Ключові слова: компоненти бетону, міцність бетону, сегментація зображень, оброблення зображень, метод рівнів.

OPTIMIZATION METHOD FOR SEGMENTATION OF CONCRETE COMPONENTS IN DIGITAL IMAGES OF TEST SAMPLE SECTIONS

T. S. Mandziy¹, I. B. Ivasenko^{1,2}, O. R. Berehulyak¹, R. A. Vorobel¹,
O. P. Maksymenko¹, Y. L. Ivanytskyi¹

¹ H. V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv;

² Lviv Polytechnic National University, Lviv

The application of optimization method of image segmentation to estimate the percentage content of concrete components is considered. Non-destructive testing methods (ultrasonic, magnetic, radiographic, image processing) are actively used to assess the condition of concrete structures and structures of long-term use. Recently, the share of studies of the mechanical properties of concrete based on the processing of images of sections of its samples has increased significantly. The relationship between the parameters obtained by digital image processing methods and the compressive strength of concrete is established on the basis of regression analysis. A method of segmentation of color images of test sample sections of concrete based on the Gaussian mixture method and level-sets model is developed. Based on the analysis of the differences in the color characteristics of the background and the object, it is concluded that they can be divided into two classes in the RGB color space. For this purpose appropriate training samples are created, which contain image pixel samples with typical features of the respective classes. The training sample consists of a set of feature vectors of image pixels. The parameters of the segmentation model have been adjusted. The experimental results of the segmentation of color images of sections of test concrete samples by the proposed method are presented. An analysis of the obtained results are analyzed.

Keywords: concrete components, concrete strength, image segmentation, image processing, level-sets.

Вступ. Бетон є багатофункціональним та довговічним штучним будівельним матеріалом, який складається з таких основних компонент, як цемент, пісок, заповнювач та вода. Другорядними необов'язковими його складниками залежно від галузі використання і потрібних технічних параметрів також можуть бути стабілізатори, гідрофобізатори, пластифікатори тощо. Пропорції компонент бетону визначають марку та клас бетонної суміші.

© Т. С. Мандзій, І. Б. Івасенко, О. Р. Берегуляк, Р. А. Воробель,
О. П. Максименко, Я. Л. Іваницький, 2022

Крупним заповнювачем у бетоні (розмір > 5 мм) є щебінь та гравій з гірських та пористих (для легких бетонів) порід. Саме крупний заповнювач слугує базою творення каркаса бетону і визначає його здатність витримувати навантаження під час експлуатації. Нестача крупного заповнювача призводить до зменшення міцності виробу, надлишок – до нерівномірності поверхні та граней виробу, що збільшує ризики сколу під час використання. Для отримання бетону високої міцності масова частка крупного заповнювача твердих порід повинна становити не менше 50–60%.

Тому важливо оцінювати відсотковий склад бетону, зокрема крупного заповнювача, за зображенням зрізу його зразків як основу визначення міцності бетону в цілому.

Сучасний стан оцінювання міцності зразків бетону методами цифрової обробки зображень. Методи неруйнівного контролю (ультразвукові, магнетні, радіографічні, методи опрацювання зображень) активно використовують для оцінювання стану бетонних споруд та конструкцій тривалої експлуатації. Останнім часом суттєво збільшилася частка досліджень механічних властивостей бетону на основі опрацювання зображень зрізів його зразків. На основі регресійного аналізу встановлено зв'язок між параметрами, отриманими методами цифрової обробки зображень, та міцністю бетону на стиск [1]. Такі методи дають змогу оцінити характеристики бетону, базуючись на емпіричних знаннях та попередніх результатах, отриманих у лабораторних умовах.

Раніше використовували [2] п'ять різних параметрів (співвідношення води та цементу, міцність, кількість цементу, стиск та добавки) для 96 циліндричних зразків бетону. Процедури навчання та тестування для штучних нейронних мереж та обробки зображень реалізовані з використанням отриманих показників стиску в лабораторії. Продемонстрували високу кореляцію між результатами штучних нейронних мереж та додатковою обробкою зображень і фактичними результатами, яка коливається від 97,18 до 99,87%. Використання штучних нейронних мереж та обробки зображень разом є хорошою альтернативою традиційним руйнівним і неруйнівним методам, які зараз застосовують для визначення механічних властивостей бетону.

Для прогнозування міцності цементу на стиск за напівтоновим зображенням застосовували матрицю спільної появи [3], а також регресію гауссівського процесу [4]. Методи сегментації зображень використовують для оцінки складу бетону, а саме: гранітні вclusions, повітряні пори тощо [5–15].

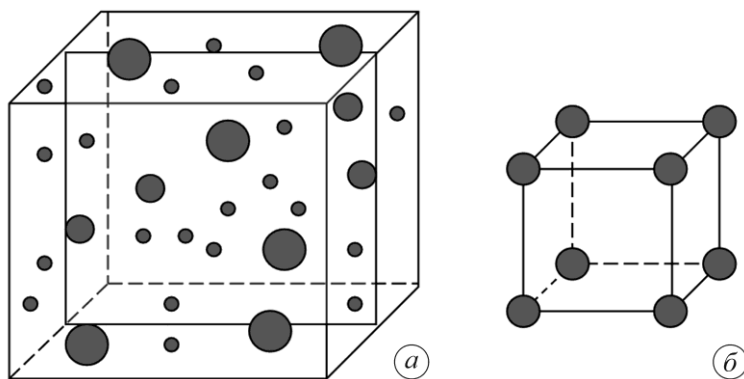


Рис. 1. Різниця між фактичним розподілом повітряних пор (а) і розподілом за моделлю Пауерса (б).

Методи підвищення контрасту зображень поверхні бетону описані в європейському стандарті EN480-11 [16], а також структура пор у бетоні, за допомогою

таких параметрів: загальний вміст повітря, питома поверхня, коефіцієнт інтервалу і вміст мікропор. Ці характеристики розраховують на основі спрощеної моделі Пауерса [17], яка передбачає, що всі пори мають однаковий діаметр і розміщені по кутах куба (рис. 1).

Раніше використовували [18] цифрову камеру 12,2 мегапікселів і формували зображення розміром 4272×2848 пікселів у форматі RGB. Далі переводили зображення в напівтонове за формулою

$$Gr(x, y) = 0,299R(x, y) + 0,587G(x, y) + 0,114B(x, y), \quad (1)$$

де R, G, B – це червона, зелена і синя кольорні складові, відповідно; x, y – координати пікселів зображення, та формували бінарне зображення за виразом

$$BW(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{if } Gr(x, y) < 64, \\ 1 & \text{if } Gr(x, y) \geq 64. \end{cases} \quad (2)$$

Поріг сегментації вибирали вручну для кожного зображення за його гистограмою. Під час аналізу [19] складу бетонної суміші використовували зображення комп'ютерної томографії. Аналізували за допомогою методів цифрової обробки зображень. Для заповнювачів, цементних матеріалів і повітряних пор знайшли порогові діапазони.

У праці [20] дослідили систему пор бетону на основі стереологічної моделі, яка імітує перетин 3D повітряної пори на поверхні полірованого бетону. Результати підкреслюють, що для розгортання пор логарифмічна схема розбивання набагато точніша, ніж лінійна. Низька похибка розгортання зразків бетону вказує на те, що запропонована методологія дає змогу точніше відновити тривимірний розподіл розмірів пор.

Поліпшення якості зображень, виділення характерних областей (частинки гравію, повітряні пори), усунення шуму, підвищення різкості зображення розглядали у проаналізованих працях. Їх огляд засвідчує необхідність розроблення заводських методів опрацювання зображень зрізів зразків бетону. Перспективними напрямками є застосування нечіткої логіки, нейронних мереж та використання матриці спільної появи для оцінки відсоткового складу бетону за зображеннями його зрізів та встановлення кореляційних зв'язків з параметрами міцності.

Підготовка для випробувань тестових зразків різних марок бетонів. Визначення міцності бетону на стиск за зображеннями поверхні зрізів його зразків вимагає відповідної їх підготовки. Зразок бетону має вигляд куба з ребром 10 см (рис. 2а). Для отримання достовірного співвідношення компонент бетону за зображеннями поверхні зрізу зразок необхідно шліфувати. Статистика компонент бетону формується на основі аналізу вертикальних сторін зразків. На даному етапі підготували по три зразки бетону типу В10, В15 і В25.

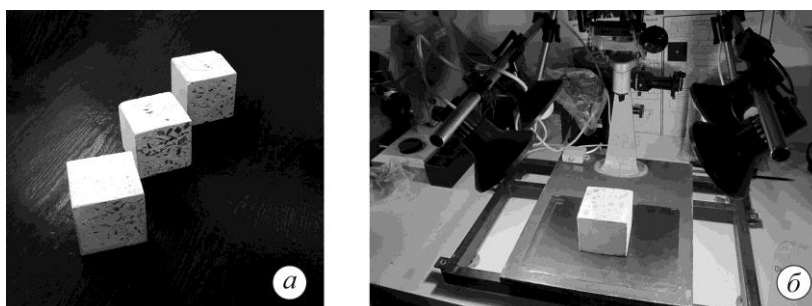


Рис. 2. Зображення тестових зразків бетонів (а) та лабораторної установки для фотографування їх зрізів (б).

Реєстрували зображення зрізів поверхонь бетонних зразків необхідної якості за допомогою спеціально зібраної лабораторної установки (рис. 2б), яка має відповідне кріплення для цифрової камери і дає змогу змінювати його висоту від верхні зразка. Також вона дає змогу фіксувати до 4-х освітлювальних приладів, положення яких стосовно зразка можна змінювати.

Для реєстрації серії зображень поверхонь зрізів тестових зразків бетонів використали цифровий фотоапарат NIKON D-7000.

Сегментація наповнювача на зображенні зрізу тестового бетонного зразка. Мета досліджень – розробити метод для оцінювання відсоткового складу бетону за цифровими зображеннями зрізу тестового бетонного зразка. Розглядатимемо сегментацію цементного каменю (фону) та наповнювача (об'єкта). Для цього формулюємо задачу двокласової сегментації зображення.

Згідно з аналізом відмінностей кольірних характеристик фону і об'єкта, зробили висновок про можливість їх розділення на два класи у кольірному просторі ознак RGB. Для цього створили відповідні навчальні вибірки, які містили ділянки зображень із характерними кольірними особливостями відповідних класів. Навчальна вибірка складається з набору векторів ознак пікселів зображення. За компоненти векторів ознак вибрали значення r , g і b у кольірному просторі RGB. Для математичної формалізації кольірних моделей використали модель суміші гауссіанів

$$p(y|\theta) = \sum_{k=1}^K w_k p(y|\mu_k, \Sigma_k), \quad (3)$$

де $\theta = (\{w_k\}_{k=1}^K, \{\mu_k\}_{k=1}^K, \{\Sigma_k\}_{k=1}^K)$, а μ_k , Σ_k і w_k – це середнє значення, коваріаційна матриця і ймовірність належності пікселя до підкласу k , відповідно; K – число компонент суміші,

$$p(y|\mu_k, \Sigma_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \det(\Sigma_k)}} \exp\left(-\frac{1}{2}(y-\mu_k)^T \Sigma_k^{-1}(y-\mu_k)\right), \quad (4)$$

де ймовірність w_k задовольняє співвідношення $\sum_{k=1}^K w_k = 1$ і $0 \leq w_k \leq 1$. Параметри

θ цих моделей оцінювали на основі сформованих навчальних вибірок за допомогою методу максимальної правдоподібності. Кількість гауссіанів K у суміші для кожного класу визначали емпірично.

Для безпосередньої сегментації зображення обрали оптимізаційну модель на основі методу рівнів. Оптимізаційний функціонал E складається з двох компонент

$$E = E_{data} + E_c, \quad (5)$$

де $E_{data} = \sum_{i=1}^2 \int_{\Omega} e_i M_i(x, y) dx dy$; $E_c = \mu \int_{\Omega} |\nabla H(\varphi)| dx dy$; $M_1(x, y) = H(\varphi)$; $M_2(x, y) =$

$= 1 - H(\varphi)$; $H(\cdot)$ – функція Хевісайда; φ – функція рівнів; $e_i = -\log(p_i)$, а p_1 і p_2 обчислюємо за співвідношенням (3) для фону та об'єкта, відповідно. Доданок E_{data} відображає подібність вхідного зображення до кольірних характеристик фону і об'єкта, поданого моделлю (3). Доданок E_c є регуляризуючим і накладає обмеження на довжину контуру, який розділяє два класи сегментів зображення. Ваговий коефіцієнт μ дає змогу впливати на гладкість контуру, що сприяє усуненню шумів (дрібних за площею сегментів).

Мінімізували функціонал (5) через розв'язок рівняння Ейлера–Лагранжа

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \mu \delta_\varepsilon(\varphi) \operatorname{div} \left(\frac{\nabla \varphi}{|\nabla \varphi|} \right) + \delta_\varepsilon(\varphi) (e_1 - e_2), \quad (6)$$

де $\delta_\varepsilon(\varphi) = \frac{1}{\pi} \frac{\varepsilon}{\varepsilon^2 + z^2}$ функція Дірака з регуляризацією, $\varepsilon \rightarrow 0$.

Сегментація зображення полягає в ітераційній еволюції функції φ співвідношенням (6) до досягнення збіжності. Критерієм збіжності є відсутність значних змін значень функції φ на поточній ітерації.

Експериментальні результати. Тут використали цифрові зображення шліфованих зрізів тестових зразків бетону без їх попередньої обробки (контрастування реагентами, барвниками).

Приклади застосування моделі (6) для сегментації цифрових зображень зрізів тестових зразків бетону показано на рис. 3.

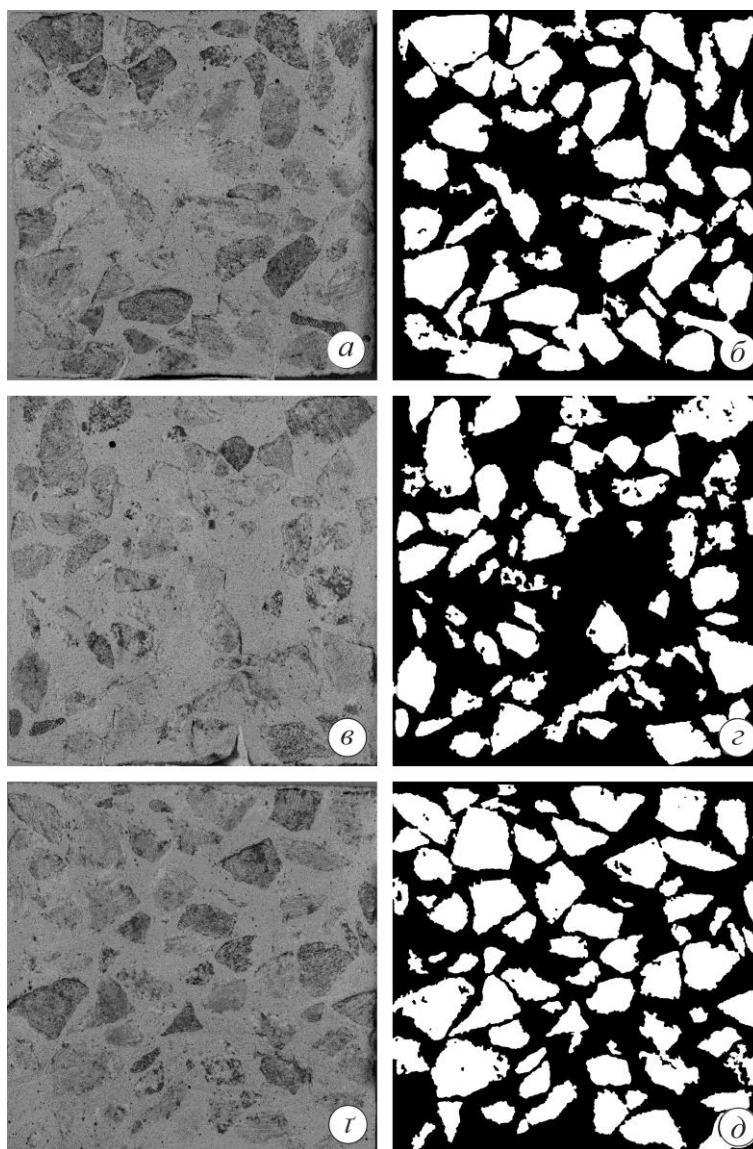


Рис. 3. Результати сегментації цементного каменю (фону) та наповнювача (об'єкта):
а, в, г – вхідні зображення; б, з, д – результат сегментації.

Результати сегментації отримали для таких параметрів: кількість компонент суміші гауссіанів для фону і об'єкта $K = 3$ та $K = 5$ відповідно, $\mu = 0,01$.

Неточності сегментації наповнювача здебільшого пов'язані з тим, що його колірні характеристики можуть частково збігатися з колірними характеристиками цементного каменю.

Результати оцінки відсоткового вмісту наповнювача бетону на основі сегментації цифрових зображень зрізів тестових зразків для різних марок бетону подано у таблиці.

Марка бетону	Середній відсоток вмісту наповнювача, %
B10	43
B15	47
B25	45

Результати свідчать про майже однаковий відсоток вмісту наповнювача у різних марках бетону досліджуваних зразків.

ВИСНОВКИ

Побудовано оптимізаційний метод сегментації кольорових зображень зрізів тестових зразків бетону на основі методу суміші гауссіанів та моделі множини рівнів, що дає змогу оцінювати відсотковий вміст його компонент (цементного каменю та наповнювача) у досліджуваному зразку за кольоровими зображеннями його зрізів. Отримані результати вказують на значну достовірність запропонованого підходу для оцінки відсоткового складу бетону на основі сегментації цифрових зображень. Мета подальших досліджень – розширити набір ознак для врахування текстурних особливостей цементного каменю та наповнювача, що може збільшити точність сегментації об'єктів інтересу.

Автори висловлюють вдячність директору НВО “СІКА Україна” О. В. Панченкові за надані зразки бетону.

1. Basyigit, C.; Comak, B.; Kilincarslan, S.; Uncu, I.S. Assessment of concrete compressive strength by image processing technique, *Construction and Building Materials*, **2012**, 37, 526–532. [10.1016/j.conbuildmat.2012.07.055](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.055). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.055>
2. Dogan, G.; Arslan, M.H.; Ceylan, M. Concrete compressive strength detection using image processing based new test method, *Measurement*, **2017**, 109, 137–148. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.05.051>
3. Meihui, L.; Bo, Y.; Lin, W.; Yu, L.; Xiuyang, Z.; Jin, Z.; Liangliang, Z. The prediction of cement compressive strength based on gray level images and neural network. 3rd International Conference on Informative and Cybernetics for Computational Social Systems (ICCSS), Jinzhou, China, 2016, pp. 103–108. doi: 10.1109/ICCSS.2016.7586432. <https://doi.org/10.1109/ICCSS.2016.7586432>
4. Dao, D.V.; Adeli, H.; Ly, H.-B.; Le, L.M.; Le, V.M.; Le, T.-T.; Pham, B.T. A Sensitivity and Robustness Analysis of GPR and ANN for High-Performance Concrete Compressive Strength Prediction Using a Monte Carlo Simulation. *Sustainability*, **2020**, 12, 830. <https://doi.org/10.3390/su12030830>
5. Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete, *ASTM International*, **2016**, 15.
6. Powers, T.C. The air requirement of frost resistant concrete, *Proceedings of the Highway Research Board*, **1949**, 29, 184–221.
7. Mehta, P.K.; Monteiro, P.J. M. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials, 4th Edition, McGraw-Hill Education, 2014.
8. Wolter, S.; Uhre, F.A.H.; Hasholt, M.T.; Dahl, V.A.; Anton, F. Air void analysis of hardened concrete by means of photogrammetry, *Construction and Building Material*, **2019**, 226, 953–964. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.203>
9. Toumi, B.; Resheidat, M. A simple and low cost method for rapid assessment of air voids in hardened concrete, *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, **2010**, 11(3), 335–343.

10. Warren, C. Determination of Properties of Air Voids in Concrete. Bulletin No. 70, Highway Research Board, Washington, DC, 1953, 1–10.
11. Wawrzeńczyka, J.; Kozaka, W. A method of analyzing the porous microstructure in air-entrained concrete on the basis on 2D image analysis, *Procedia Engineering*, **2015**, 108, 102–107. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.124>
12. Philleo, R.E. A Method for Analyzing Void Distribution In Air-Entrained Concrete, *CCA*, **1983**, 2, 128–130. <https://doi.org/10.1520/CCA10263J>
13. Schouenborg, B.; Lindqvist, J.; Sandström, M. Air and air void structures in concrete – general overview and picture atlas, Nordtest project 1121-93, *Engineering*, **1995**, 50.
14. Molendowska, A.; Wawrzeńczyk, J.; Kowalczyk, H. Development of the Measuring Techniques for Estimating the Air Void System Parameters in Concrete Using 2D Analysis Method, *Materials*, **2020**, 13, 428. <https://doi.org/10.3390/ma13020428>
15. Ojala, T.; Chen, Y.; Punkki, J.; Al-Neshawy, F. Characteristics of Entrained Air Voids in Hardened Concrete with the Method of Digital Image Analysis Coupled with Schwartz-Saltykov Conversion, *Materials*, **2021**, 14 (9), 2439. <https://doi.org/10.3390/ma14092439>
16. Admixtures for concrete, mortar and grout – Test methods – Part 11: Determination of air void characteristics in hardened concrete, Danish Standard, DS/EN 480-11, 1998.
17. Pigeon, M.; Pleau, R. Durability of concrete in cold climates, E&FN SPON, 1995.
18. Basyigit, C.; Comak, B.; Kilincarslan, S. Estimated the amount of air void in concrete using image processing technique, 2nd International Balkans Conference on Challenges, 2013, pp. 495–502.
19. Joshi, S.K. On application of image processing: study of digital image processing techniques for concrete mixture images and its composition, *International Journal of Engineering Research*, **2014**, 3(3), 1137–1146.
20. Song, Y.; Shen, C.; Damiani, R.M.; Lange, D.A. Image-based restoration of the concrete void system using 2D-to-3D unfolding technique, *Construction and Building Materials*, **2021**, 270, 121476. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121476>

Одержано 19.09.2022