

КОРЕКЦІЇ ГЕОМЕТРИЧНИХ СПОТВОРЕНЬ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі проведено аналіз основних видів геометричних спотворень цифрових зображень, зокрема дисторсії об'єктива та перспективних викривлень. Розглянуто причини їх виникнення та особливості впливу на геометричну точність зображень. Описано базові алгоритми виправлення спотворень на основі математичної моделі камери та проєктивних перетворень, а також наведено приклади реалізації корекції засобами бібліотеки комп'ютерного зору OpenCV. Показано ефективність застосування цифрових методів корекції для підвищення точності відображення об'єктів на зображеннях.

Ключові слова: спотворення, дисторсія, бочкоподібне, подушкоподібне, перспективне спотворення, OpenCV.

Abstract

The paper analyzes the main types of geometric distortions of digital images, in particular lens distortions and perspective distortions. The causes of their occurrence and the specifics of their impact on the geometric accuracy of images are considered. The basic algorithms for correcting distortions based on the mathematical model of the camera and projective transformations are described, and examples of implementing correction using the OpenCV computer vision library are also given. The effectiveness of using digital correction methods to increase the accuracy of displaying objects in images is shown.

Keywords: distortion, barrel distortion, pincushion distortion, perspective distortion, OpenCV.

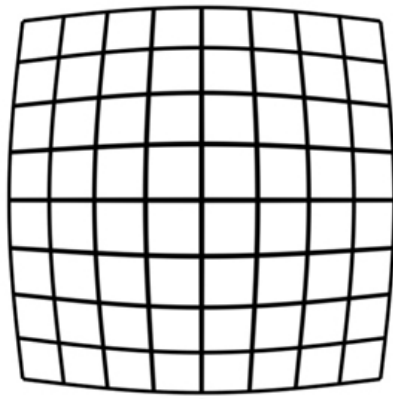
Вступ

Методи корекції геометричних спотворень зображень є важливим етапом обробки даних у сучасних системах комп'ютерного зору, фотограмметрії та цифрової обробки зображень. Геометричні спотворення виникають через характеристики оптичних систем, перетворення перспективи та рух камери під час зйомки зображення, що сприяє зниженню точності кінцевого зображення. Саме тому дослідження методів корекції геометричних спотворень є актуальним завданням для підвищення точності вимірювань, покращення якості зображень та забезпечення стабільності при обробці зображень.

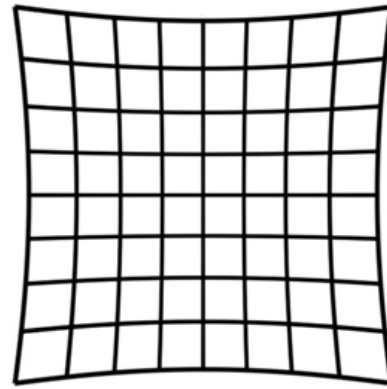
Результати дослідження

Геометричні спотворення цифрових зображень – це порушення форми, розмірів та взаємного розташування об'єктів на знімку, спричинені дефектами оптики, особливостями зйомки (перспектива, кут) або нелінійністю сенсора. Основні види: дисторсія (бочкоподібна, подушкоподібна), перспективні спотворення, масштабування та поворот. Усуваються калібруванням та цифровою корекцією.

Спотворення об'єктива у фотографії стосується оптичних аберацій, які виникають, коли об'єкти камери не може точно відтворити зображення об'єкта фотографування. Це призводить до спотвореного зображення, яке або розтягується, або стискається, залежно від типу спотворення. Існує два основних типи спотворення об'єктива (рис. 1): бочкоподібне викривлення і подушкоподібне спотворення. Бочкоподібне спотворення виникає, коли прямі лінії біля країв зображення здаються вигнутими назовні, створюючи ефект опуклості. Подушкоподібне спотворення, з іншого боку, виникає, коли прямі лінії біля країв зображення здаються вигнутими всередину, створюючи ефект щипкування [1].



Бочкоподібне спотворення



Подушкоподібне спотворення

Рисунок 1 - Спотворення об'єктива.

Перспективне викривлення (рис. 2) – це різновид геометричного спотворення зображення, який виникає внаслідок центральної проєкції тривимірної сцени на площину зображення, коли площина сенсора (або плівки) не паралельна площині об'єкта. У такому випадку змінюються видимі пропорції об'єктів: ближчі частини здаються більшими, віддалені – меншими, а паралельні прямі лінії можуть виглядати такими, що сходяться в одній точці. Найчастіше це проявляється під час фотографування високих будівель з нижньої точки або під кутом, коли вертикальні лінії нахилиються всередину або назовні. Причиною перспективного викривлення є не оптична похибка об'єктива, а геометрія взаємного розташування камери та сцени. Воно залежить від кута зйомки, положення камери відносно об'єкта та відстані до нього. Зі збільшенням кута нахилу камери або використанням ширококутної оптики ефект викривлення посилюється. Саме тому для його зменшення застосовують вирівнювання положення камери, спеціальні зсувні (tilt-shift) об'єктиви або програмну корекцію перспективи [2].



Рисунок 2 – Вигляд виправлення перспективного спотворення

Виправлення дисторсії – це процес усунення геометричних спотворень зображення, спричинених недосконалістю оптичної системи камери. Воно виконується шляхом побудови математичної моделі спотворень об'єктива та подальшого перерахунку координат пікселів так, щоб відновити правильну форму прямих ліній і пропорції об'єктів на зображенні. Для візуалізації було обрано обробку зображення за допомогою бібліотеки комп'ютерного зору, opencv.

Реальна камера не є ідеальною pinhole-моделлю, тому точки сцени проєктуються на матрицю з певними похибками. OpenCV описує це через матрицю камери та через коефіцієнти дисторсії. У стандартній моделі OpenCV вектор спотворень може містити радіальні коефіцієнти $k_1, k_2, k_3, \dots$, тангенціальні p_1, p_2 , а також додаткові коефіцієнти для розширених моделей.

$$A = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де f_x, f_y – фокусні відстані камери вздовж осей x та y у пікселях, c_x, c_y – координати головної точки (оптичного центру) зображення, а останній рядок забезпечує подання координат у однорідній формі.

Алгоритм працює так:

1. Збір калібрувальних зображень. Роблять серію фото шахової дошки або іншого калібрувального шаблону з різних ракурсів. Важливо, щоб шаблон покривав різні зони кадру, бо саме так краще оцінюються спотворення по всій площині зображення.

2. Пошук характерних точок шаблону. На кожному зображенні знаходять кути шахової дошки. Для кожної знайденої 2D-точки на зображенні відома відповідна 3D-точка шаблону в реальному просторі, де зазвичай вважають, що всі точки лежать у площині $Z=0$. Це створює набір відповідностей “об’єктна точка $\rightarrow$ точка зображення”. Принцип калібрування OpenCV саме в отриманні внутрішніх параметрів камери та коефіцієнтів спотворення з таких відповідностей.

3. Оцінка параметрів камери через `calibrateCamera()`. Функція мінімізує похибку між реальними знайденими точками та точками, які прогнозує модель камери. На виході отримують:

- матрицю камери `cameraMatrix`,
- вектор коефіцієнтів спотворення `distCoeffs`,
- також можна оцінити середню `reprojection error`, яка показує якість калібрування.

4. Побудова оберненого перетворення для виправлення. Далі для кожного пікселя виправленого зображення потрібно знайти, звідки взяти значення у вихідному викривленому кадрі. OpenCV прямо вказує, що `initUndistortRectifyMap()` формує саме карти для оберненого відображення: для кожного пікселя у вихідному виправленому кадрі обчислюються координати у вхідному спотвореному зображенні, після чого `remap()` переносить значення пікселів у нові позиції. Це стандартний і чисельно стабільний підхід.

5. Отримання виправленого зображення (рис. 3). Є два основні варіанти:

- `undistort()` – простіший спосіб для разового виправлення одного кадру;
- `initUndistortRectifyMap()` + `remap()` – зручніший варіант для багатьох кадрів, відео або потокової обробки, бо карта перетворення обчислюється один раз і далі багаторазово використовується [3].

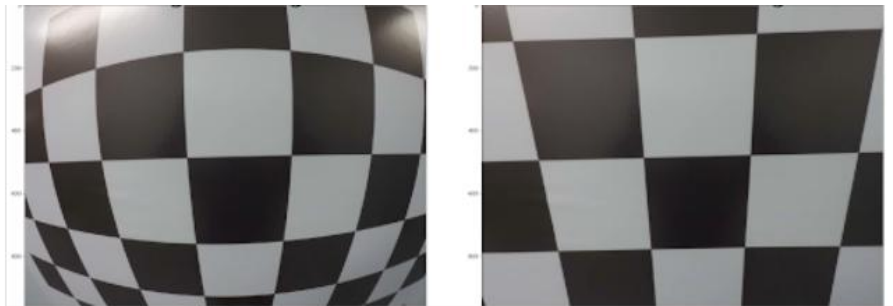


Рисунок 3 – Результат виправлення дисторсії об’єктиву методами орепсв

Виправлення перспективного спотворення полягає у відновленні правильного геометричного вигляду об’єктів на зображенні, який порушується через нахил камери відносно площини сцени. Базовий алгоритм такого виправлення ґрунтується на визначенні відповідностей між точками викривленого зображення та їх реальними положеннями і побудові матриці проєктивного перетворення (гомографії), яка використовується для перерахунку координат пікселів.

Базові етапи алгоритму:

Вибір контрольних точок. На зображенні визначають щонайменше чотири точки, що належать площині об’єкта (наприклад, кути документа, фасаду будівлі або шахової дошки).

1. Задання відповідних точок у виправленій площині.
2. Для кожної вибраної точки задають її координати у бажаному (вирівняному) положенні.

3. Обчислення матриці гомографії. На основі відповідностей між точками обчислюється матриця перспективного перетворення H , яка описує перехід між площинами:

$$x' = Hx, \quad (2)$$

де x – вектор однорідних координат точки на вихідному (викривленому) зображенні, x' – вектор однорідних координат відповідної точки на виправленому зображенні, H – матриця гомографії розміром 3×3 , яка описує проєктивне перетворення між площинами.

4. Перерахунок координат пікселів. Для кожного пікселя вихідного зображення визначається нове положення відповідно до матриці перетворення.

5. Формування виправленого зображення. Виконується інтерполяція значень пікселів і побудова геометрично скоригованого результату [4].

У результаті паралельні лінії сцени відновлюються, а форма об’єктів відповідає їх реальній геометрії (рис. 4).

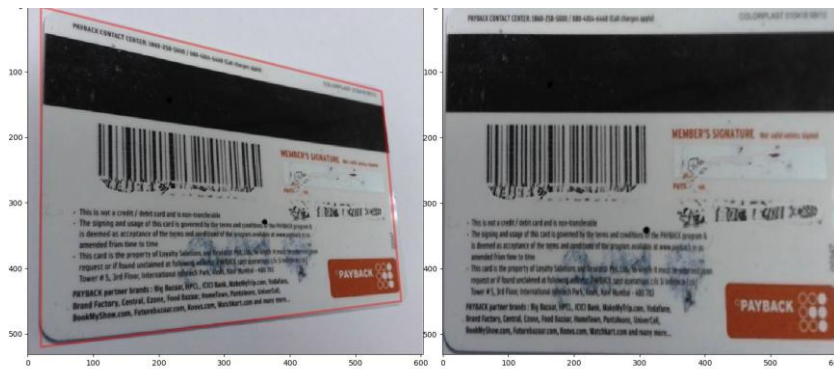


Рисунок 4 – Результат виправлення перспективного викривлення методами опенсв

Висновки

Проведено аналіз основних видів геометричних спотворень цифрових зображень, зокрема дисторсії об'єктива та перспективних викривлень, визначено причини їх виникнення та особливості прояву. Описано базові алгоритми виправлення спотворень на основі математичних моделей камери та проєктивних перетворень, а також розглянуто реалізацію цих алгоритмів засобами бібліотеки OpenCV. Наведено приклади корекції зображень і продемонстровано ефективність застосування методів цифрової обробки для відновлення геометричної точності об'єктів на зображеннях

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Що таке дисторсія об'єктива у фотографії? – [Електронний ресурс] / <https://www.opticslens.com/uk/news/what-is-lens-distortion-in-photograph-what-is-wide-angle-low-distortion-lens-what-is-the-main-applications-of-m12-low-distortion-lens/>.
2. Контроль перспективи – [Електронний ресурс] / https://uk.wikipedia.org/wiki/Контроль_перспективи.
3. Camera Calibration and 3D Reconstruction – [Електронний ресурс] / https://docs.opencv.org/4.x/d9/d0c/group_calib3d.html.
4. Geometric Image Transformations – [Електронний ресурс] / https://docs.opencv.org/4.x/da/d54/group_imgproc_transform.html.

Рейда Микола Олександрович – студент 3 курсу Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: okashnik48@gmail.com.

Рейда Олександр Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри програмного забезпечення, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: reyda@vntu.edu.ua.

Mykola Reyda – 3rd-year student, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: okashnik48@gmail.com.

Oleksandr Reyda – Ph.D., Associate Professor of Software Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: reyda@vntu.edu.ua.