

УДК 621.38:004.93

АДАПТИВНА КОМПЕНСАЦІЯ НЕРІВНОМІРНОСТІ ОСВІТЛЕННЯ ПРИ КОНТРОЛІ МЕТАЛЕВИХ ПОВЕРХОНЬ В СИСТЕМАХ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ

Патров Д.О., Стрілкова Т.О.

e-mail: denys.patrov@nure.ua, tetiana.strilkova@nure.ua

Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. МЕЕПШ
м. Харків, Україна

This work investigates the influence of illumination nonuniformity on the quality of machine vision inspection of metallic surfaces. Due to the reflective properties of metals, brightness variations and specular highlights significantly affect the reliability of defect detection algorithms. An adaptive illumination compensation method based on background estimation and brightness normalization is proposed. The approach improves the stability of defect detection under varying lighting conditions and enhances the visibility of low-contrast defects.

Системи технічного зору широко застосовуються у сучасному виробництві для автоматизованого контролю якості продукції, зокрема для аналізу стану металевих поверхонь [1-3]. Такі системи дозволяють здійснювати швидкий та об'єктивний контроль виробів у режимі реального часу, що особливо важливо для високопродуктивних виробничих ліній [4,5].

Однак ефективність алгоритмів обробки зображень значною мірою залежить від умов формування зображення, зокрема від рівномірності освітлення поверхні.

Металеві поверхні характеризуються складними оптичними властивостями, що зумовлено наявністю як дифузної, так і дзеркальної компонент відбиття світла. У результаті цього на зображеннях можуть виникати локальні пересвітки, градієнти яскравості, тіньові області та паразитні відблиски. Такі явища призводять до значної просторової модуляції інтенсивності сигналу та ускладнюють аналіз зображень, особливо у випадках виявлення малоконтрастних дефектів [1,6].

Крім того, нерівномірність освітлення може спричиняти зміну статистичних характеристик сигналу, що негативно впливає на стабільність алгоритмів сегментації та класифікації дефектів [1]. У сучасних системах технічного зору ця проблема вирішується шляхом застосування різноманітних методів попередньої обробки зображень, зокрема нормалізації яскравості, фільтрації та адаптивної компенсації освітлення [4,5]. Разом з тим, питання підвищення стійкості алгоритмів аналізу зображень до змін освітлення залишається актуальним, особливо для задач контролю металевих поверхонь [8].

Метою роботи є розробка адаптивного методу компенсації нерівномірності освітлення для підвищення стабільності та чутливості систем технічного зору при контролі металевих поверхонь.

Формування зображення у системі технічного зору можна описати узагальненою моделлю

$$I(x, y) = L(x, y)R(x, y) + n(x, y),$$

де $L(x, y)$ – функція освітленості,

$R(x, y)$ – коефіцієнт відбиття поверхні,

$n(x, y)$ – шумова складова, зумовлена фотонними та електронними шумами фотоприймального пристрою [6,7].

У реальних умовах нерівномірність освітлення має переважно низькочастотний характер і проявляється у вигляді плавних змін яскравості на зображенні. Така складова сигналу може значно спотворювати локальні контрастні характеристики об'єктів та ускладнювати виявлення дефектів.

З метою компенсації впливу освітлення у роботі запропоновано адаптивний метод оцінювання фонові складові сигналу. Для цього використовується згладжування зображення за допомогою гаусового фільтра, що дозволяє отримати оцінку локального рівня освітленості:

$$L_{est}(x, y) = G_{\sigma} * I(x, y),$$

де G_{σ} – гаусова функція згладжування.

Отримана оцінка освітленості використовується для нормалізації яскравості зображення. Для уникнення ділення на нуль у формулу вводиться мала стабілізуюча константа ε . Компенсоване зображення визначається як

$$I_c(x, y) = \frac{I(x, y)}{L_{est}(x, y) + \varepsilon}.$$

Такий підхід є аналогом методів гомоморфної фільтрації, що широко застосовуються для компенсації варіацій освітлення в задачах обробки зображень [4]. Він дозволяє зменшити вплив низькочастотної складові освітлення та підвищити відносний контраст локальних структурних елементів зображення.

Результати моделювання показали, що застосування адаптивної компенсації освітлення дозволяє суттєво зменшити варіації яскравості фону та підвищити локальний контраст дефектів. Крім того, нормалізація сигналу сприяє стабілізації його статистичних характеристик, що позитивно впливає на ефективність подальших алгоритмів аналізу зображень. Аналогічні підходи до обробки сигналів у системах технічного зору розглядаються у роботах [1, 4, 5].

У роботі проведено дослідження впливу нерівномірності освітлення на якість аналізу зображень металевих поверхонь у системах технічного зору. Запропоновано адаптивний метод компенсації освітлення, який базується на оцінюванні фонові складової сигналу та нормалізації яскравості зображення.

Показано, що використання такого підходу дозволяє зменшити вплив низькочастотних варіацій освітлення, стабілізувати статистичні характеристики сигналу та підвищити контрастність малорозмірних дефектів. Це сприяє підвищенню достовірності автоматизованого контролю якості металевих поверхонь.

Запропонований метод може бути інтегрований у системи технічного зору промислового призначення та використаний як етап попередньої обробки зображень перед виконанням процедур сегментації та класифікації дефектів.

Список використаних джерел

1. Strelkova T. A., Lytyuga A. P., Kalmykov A. S. Statistical Characteristics of Optical Signals and Images in Machine Vision Systems // Examining Optoelectronics in Machine Vision and Applications in Industry 4.0. Hershey : IGI Global, 2021. P. 134–162.
2. Стрількова Т. О., Пятайкина М. І., Патров Д. О., Селіванов С. І. Розробка методів контролю якості металевих поверхонь для систем технічного зору // Автоматизація, електроніка та робототехніка (AERT-2025) : матеріали VII форуму. Харків : ХНУРЕ, 2025. С. 62–65.
3. Патров Д. О., Стрількова Т. О. Оцінка ефективності оптико-електронних систем формування та обробки сигналів та зображень // Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті : матеріали 29-го Міжнар. молодіж. форуму, 16–19 квітня 2025 р. Харків : ХНУРЕ, 2025. Т. 1. С. 27–29.
4. Gonzalez R. C., Woods R. E. Digital Image Processing. 4th ed. Pearson, 2018.
5. Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications. Springer, 2011.
6. Goodman J. Statistical Optics. Wiley, 2015.
7. Holst G. CMOS/CCD Sensors and Camera Systems. SPIE Press, 2008.
8. Ibrahim A. A. M. S., Tapamo J.-R. A survey of vision-based methods for surface defects detection and classification in steel products // Informatics. 2024. Vol. 11, No. 2. Article 25.