

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Радіотехнічний факультет
Радіотехнічних пристроїв та систем**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Сергій ЖУК

«__» _____ 20__ р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою

«Радіотехнічні інформаційні технології»

спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

**на тему: «Алгоритми компенсації оптичних спотворень на цифрових
зображеннях»**

Виконав:

студент IV курсу, групи РТ-71

Перцов Вадим Миколайович _____

Керівник:

К.т.н., старший викладач

Вишневий Сергій Валерійович _____

Рецензент:

К.т.н., доцент

асист. каф. КіВРА

Нікітчук Артем Валерійович _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2021 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Радіотехнічний факультет
Радіотехнічних пристроїв та систем

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Радіотехнічні інформаційні технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій ЖУК

«__» _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Перцову Вадиму Миколайовичу

1. Тема роботи «Алгоритми компенсації оптичних спотворень на цифрових зображеннях», керівник роботи Вишневий Сергій Валерійович к.т.н., старший викладач, затверджені наказом по університету від «18» травня 2021 р. №1205-с
2. Термін подання студентом роботи 09.06.2021 року
3. Вихідні дані до роботи: загальні вимоги до компенсації оптичних спотворень на цифрових зображеннях.
4. Зміст роботи: огляд алгоритмів обробки і аналізу зображень, корекція спотворень. Розробка і реалізація алгоритмів виправлення оптичної дисторсії.
5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо) презентація по роботі в обсязі не менше 10 слайдів.

6. Дата видачі завдання 12 квітня 2021р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд існуючих рішень	12.04 – 19.04	Розділ 1
2	Огляд алгоритмів обробки і аналізу зображення	20.04 – 01.05	Розділ 1
3	Знайомство з формуванням зображень	02.05 – 09.05	Розділ 1
4	Огляд алгоритмів калібрування радіальної дисторсії	10.05 – 15.05	Розділ 2
5	Модель дисторсії Брауна	15.05 – 21.05	Розділ 3
6	Порівняння методів	22.05 – 31.05	Розділ 4
7	Оформлення документації	01.06 – 06.06	Додатки

Студент

В.М. Перцов

Керівник

С.В. Вишневий

АНОТАЦІЯ

До бакалаврської дипломної роботи Перцова Вадим Миколайовича.

На тему: «Алгоритми компенсації оптичних спотворень на цифрових зображеннях»

Дана дипломна робота присвячена методам компенсації оптичних спотворень на цифрових зображеннях.

В роботі зроблено аналіз алгоритмів компенсації оптичних спотворень та визначення найбільш оптимальних методів компенсації для цифрових зображеннях.

Аналіз проводиться в пакеті прикладних програм MATLAB.

Загальний об'єм роботи: 59 сторінок, 20 рисунків, 3 таблиці, 2 додатки.

Ключові слова: обробка зображень, компенсації оптичних спотворень, дисторсія.

АННОТАЦИЯ

К бакалаврской дипломной работы Перцова Вадим Николаевича.

На тему: «Алгоритмы компенсации оптических искажений цифровых изображениях»

Данная дипломная работа посвящена алгоритмам компенсации оптических искажений цифровых изображениях.

В работе сделан анализ методов компенсации оптических искажений и определения наиболее оптимальных методов компенсации для цифровых изображений.

Анализ проводится в пакете прикладных программ MATLAB.

Общий объем работы: 59 страниц, 20 рисунков, 3 таблицы, 2 приложения.

Ключевые слова: обработка изображений, компенсации оптических искажений, дисторсия.

ANNOTATION

To Pertsov Vadim Nikolaevich bachelor's thesis.

On the topic: "Methods of compensation for optical distortion in digital images"

This thesis is devoted to algorithms for compensating optical distortion of digital images.

The paper analyzes the methods of optical distortion compensation and determines the most optimal compensation methods for digital images.

The analysis is performed in the MATLAB application package.

Total volume of work: 59 pages, 20 figures, 3 tables, 2 appendix.

Key words: image processing, optical distortion compensation, distortion.

**Пояснювальна записка
до дипломної роботи
на тему: Методи компенсації оптичних спотворень на
цифрових зображеннях**

ЗМІСТ

Вступ.....	10
1 Дисторсія об'єктива. Причини виникнення та методи компенсації на зображеннях.....	12
1.1 Ідеальне формування зображень: Камера-обскура.	12
1.2 Реальне формування зображень	16
1.3 Розрахунок спотворень оптичної системи	16
1.4 Аберації третього порядку	20
1.5 Дисторсія.....	23
1.6 Моделі дисторсії і її компенсації.....	24
1.7 Зв'язок фокусної відстані і дисторсії яка спостерігається на зображенні.....	25
2 Алгоритми калібрування радіальної дисторсії.....	28
2.1 Калібрування з використанням спеціального калібрувального об'єкта	28
2.2 Автокалібрування.....	32
2.2.1 Автокалібрування за кількома зображеннями сцени	33
2.2.2 Автокалібрування по одиничному зображенню сцени.....	34
3 Аналіз моделі дисторсії Брауна. Вплив дисторсії на прямі лінії	38
3.1 Обмеженість моделі Брауна з малою кількістю коефіцієнтів	38
3.2 Залежність кривизни ліній від їх положення на зображенні.....	41
4 Експериментальне долідження описаних алгоритмів	44
4.1 Обчислення зворотного перетворення координат при радіальній дисторсії.	44

4.2 Алгоритм автокалібрування фото	45
4.2.1 Виправлення дисторсії при відомих фіксованих параметрах .	46
4.3 Тестування запропонованих алгоритмів	47
4.3.1 Алгоритм корекції при відомих параметрах камери.....	48
4.3.2 Алгоритм корекції при невідомих параметрах камери.....	50
Висновки	52
Перелік посилань	53
Додаток А.....	58
Додаток Б	59

ВСТУП

На сьогоднішній день камери з ширококутним об'єктивом стають все більш доступними звичайному користувачеві. Такі об'єктиви дозволяють збільшити поле зору місцевості яку будемо фотографувати при фіксованому положенні камери. Отримані фото та відео з таких камер схильні до ряду оптичних спотворень.

Високоякісні камери оснащені досить складною системою лінз, яка компенсує всі значні спотворення. Однак досить часто трапляються випадки, коли компенсацію оптичних спотворень повинен здійснити сам користувач на етапі обробки отриманих зображень. Це може бути пов'язано з дешевою оптичною системою без дорогого процесу калібрування камери або свідомий намір користувача отримати необроблені дані.

Одним з таких спотворень є радіальна дисторсія, яка порушує геометричну подібність між об'єктом в сцені та його образом на знімку. Досить точне виправлення радіальної дисторсії має важливе значення для багатьох завдань оптичного розпізнавання, через те що, дисторсія спотворює прямі лінії, а на детекції прямолінійних відрізків побудовано багато алгоритмів виділення і аналізу об'єктів на зображенні.

При наявності доступу до камери отримати параметри спотворення, а потім і зображення з скомпенсованою дисторсією, можна за допомогою спеціального каліброваного програмного забезпечення.

На вхід до програми подається одне або кілька зображень спеціального каліброваного об'єкта, знятого на калібруючу камеру, і параметри об'єкта.

Актуальність та практична цінність полягає в розробленому методі калібрування радіальної дисторсії, який використовується в задачах аналізу зображень, які отримані від невідомої оптичної системи.

Також даний метод може бути використаний для компенсації радіальних спотворень на цифрових зображеннях, отриманих об'єктивом зі змінною фокусною відстанню без зворотного зв'язку або при підводній зйомці в умовах невідомого показника заломлення води.

1 ДИСТОРСІЯ ОБ'ЄКТИВА. ПРИЧИНИ ВИНИКНЕННЯ ТА МЕТОДИ КОМПЕНСАЦІЇ НА ЗОБРАЖЕННЯХ.

1.1 Ідеальне формування зображень: Камера-обскура.

Калібровка камери – це задача отримання внутрішніх та зовнішніх параметрів камери по існуючим фотографіям або відео які зняла камера.

Калібровка камери часто використовується на початковому етапі вирішення багатьох задач комп'ютерного зору та в особливостях доповненої реальності. Крім того, калібровка камер допомагає виправити дисторсію на фотографіях та відео.

Методи комп'ютерного зору, закладені в такі системи, як правило, розгортаються в передбаченнях, що проектування тримірного простору на площині зображення описується моделлю «камера-обскура».

Формуючим елементом камери-обскури виступає нескінченно малий отвір O — центр проекції (см. рисунок 1.1). Площини XY , YZ , ZX , перетинаючись під прямим кутом в точці O , утворюють систему координат з початком координат в цій точці. Така система називається системою координат камери і описує положення об'єкта в сцені.

Окремий світловий промінь, що йде від точки об'єкта тривимірної сцени з координатами $P = (X, Y, Z)$, проходить через центр проекції і проектується, не заломлюючись, в точку $p = (x, y)$ на площину зображення. Площина зображення знаходиться на відстані f від центру проекції O , яке називається фокусною відстанню.

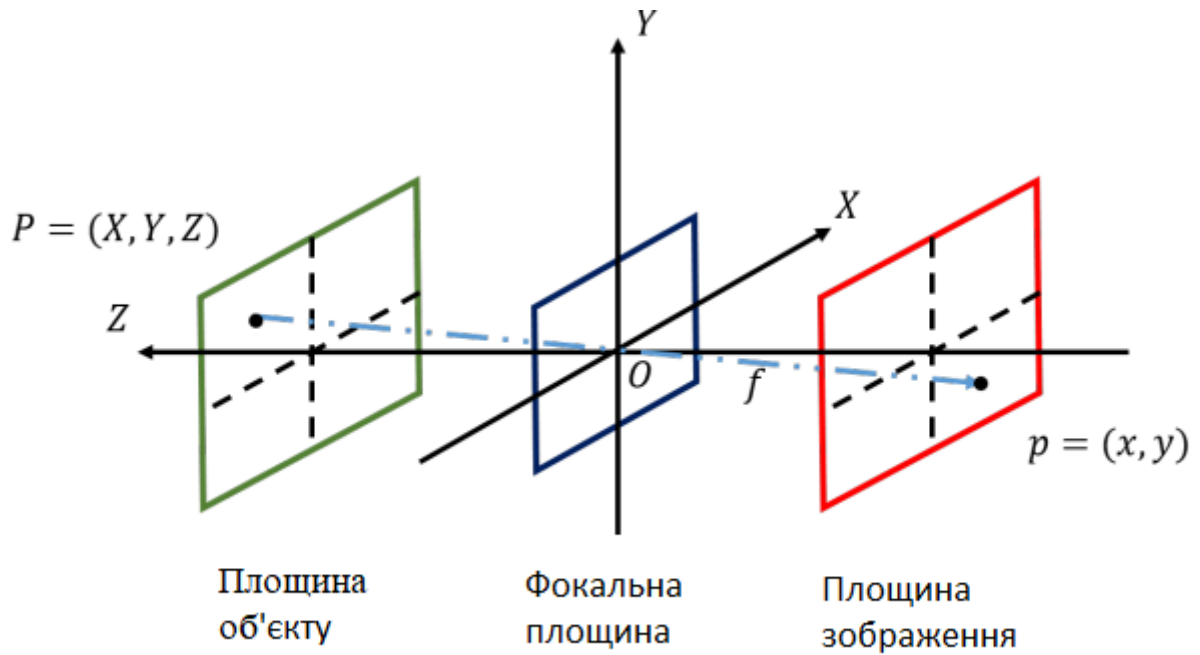


Рисунок 1.1 — Формування зображень за допомогою моделі «камера-обскура».

Точка об'єкта P в сцені проєктується в точку p на зображенні через центр проєкції O .

Залежність між координатами в $3D$ -просторі та на $2D$ -зображенні в такій моделі задається співвідношенням:

$$y = -\frac{fY}{Z}$$

або, після заміни координат,

$$y = \frac{fY}{Z}$$

Так як знак « $-$ » передбачає тільки відображення зображення відносно початку відліку системи координат.

$$\text{Координати зображення } x = \frac{fX}{Z}, \quad (0.2),$$

поділені на відстань f , є безрозмірними і рівні тангенсу кута відносно оптичної осі, при якій спостерігається об'єкт (див. рисунок 1,2):

$$r = f * tg\varphi$$

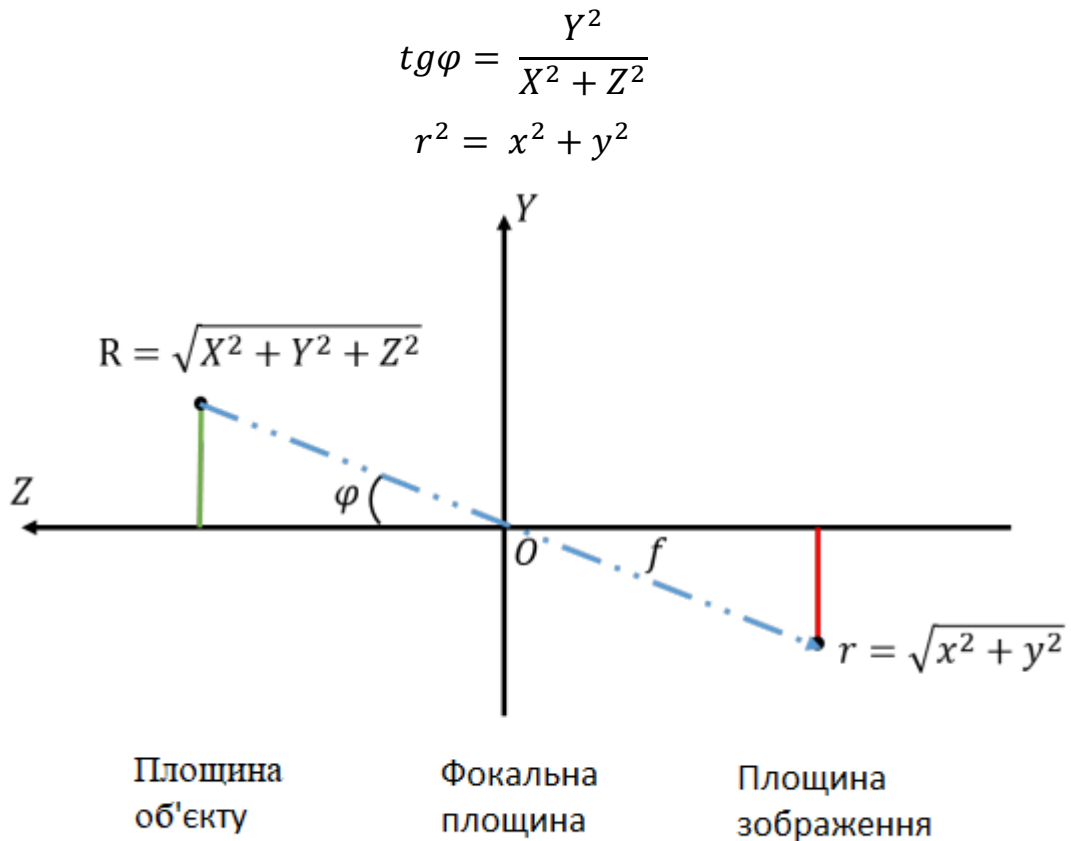


Рисунок 1.2 — Формування зображення за допомогою моделі «камера-обскура».

Спостережувана під кутом φ точка об'єкту P з радіус-вектором R проєктується в точку p з радіус-вектором r на зображенні через центр проєкції O .

Перепишемо рівняння (1.2) в матричному вигляді:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = A_0 \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, x = \frac{u}{w}, y = \frac{v}{w} \quad (1.4)$$

і узагальнимо матрицю A_0 :

$$A = \begin{bmatrix} f_x & \gamma & x_0 \\ 0 & f_y & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} f_x = s_x f, f_y = s_y f. \quad (1.5)$$

Тут в A s_x і s_y - масштабуючі коефіцієнти, що залежать від розміру пікселя зображення, (x_0, y_0) - центр проекції, γ - коефіцієнт перекосу між осями X , Y зображення, який в сучасних камерах зазвичай дорівнює нулю або дуже малий.

Отримана матриця A називається «внутрішніми параметрами» камери і описує перетворення координат камери в координати зображення.

Іншим способом описати положення об'єкта в $3D$ -просторі є система координат, яка відноситься до сцени яка спостерігається. Такі координати називаються світовими. Поєднання світових координат і координат камери вимагає таких елементарних геометричних перетворень, як зсув та поворот: спочатку початок відліку світової системи координат зміщується в початок відліку системи координат камери за допомогою вектора переміщення T , потім змінюється орієнтація зсувотної системи поворотами відносно відповідних осей, з тим щоб вона співпадала з системою координат камери. Математично переміщення можна описати векторним відніманням, а поворот - множенням координатного вектора на матрицю:

$$P = R(P' - T) \quad (1.6)$$

де P' - положення точки об'єкта, заданого в світових координатах.

Вектор перенесення T і матриця повороту R називаються «зовнішніми параметрами» камери.

Важливою особливістю моделі «камера-обскура» є те, що пряма лінія в просторі сцени в такій моделі проектується на площину зображення як пряма лінія.

Однак така модель служить лише наближеною моделлю реального фізичного процесу.

1.2 Реальне формування зображень

Одиночний світловий промінь може досягти площини зображення тільки при ідеальній проекції. У реальних отворах є певний розмір, внаслідок чого кожна точка на площині зображення висвітлюється конусом світлових променів. Збільшення отворів призводить до розфокусування зображення, а зменшення отвору призводить до зменшення світла, яке падає на площину зображення. Тому в реальній камері формуючим елементом виступає лінза (або система лінз). Лінза акумулює падаюче світло і контролює ступінь розмитості зображення.

Оптичні системи, які мають практичний інтерес, мають аберації - відхилення від камери-обскури.

1.3 Розрахунок спотворень оптичної системи

Якість зображення об'єкта пучками монохроматичних променів залежить від досконалості корекції монохроматичних аберацій. Виникнення цих аберацій пояснюється тим, що заломлюючі поверхні (лінзи) не збирають в точку широкі гомоцентричні пучки променів, які падають на них під великими кутами [1].

Зображення об'єкта в білому світлі може виявитися пофарбованим, що буде залежати від хроматичної аберації оптичної системи. Їх виникнення пояснюється дисперсією оптичних середовищ, з яких утворена оптична система.

До більшості оптичних систем, які працюють в умовах змінної температури навколишнього середовища, висуваються вимоги виправлення термооптичних аберацій. Температурні коливання викликають зміни оптичних показників заломлення і дисперсії, зміни геометричних параметрів оптичних і механічних деталей (кривизни заломлюючих поверхонь, товщини лінз і т.д.).

Аберації оптичної системи принципово не підлягають ремонту, тобто будь-яка реальна оптична система завжди має залишкові аберації.

На малюнку 1.3 зображена центрована оптична система, де XOY і $X'O'Y'$ - площини предмета та зображення, $\bar{X}\bar{O}\bar{Y}$ і $\bar{X}'\bar{O}'\bar{Y}'$ - площини вхідної і вихідної зіниці. Припустимо, що відомо відстань s_1 від першої поверхні до предметної площини XOY і відстань s_p від першої поверхні до вхідної зіниці. Предметна точка P віддалена від оптичної осі на відстань y_1 . Виберемо довільний промінь PG , який в загальному випадку не лежить в меридіональній площині (тобто площині, до якої належить оптична вісь системи). Якщо відомі координати y_1 , s_1 , s_p , то положення такого внемаридіонального (косого) променя в просторі визначається завданням координат точки $G = (m, M)$ перетин цього променя з площиною вхідної зіниці $\bar{X}\bar{O}\bar{Y}$ [2].

Якби система була ідеальною, то будь-який промінь, що вийшов з точки P , пройшов би через точку P_0 . У реальній системі в загальному випадку цього не відбувається, і промінь PG , що перетинає вхідну зіницю в точці G , пройшовши через оптичну систему і площину вихідної зіниці в точці G' з координатами m' і M' , перетинає предметну площину в певній точці P_d , а не в точці P_0 .

Таким чином, поперечна аберація розглянутого променя характеризується відрізком P_0P_d . У практиці розрахунку оптичних систем цю аберацію представляють за допомогою її проекції на осі координат: меридіональної складової поперечної аберації δy і сагітальній δx . тоді координати точки P_d визначаються як $(x_d, y_d) = (x + \delta x, y + \delta y)$.

Виконавши розрахунки декількох променів, що виходять з предметної точки P і проходять через різні точки вхідної зіниці, знаходять поперечні аберації δx і δy кожного променя, які і характеризують пляму розсіювання даної точки.

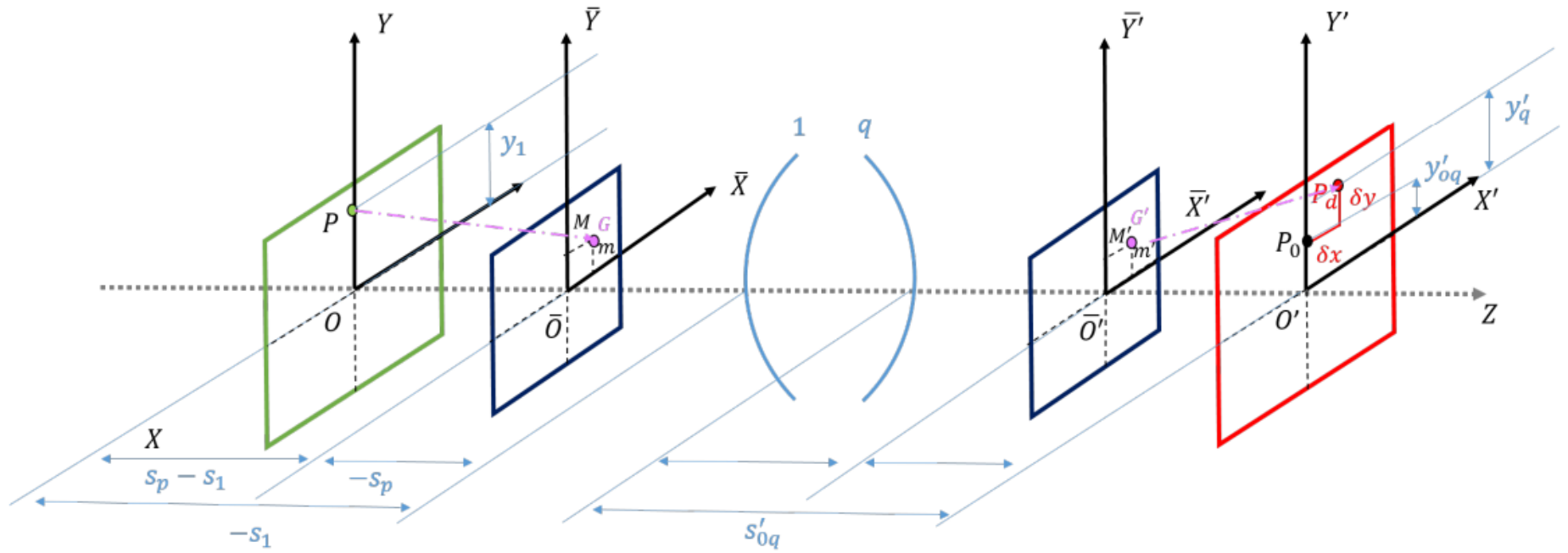


Рисунок 1.3 — Аберція косої променя в моделі оптичної системи

1.4 Аберации третьего порядка

Меридіональна і сагітальна складова поперечної аберации можуть бути знайдені за допомогою математичного опису абераций.

Складові поперечної аберации δx і δy є функціями координат променя y_1 , m , M , також вони залежать від конструктивних параметрів системи, положення предметної площини і площини вхідної зіниці. Теорія абераций встановлює зв'язок між складовими аберациями δx , δy і координатами падаючого променя y_1 , m , M :

$$\begin{aligned}\delta x &= f(y_1, m, M) \\ \delta y &= F(y_1, m, M)\end{aligned}\quad (1.7)$$

Внаслідок симетрії системи відносно оптичної осі функції (1.7) не містять члени парних порядків. Тому, якщо їх розкласти в ряд, вони будуть містити тільки члени непарних порядків відносно координат y_1 , m , M :

$$\begin{aligned}\delta y &= \delta y_{III} + \delta y_V + \delta y_{VII} + \dots \\ \delta x &= \delta x_{III} + \delta x_V + \delta x_{VII} + \dots\end{aligned}\quad (1.8)$$

Наявність в формулах (1.8) абераций першого порядку відповідало б розгляду абераций δx , δy в довільній площині, яка не співпадає з площиною ідеального зображення.

Теорія абераций третього порядку визначає наближені значення складових абераций δ_x і δ_y , представлених у вигляді ряду, члени якого містять коефіцієнти A , B , C , D , E , що залежать тільки від конструктивних параметрів системи і від положення площин предмета і вхідної зіниці, але не залежать від координат променя. Ці координати y_1 , m , M входять у вигляді множників ряду зі ступенями y_1^α , m^β , M^γ , сума яких $\alpha + \beta + \gamma = 3$. Число коефіцієнтів третього порядку дорівнює п'яти:

$$\begin{aligned}\delta y_{III} &= Am(m^2 + M^2) + By_1(3m^2 + M^2) + Cy_1^2 m + Ey_1^3 \\ \delta x_{III} &= AM(m^2 + M^2) + 2By_1 m M + Dy_1^2 M,\end{aligned}\quad (1.9)$$

де коефіцієнти A, B, C, D, E залежать тільки від положення площин предмета і вхідної зіниці і конструктивних параметрів оптичної системи. Зазначені параметри виражають не через конструктивні параметри системи, а через параметри двох допоміжних параксіальних променів (див. Рис. 1.4).

Перший допоміжний параксіальний (нульовий) промінь I проходить через осьову точку A_1 предметної площини під довільним кутом α_1 і перетинає головну площину першої поверхні на висоті h_1 . Другий допоміжний параксіальний промінь II проходить через центр вхідної зіниці під довільним кутом β_1 і перетинає головну площину першої поверхні на висоті H_1 .

Виражаємо коефіцієнти A, \dots, E через параметри допоміжних променів, отримаємо такі формули для складових поперечної аберації третього порядку:

$$\begin{aligned} \delta y_{III} = & -\frac{m(m^2 + M^2)}{2n'_q(s_1 - s_P)^3 \alpha_1^3 \alpha'_q} S_I + \frac{y_1(3m^2 + M^2)}{2n'_q(s_1 - s_P)^3 \alpha_1^2 \alpha'_q \beta_1} S_{II} - \\ & - \frac{y_1^2 m}{2n'_q(s_1 - s_P)^3 \alpha_1 \alpha'_q \beta_1^2} (3S_{III} + I^2 S_{IV}) + \frac{y_1^3}{2n'_q(s_1 - s_P)^3 \alpha'_q \beta_1^3} S_V \\ \delta x_{III} = & -\frac{M(m^2 + M^2)}{2n'_q(s_1 - s_P)^3 \alpha_1^3 \alpha'_q} S_I + \frac{2y_1 m M}{2n'_q(s_1 - s_P)^3 \alpha_1^2 \alpha'_q \beta_1} S_{II} - \\ & - \frac{y_1^2 m}{2n'_q(s_1 - s_P)^3 \alpha_1 \alpha'_q \beta_1^2} (3S_{III} + I^2 S_{IV}) \end{aligned} \quad (1.10)$$

де n_i — показник заломлення для i -ої заломлюючої поверхні, α_i — кут між оптичною віссю системи і нульовим (першим допоміжним параксіальним) променем до заломлення променя через i -у поверхні, α'_i — після заломлення, β_i і β'_i — між оптичною віссю і другим допоміжним параксіальним променем, $I = -n_1 \alpha_1 (s_1 - s_P) \beta_1$.

Символами $S_I, S_{II}, S_{III}, S_{IV}, S_V$ позначені суми Зейделя, що визначаються через параметри допоміжних променів. Кожним таким символом визначається одна з п'яти аберацій третього порядку: S_I — сферична аберация; S_{II} — кома; S_{III} — астигматизм; S_{IV} — кривизна поля (поверхні) зображення; S_V — дисторсія.

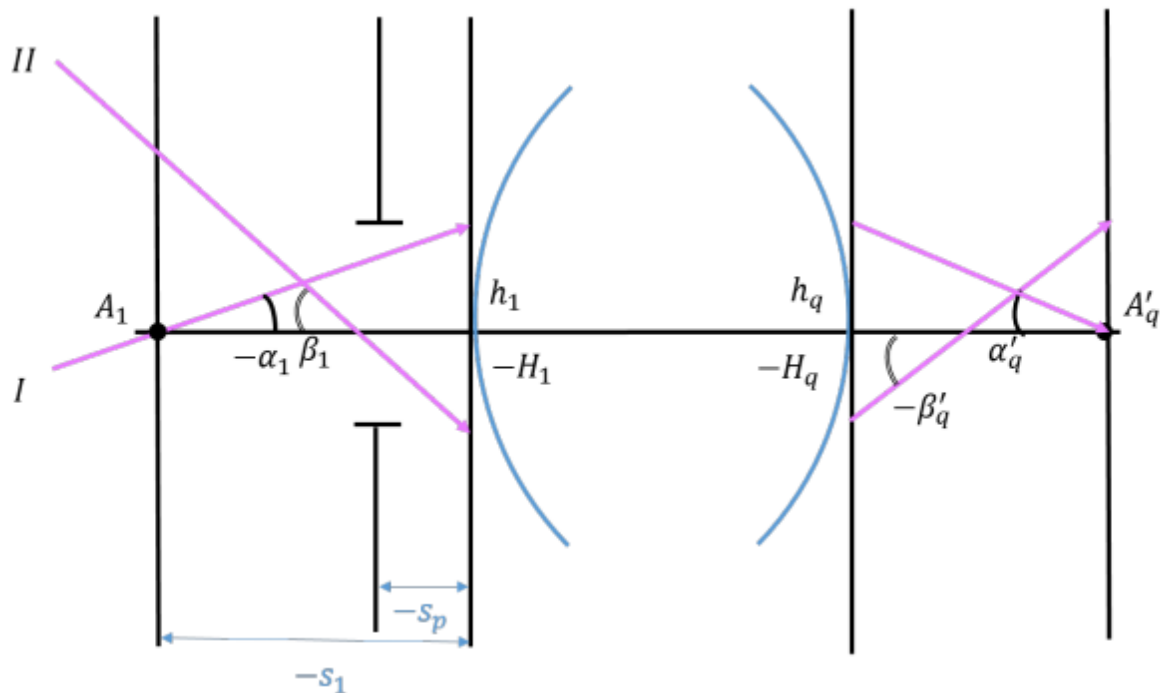


Рисунок 1.2 — Хід допоміжних параксіальних променів в оптичній системі: I - першого допоміжного (нульового) і II - другого допоміжного.

З метою спрощення аналізу припускають, що в формулах тільки один з коефіцієнтів не дорівнює нулю, який і визначає відповідну аберацію.

1.5 Дисторсія

Дисторсія оптичної системи проявляється в порушенні колінеарності між об'єктом та зображенням. Це відхилення не залежить від координат променя на вхідній зіниці, та всі промені, що виходять з даної предметної точки, після проходження системи лінз дають гомоцентричний пучок променів, що збирається в площині зображення в точці, яка не співпадає з її ідеальним зображенням. При дисторсії якість зображення не змінюється, але спотворюється його форма. Значення дисторсії для даної точки поля знаходиться різницею між ординатою y'_q головного променя та ординатою y'_{0q} , яка відповідає ідеальному зображенню:

$$\delta y = y'_q - y'_{0q}; \quad (0.11)$$

При цьому коефіцієнт лінійного збільшення визначається наступним чином:

$$\beta = \frac{y'_q}{y_1}. \quad (0.12)$$

З формул вище (0.11) і (0.12) випливає, що якщо $|\beta|$ збільшується при віддаленні предметної точки від оптичної осі, то буде збільшуватися дисторсія системи δy , така дисторсія буде називатися позитивною(подушкоподібною), а якщо $|\beta|$ буде зменшуватися, така дисторсія буде називатися негативною(бочкоподібною).

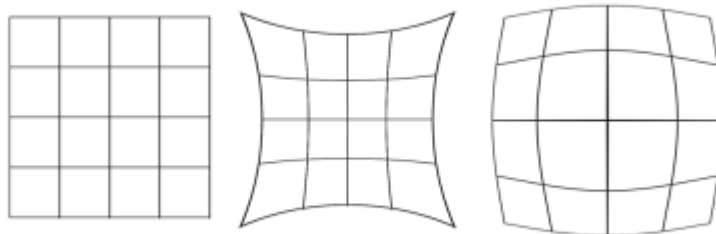


Рисунок 1.3 — вихідний об'єкт; позитивна дисторсія; негативна дисторсія.

В реальній системі дисторсія тільки одного виду ніколи не зустрінеться, завжди це комбінація усіх трьох видів, крім цього на них ще накладаються спотворення вищих порядків та помилки конструювання системи.

1.6 Моделі дисторсії і її компенсації

Однією з найбільш поширених на сьогоднішній день моделей дисторсії є модель Брауна-Конраді [3; 4] Запропонована модель враховує радіальні спотворення, викликані сферичною формою лінзи, і тангенціальні спотворення, викликані похибками в установці лінзи паралельно площині зображення.

$$x_d = x(1 + \sum_{i=1}^n k_i r^{2i}) + [p_1(r^2 + 2x^2) + 2xyp_2](1 + \sum_{j=3}^m p_j r^{2j}) \quad (1.13)$$

$$y_d = y(1 + \sum_{i=1}^n k_i r^{2i}) + [p_2(r^2 + 2y^2) + 2xyp_1](1 + \sum_{j=3}^m p_j r^{2j})$$

де

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$x = x_u - x_c$$

$$y = y_u - y_c$$

k_i — параметри радіальної дисторсії, p_j — параметри тангенціальної дисторсії, (x_u, y_u) — ідеальне положення точки, (x_0, y_0) — оптичний центр зображення, (x_d, y_d) — положення точки в результаті дії радіальної дисторсії.

На даний момент параметри тангенціальної дисторсії практично не оцінюють, вважаючи, що в сучасних оптичних системах подібний недолік усунуто, тому рівняння (1.13) спрощується до формули наступного виду:

$$x_d = x \frac{d(r)}{r}$$

$$y_d = y \frac{d(r)}{r} \quad (1.14)$$

$$r_d = d(r) = r \left(1 + \sum_{i=1}^n k_i r^{2i} \right)$$

У літературі, як буде розглянуто далі, модель (1.14) використовується не тільки для моделювання дисторсії, але й для її компенсації на зображенні у вигляді $r = d(r_d)$.

Іншою поширеною моделлю компенсації радіальної дисторсії є модель, запропонована Andrew Fitzgibbon [5]:

$$r = d(r_d) = \frac{r_d}{1 + \sum_{i=1}^n k_i r_d^{2i}} \quad (1.15)$$

1.7 Зв'язок фокусної відстані і дисторсії яка спостерігається на зображенні

Розглянемо залежність між фокусною відстанню і радіальним спотворенням на прикладі моделі Брауна.

Як вже було розглянуто в розділі 1.1, в моделі камери-обскури залежність між точкою сцени (X, Y, Z) і точкою зображення (x, y) описується наступним чином:

$$x = \frac{fX}{Z} \quad (1.16)$$

$$y = \frac{fY}{Z}$$

де f — фокусна відстань.

Проведемо заміну змінних:

$$\tilde{X} = \frac{X}{Z} \quad (1.17)$$

$$\tilde{Y} = \frac{Y}{Z}$$

і перепишемо (1.16) в наступному вигляді:

$$x = f\tilde{X} \quad (1.18)$$

$$y = f\tilde{Y}$$

Виразимо радіус r точки (x, y) через координати виду (1.18):

$$r^2 = x^2 + y^2 = f^2(\tilde{X}^2 + \tilde{Y}^2) = f^2\tilde{R}^2 \quad (1.19)$$

$$r = f\tilde{R}$$

і підставимо в (1.14):

$$d(r) = d(f\tilde{R}) = f\tilde{R} \left(1 + \sum_{i=1}^n k_i (f\tilde{R})^{2i} \right) = f\tilde{R} \left(1 + \sum_{i=1}^n k_i f^{2i} \tilde{R}^{2i} \right) \quad (1.20)$$

З (1.20) видно, що викривлена проекція точки з простору сцени на площину зображення залежить не тільки від параметрів дисторсії k_i , але і від фокусної відстані f .

Виведемо модель незалежної від f дисторсії для зображення. Для цього покладемо:

$$k_i = \frac{\tilde{k}_i}{f^{2i}} \quad (1.21)$$

і перепишемо формулу (1.20), зробивши заміну параметрів k_i за формулою (1.21):

$$d(r) = f\tilde{R} \left(1 + \sum_{i=1}^n k_i f^{2i} \tilde{R}^{2i} \right) = f\tilde{R} \left(1 + \sum_{i=1}^n \frac{\tilde{k}_i}{f^{2i}} f^{2i} \tilde{R}^{2i} \right) = f\tilde{R} \left(1 + \sum_{i=1}^n \tilde{k}_i \tilde{R}^{2i} \right) \quad (1.22)$$

З (1.22) видно, що заміна параметрів дисторсії k_i за формулою (1.21)

рівносильна виключенню f з моделі дисторсії:

$$d(r) = f\tilde{R}\left(1 + \sum_{i=1}^n \tilde{k}_i \tilde{R}^{2i}\right) = fd(\tilde{R}) = fd\left(\frac{r}{f}\right). \quad (1.23)$$

Таким чином, отримуємо наступне: спотворення зображення незалежно від f еквівалентно нормуванню параметрів дисторсії виду (1.21). Зауважимо також, що таке нормування еквівалентне попередньому нормуванню координат зображення на f .

2 АЛГОРИТМИ КАЛІБРУВАННЯ РАДІАЛЬНОЇ ДИСТОРСІЇ

Послідовність геометричних перетворень, які описані рівняннями (1.5), (1.6) і (1.14), будемо називати моделлю оптичної системи, а процес встановлення параметрів моделі — процесом калібрування оптичної системи.

Умовно методи калібрування радіальної дисторсії можна розділити на ті що потребують наявності калібрувального об'єкта і не потребують. Останні отримали назву «автокалібрування» або «самокалібрування».

2.1 Калібрування з використанням спеціального калібрувального об'єкта

До даної групи методів калібрування відносяться методи, принцип яких полягає в спостереженні заданого калібрувального об'єкта, який потрапляє в поле зору камери. Головна вимога до такого об'єкта — його характеристики повинні бути відомі заздалегідь.

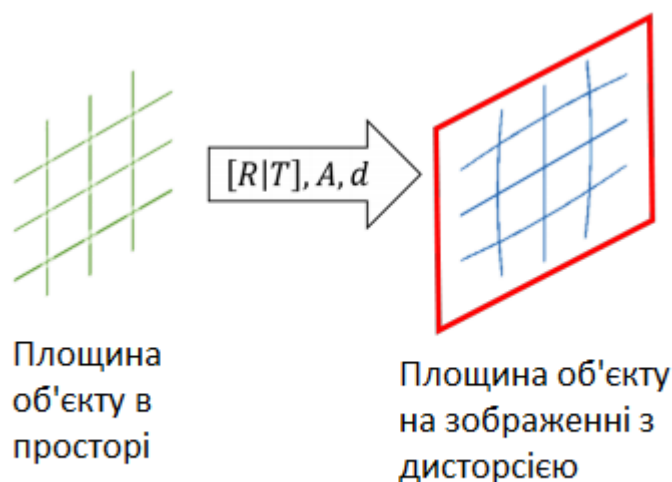


Рисунок 1.4 — Завдання калібрування: потрібно знайти такі R, T, A, d , які зв'яжуть об'єкт в сцені і спостережуваний на зображенні взаємно-однозначним геометричним перетворенням.

В роботі Zhengyou Zhang [6], що стала класичною в даній області, таким об'єктом виступає шаховий патерн. Шаховий патерн містить m опорних точок, розташування яких на об'єкті відомо (в разі шахового патерну такими точками виступають кутові точки клітин дошки). На вхід алгоритм калібрування отримує m знайдених опорних точок на кожному з n зображень калібрувального об'єкта, знятого з різних ракурсів. Суть алгоритму полягає в обчисленні повного набору параметрів камери (зовнішніх R, T , внутрішніх A і лінзи k_1, k_2 згідно із загальними рівняннями (1.6), (1.5) і (1.14) відповідно) мінімізацією функціоналу виду:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \|m_{ij} - m_d(A, k_1, k_2, R_i, t_i, M_j)\|^2 \quad (1.24)$$

де $m_d(A, k_1, k_2, R_i, t_i, M_j)$ — проекція точки M_j на i -е зображення калібрувального об'єкта згідно послідовному застосуванню рівнянь (1.6), (1.5), (1.14), m_{ij} — положення яке спостерігається M_j на i -му зображенні калібрувального об'єкта. Для вирішення (1.24) використовується алгоритм Левенберга-Марквардта.

Закладені Zhengyou Zhang основи такого калібрування розвиваються до сих пір: шукаються способи мінімізувати необхідну кількість зображень калібрувального об'єкта [7] і підвищити точність обчислень [8], тестуються різні калібрувальні об'єкти [9; 10] і так далі.

Через свою просту структуру і порівняно легкої детекції опорних точок шахова дошка є найбільш поширеним калібрувальним об'єктом на даний момент. Інструменти калібрування, що входять в бібліотеку OpenCV (англ. Open Source Computer Vision Library, бібліотека комп'ютерного зору з відкритим вихідним кодом) і пакет MATLAB, надають інструментарій для калібрування, який заснований на використанні саме шахового патерну.

Інший підхід запропоновано в [11]. Автор обчислює величину радіального спотворення не у вигляді поліноміальних коефіцієнтів, а в вигляді матриці зсувів положень пікселів зображення. Вихідний калібрувальний об'єкт приводиться згідно до ракурсу знімка, а потім два розподілу інтенсивності — вихідного об'єкту і отримане при фотографуванні, — порівнюються кореляційним методом, обчислюючи для околиці кожного пікселя приймальної матриці камери значення зсуву по двом перпендикулярним осях відносно ідеального положення.

Так, якщо початкове значення інтенсивності $I_0(\vec{r})$, а на фотографії об'єкта розподіл інтенсивності $I_1(\vec{r}) = I_0(\vec{r} + \vec{\tau}_0)$, їм відповідають фур'є-образи:

$$F_0(\vec{q}) = \int_S I_0(\vec{r}) e^{-i2\pi\vec{q}\vec{r}} d\vec{r} \quad (1.25)$$

$$F_1(\vec{q}) = e^{i2\pi\vec{q}\vec{\tau}_0} F_0(\vec{q})$$

де q — просторова частота

При відповідному нормуванню зворотне Фур'є-перетворення від цих Фур'є-образів $\Phi(\vec{q}) = F_0(\vec{q})F_1^*(\vec{q})$ призводить до отримання функції кореляції зображень

$$K(\vec{\tau}) = \int_S I_0(\vec{r}) I_1(\vec{r} + \vec{\tau}) d\vec{r} \quad (1.26)$$

де S — область, по якій проводиться інтегрування. У разі жорсткого зміщення або вибору на картині ділянки такого розміру, що зображення зміщується як ціле, без деформації, функція взаємної кореляції набуває вигляду:

$$K(\vec{\tau}) = \int_S I_0(\vec{r}) I_1(\vec{r} + \vec{\tau} - \vec{\tau}_0) d\vec{r} \quad (1.27)$$

де \vec{t}_0 — вектор зміщення для всього зображення, або вектор локального зміщення в разі обмеженої області. $K(\vec{t})$ відповідає функції автокореляції неспотвореного зображення, зміщеного на \vec{t}_0 . Відповідно до положення максимуму визначається локальне значення \vec{t}_0 для даної області інтегрування, яке приписується точці зображення, що відповідає центру вікна.

Описані вище методи калібрування вимагають обов'язкового доступу до камери і виготовлення певного каліброваного об'єкта. Однак з масовим поширенням ширококутних об'єктивів непоодинокі випадки, коли даний варіант калібрування неможливий або надмірно трудомісткий.

Наприклад, в об'єктивах зі змінною фокусною відстанню дисторсія має різні параметри в залежності від встановленої фокусної відстані. Ці параметри можна розрахувати заздалегідь для заданого набору фокусних відстаней, фіксуючи кожне з них і виконуючи класичне калібрування камери. При цьому, хоча управління фокусною відстанню об'єктива відбувається по команді процесора, фактично налаштована фокусна відстань на етапі експлуатації камери може бути невідома. В такому випадку доводиться використовувати спеціальні датчики для його визначення [12] або оцінювати фокусну відстань по зображенню з відеокамери безпосередньо в процесі експлуатації [13].

Іншим прикладом служить підводна зйомка, яка вносить додаткові спотворення, відсутні в надводній зйомці: відбувається переломлення світла на межі двох середовищ (водної та повітряної) відповідно до закону Снеллиуса. Припускаючи, що оптична вісь камери перпендикулярна до площини камери, заломлення світла на межі двох середовищ буде радіально-симетричне до принципової точки [14]. Тому спотворення, викликане розділом двох середовищ, можна врахувати в радіальній компоненті в параметрах камери. Однак це призводить до необхідності зйомки калібрувального об'єкта під водою, що не завжди виправдано, особливо в умовах жорсткого обмеження сеансу підводної зйомки. Проблема посилюється тим, що в різних водоймах показник заломлення може бути різним, а, отже, поправка, знайдена для однієї водойми, не підійде для іншого. Те ж може бути вірно і для одної водойми, якщо, наприклад, в ньому змінюється показник солоності або температури води [15]. Виходить, що в разі стандартного калібрування потрібно виконувати калібрування камери при кожному її зануренні під воду.

Тому паралельно з калібруванням з використанням спеціального калібрувального шаблону розвивається і калібрування безпосередньо із зображень сцени.

2.2 Автокалібрування

Методи автокалібрування також можна розділити на групи, наприклад, по мінімальній кількості зображень, необхідних для оцінки параметрів спотворення: чи достатньо одного зображення або потрібно кілька.

2.2.1 Автокалібрування за кількома зображеннями сцени

Для випадку декількох зображень параметри дисторсії оцінюються шляхом знаходження відповідностей між зображеннями однієї і тієї ж сцени і рішення задачі калібрування з урахуванням обмежень епіполярної геометрії.

Першим, хто запропонував одночасну оцінку параметрів калібрування і пошук 3D-координат особливих точок в сцені був Жанг [16]: якщо точки p і p' є стереопарою, а точки p_d і p'_d — їх образи на зображеннях з дисторсією, тоді існує така матриця F , для якої справедливо:

$$p^T F p' = 0 \quad (1.28)$$

де $p = p_d \frac{d(r_d)}{r_d}$, $p' = p'_d \frac{d(r_d)}{r_d}$, $d(r_d)$ — однопараметрична поліноміальна модель корекції дисторсії виду (1.14).

Тоді оцінка k_1 може бути сформульована як мінімізація функціоналу:

$$\min_{k_1, f} g^2(x_i, y_i, x'_i, y'_i) \quad (1.29)$$

де

$$g(x, y, x', y') \equiv p^T F p' = 0$$

f — вектор, що містить елементи матриці F , (x_i, y_i, x'_i, y'_i) — i -а відповідність між парами точок на двох зображеннях.

Для зменшення простору параметрів, спочатку оцінювався вектор f , потім k_1 . Для оцінки f використовувався алгоритм Левенберга-Марквардта, який мінімізує відстань між точками і епіполярними лініями, як описано в [17]. Для оцінки k_1 використовувався метод Нелдера-Міда [18]. В іншій роботі [19] завдання (1.28) формулюється як Quadratic eigenvalue problem:

$$(k_1^2 M + k_1 C + K) f = 0 \quad (1.30)$$

де M, C, K — вектора, елементи яких є функції від координат p_d, p'_d .

В роботі [20] завдання (1.28) узагальнюється на безліч пар зображень Ω_i :

$$\min_{k_1} \left| \sum_{\Omega_i} \sum_{\Omega_p} |p^T F p'| \right| \quad (1.31)$$

У наведених вище прикладах при оцінці параметрів дисторсії по послідовності зображень враховують обмеження епіпольярної геометрії в умовах невідомого руху камери між кадрами. Однак в ряді випадків рух камери може бути відомо (наприклад, коли камера встановлена на борту безпілотного літаючого засобу, оснащеного інерційними датчиками). В цьому випадку можна використовувати аналогічний підхід до калібрування, але в умовах відомого руху між кадрами [21].

2.2.2 Автокалібрування по одиничному зображенню сцени

Всі методи калібрування радіальної дисторсії покадрово засновані на припущенні, що ідеальне зображення містить якісь закономірності, які порушуються в спотвореному зображенні. Перш за все зазначимо роботу [22], автори якої розглядають зображення плоского об'єкта, що містить регулярну текстуру, як матрицю, чий ранг мінімізується при компенсації спотворень. Сюди ж відноситься і робота [23], параметри спотворення в якій оцінюються в частотній області, виходячи з припущення, що зображення містить однорідну структуру.

З огляду на специфічність даних методів, належного розвитку вони не отримали.

Більшого розвитку набув підхід, заснований на припущенні, що дугоподібні лінії на зображенні були прямими до свого проектування на площину зображення.

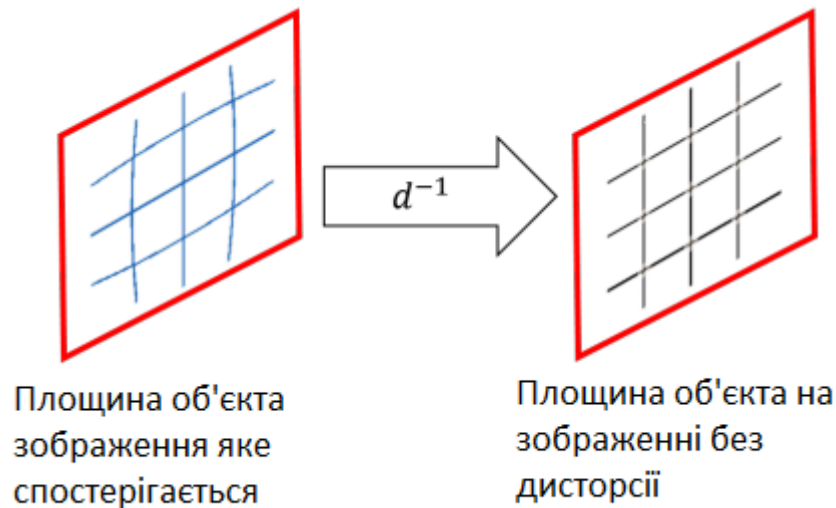


Рисунок 1.5 — Завдання автокалібрування: є спостережуване зображення з дугоподібними лініями і здійснюється пошук такого перетворення, зворотне до якого дасть ідеальне зображення.

У групі робіт [24-29] дуги на зображенні наближаються кривими другого порядку, рівняння для яких виводиться через зв'язок рівняння кривої першого порядку і однопараметричної моделі компенсації радіальної дисторсії виду (1.15).

Нехай пряма на зображенні ідеальної проекції задається рівнянням:

$$y = kx + b \quad (1.32)$$

Внаслідок радіальної дисторсії пряма трансформується в дугу, яка лежить на окружності, яка задається рівнянням загального вигляду:

$$\frac{y_d}{1+k_1 r_d^2} = k \frac{x_d}{1+k_1 r_d^2} + b \quad (1.33)$$

або

$$x_d^2 + y_d^2 + \frac{k}{bk_1} x_d - \frac{1}{bk_1} y_d + \frac{1}{k_1} = 0 \quad (1.34)$$

Якщо центр радіальної дисторсії знаходиться не на початку координат, то рівняння (1.34) перетвориться в:

$$(x_d - x_0)^2 + (y_d - y_0)^2 + \frac{k}{bk_1} (x_d - x_0) - \frac{1}{bk_1} (y_d - y_0) + \frac{1}{k_1} = 0 \quad (1.35)$$

яке після спрощення прийме наступний вигляд:

$$(1.36)$$

$$x_d^2 + y_d^2 + \left(\frac{k}{bk_1} - 2x_0\right)x_d + \left(-\frac{1}{bk_1} - 2y_0\right)y_d + x_0^2 + y_0^2 - \frac{k}{bk_1}x_0 + \frac{1}{bk_1}y_0 + \frac{1}{k_1} = 0$$

Підставивши

$$A = \frac{k}{bk_1} - 2x_0$$

$$B = -\frac{1}{bk_1} - 2y_0 \quad (1.37)$$

$$C = x_0^2 + y_0^2 - \frac{k}{bk_1}x_0 + \frac{1}{bk_1}y_0 + \frac{1}{k_1}$$

виходить рівняння дуги виду

$$x_d^2 + y_d^2 + Ax_d + By_d + C = 0 \quad (1.38)$$

і рівняння центру кола

$$x_0^2 + y_0^2 + Ax_0 + By_0 + C - \frac{1}{k_1} = 0 \quad (1.39)$$

Таким чином, вибравши n дуг на зображенні ($n > 3$) і визначивши параметри A_i , B_i , C_i , можна обчислити центр радіальної дисторсії через систему лінійних рівнянь виду (1.39), а потім обчислити параметр дисторсії k_1 .

Запропонований підхід залежить від вибору дуг, а також від способу їх детекції на зображенні. Тому роботи [24-29] використовують схожий принцип, але різняться в методах детекції границь об'єктів, вибору дуг і їх наближенні кривими другого порядку.

У роботах [30; 31] дуги моделюються як впорядковані групи відрізків, які, імовірно, відповідають прямим лініям в реальному світі. Пошук параметрів радіальної дисторсії в цьому випадку здійснюється шляхом мінімізації величин кутів між відрізками.

Ряд інших робіт спрямований на одночасну оцінку параметрів радіальної дисторсії і координат точок збігання [32-34]. В такому випадку знайдені на зображенні дуги можна піддати більш складній фільтрації і вибрати для оцінки параметрів дисторсії ті дуги, які найімовірніше породжені паралельними в сцені прямими лініями.

Невдалий пошук дуг на першому етапі перерахованих алгоритмів у багато чому знецінює результати наступних етапів, тому одночасно з цим напрямком отримав розвиток і підхід, при якому криві на зображенні не відбираються явно. В цьому випадку перебираються усі можливі параметри на деякій сітці параметрів, а вибір найкращих параметрів здійснюється шляхом аналізу деякого побудованого функціоналу в просторі параметрів над виділеними на зображенні межами.

Так, в роботах [35; 36] автори виконують пробні компенсації спотворень з різними параметрами і оцінюють ступінь прямолінійності країв на отриманих зображеннях за допомогою перетворення Хафа і аналізу отриманого Хаф-образу. У роботах [37; 38] також виконуються пробні компенсації, але замість перетворення Хафа обчислюється гістограма орієнтованих градієнтів. Це аргументується тим, що перетворення Хафа є обчислювально надмірно трудомістким. У роботах [39-42] двомірний простір Хафа розширюється до тривимірного введенням ще однієї розмірності, пов'язаної з параметром радіального спотворення, а потім шуканий параметр радіальної дисторсії вибирається шляхом аналізу отриманого розширеного Хаф-образу. Запропоновані методи менш чутливі до результату роботи детекторів країв, проте їх застосування обмежене діапазоном можливих параметрів і кроку дискретизації по сітці параметрів.

3 АНАЛІЗ МОДЕЛІ ДИСТОРСІЇ БРАУНА. ВПЛИВ ДИСТОРСІЇ НА ПРЯМІ ЛІНІЇ

В цій главі проаналізуємо модель дисторсії Брауна з метою встановити можливі обмеження даної моделі. Також досліджується поведінка прямих в результаті дії радіальної дисторсії і внесок кожної такої прямої в оцінку параметрів радіального спотворення.

3.1 Обмеженість моделі Брауна з малою кількістю коефіцієнтів

Розглянемо однопараметричну модель дисторсії:

$$d(r) = r(1 + k_1 r^2) \quad (3.1)$$

Ця функція не є монотонною у випадку негативної дисторсії ($k_i < 0$) та буде мати екстремум у точці:

$$r^2 = \frac{1}{-3k_1} \quad (3.2)$$

З цього випливає:

1. Розмір кадру у якому ми можемо розглядати позитивну ($k_i > 0$) дисторсію необмежений;
2. Розмір кадру у якому ми можемо розглядати негативну ($k_i < 0$) дисторсію, обмежений величиною $r^2 = \frac{1}{-3k_1}$ в площині не спотвореного зображення;

Розглянемо двопараметричну модель дисторсії:

$$d(r) = r(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) \quad (3.3)$$

Для того, щоб данна модель дисторсії не мала екстремумів, необхідно, щоб рівняння:

$$d(r) = 1 + 3k_1 r^2 + 5k_2 r^4 = 0 \quad (3.4)$$

не мало рішення, тобто, щоб його дискримінант був < 0 :

$$9k_1^2 - 20k_2 < 0 \quad (3.5)$$

або щоб корені рівняння (3.4) були негативними:

$$r^2 = \frac{-3k_1 \pm \sqrt{9k_1^2 - 20k_2}}{10k_2} < 0 \quad (3.6)$$

Розглянемо при яких умовах k_1, k_2 остання умова буде виконуватися:

1. $k_1 > 0, k_2 > 0$: $0 < \sqrt{9k_1^2 - 20k_2} < 3k_1$ та обидва корені менше нуля;

2. $k_1 > 0, k_2 < 0$: $\sqrt{9k_1^2 - 20k_2} > 3k_1$. Рівняння (3.4) має одне

$$\text{рішення: } r^2 = \frac{-3k_1 - \sqrt{9k_1^2 - 20k_2}}{10k_2};$$

3. $k_1 < 0, k_2 > 0$: $0 < \sqrt{9k_1^2 - 20k_2} < -3k_1$, таке рівняння дає два рішення та неоднозначність поведінки функції $r_d(r)$ починається

$$\text{при } r^2 = \frac{-3k_1 - \sqrt{9k_1^2 - 20k_2}}{10k_2};$$

4. $k_1 < 0, k_2 < 0$: $\sqrt{9k_1^2 - 20k_2} > -3k_1$. Рівняння (3.4) має одне

$$\text{рішення: } r^2 = \frac{-3k_1 - \sqrt{9k_1^2 - 20k_2}}{10k_2}$$

З цього робимо висновки, що:

1. Розмір кадру у якому ми можемо вивчати дисторсію,

необмежений при $k_1 < 0, k_2 > 0$ або при $k_2 > \frac{9}{20}k_1^2$;

2. В інших випадках розмір кадру у якому ми можемо вивчати

дисторсію, обмежений величиною $r^2 = \frac{-3k_1 - \sqrt{9k_1^2 - 20k_2}}{10k_2}$ в

площині неспотвореного зображення.

На рисунках 3.1 та 3.2 зображена залежність $d(r)$ від τ у просторі зображення під дією позитивної та негативної дисторсії для однопараметричної та двопараметричної моделі дисторсії. Горизонтальна пунктирна лінія показує радіус інформативної області з центром який співпадає з центром дисторсії.

При побудові графіку на рисунку 3.1 використовувалась модель дисторсії виду (1.14) з $k_1 = 2$ для однопараметричної моделі та $k_1 = 2, k_2 = 0.9$ для двопараметричної моделі. Координати зображення нормувалися на діаметр зображення зі сторонами близькими до 4900 x 6500 та радіус цільової області бралися як 1.0 від радіусу вхідного зображення.

Для побудови графіку на рисунку 3.2 використовувалась аналогічна модель дисторсії з параметрами $k_1 = 0.9$ і $k_1 = 1.1, k_2 = 0.86$. Координати зображення нормувалися на діаметр зображення зі сторонами 1280 x 960 та радіусом цільової області 0.8 від радіусу вхідного зображення.

З графіків видно, що ці дві моделі майже не відрізняються у межах цільової області.

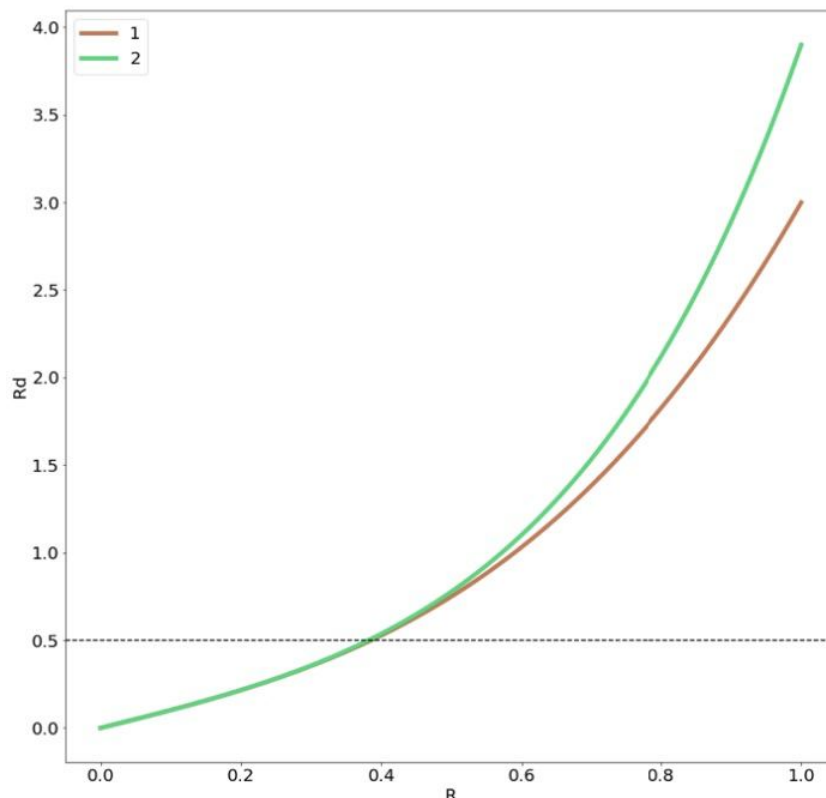


Рисунок 3.1 — Порівняння двох моделей позитивної дисторсії

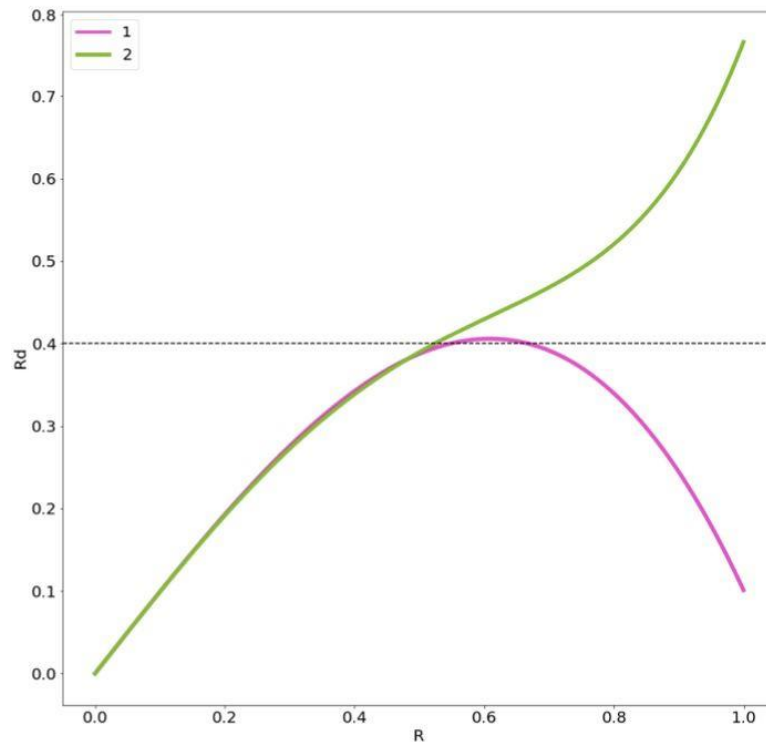


Рисунок 3.2 — Порівняння двох моделей негативної дисторсії

3.2 Залежність кривизни ліній від їх положення на зображенні

Більшість дугоподібних ліній на зображенні яке пошкоджене дисторсією, були прямими у вхідному зображенні, але набули кривизну внаслідок дисторсії. Спробуємо розглянути як дисторсія впливає на викривлення прямих.

Будемо розглядати тільки вертикальні прямі, оскільки спотворення залежить тільки від відстані точки до центру кадру. Беремо центр зображення рівним $(0,0)$ та обійдемо розглядом тільки координатних четвертин, які мають позитивну вісь абсцис.

Координати (x, y) кожній такій прямій будемо задавати наступним рівнянням:

$$x = a, y = t, a \geq 0, t \in [-500, 500] \quad (3.7)$$

Подивимося у що перейде така пряма у однопараметричній моделі дисторсії виду (3.1). Результат дії k_1 на пряму $x = a$ позначимо як:

$$(x_d(t), y_d(t)) = d_{k_1}(a, y(t)) \quad (3.8)$$

Результатом такої дії для декількох значень k_1 при різних a приведений на рисунку 3.3, де a в діапазоні $[0, 500]$ з кроком 100 при ідеальних розмірах зображення (1000 x 1000), а k_1 приймає значення 0.9 та 1.4. Параметри дисторсії були нормовані заздалегідь відповідно розділу 1.7.

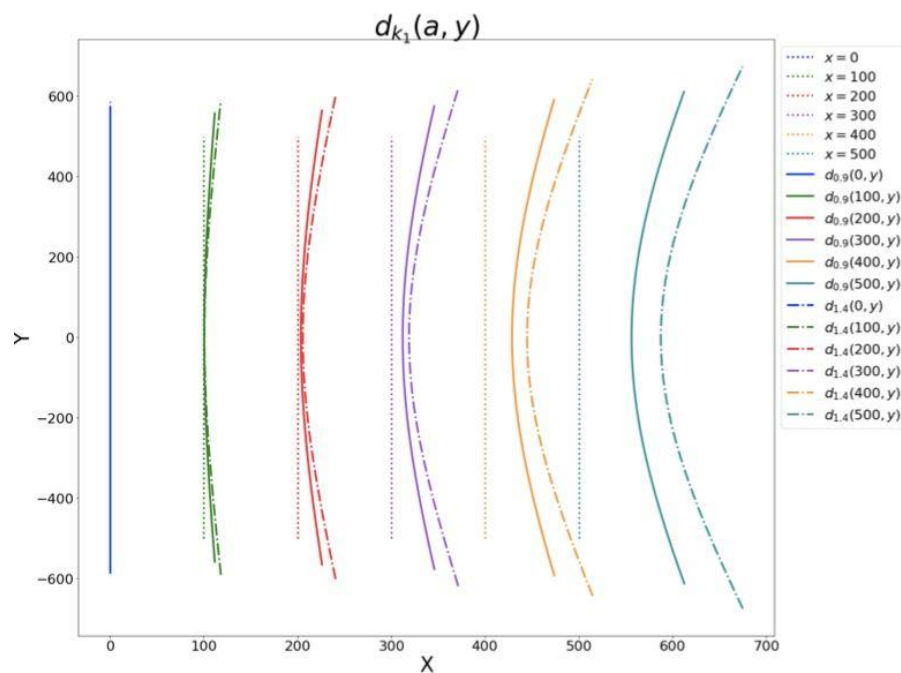


Рисунок 3.3 — Результат впливу k_1 на набір рівновіддалених ліній $x = a$, розмір ідеального зображення дорівнює 1000 x 1000.

Видно, що крива $d_{k_1}(a, y)$ збільшує кривизну зі збільшенням a при фіксованому k_1 , а якщо фіксоване a , то кривизна зростає зі збільшенням k_1 .

В реальних умовах прямолінійні відрізки такі як букви на зображеннях тексту, будинки або фрагменти вулиць, можуть бути малі за розміром та прямолінійність усіх реальних відрізків дуже приблизна. Сама дисторсія зазвичай не вкладається точно у рамки тих моделей, які ми розглядаємо.

Але, навіть при досить великій дисторсії прямі $x = a$, які знаходяться на малій відстані a від оптичної вісі зображення, перейдуть в «майже прямі», тому при побудові формули загальної дисторсії на зображеннях внесок кривих, які розміщені далі від центру, буде помітно вище.

4 ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНЕ ДОЛІДЖЕННЯ ОПИСАНИХ АЛГОРИТМІВ

4.1 Обчислення зворотного перетворення координат при радіальній дисторсії.

Запропонована процедура для пробного відновлення зі збереженням інтеграла інтенсивності по зображенню вимагає обчислення перетворення координат, зворотного до (1.14).

Нехай дано зображення l_d , спотворене радіальною дісторсією з відомим набором параметрів \tilde{k} .

Підставимо $r_d = \sqrt{x_d^2 + y_d^2}$ і перепишемо рівняння (1.14) в наступному вигляді:

$$r_d = d'(r) = r(1 + \sum_{i=1}^n k'_i r^{2i}) \quad (4.1)$$

Знайдемо перетворення яке масштабує з коефіцієнтом k_0 , що зберігає радіус нерухомою кола:

$$k_0 d'^{-1}(r_{\text{крит}}) = r_{\text{крит}} \quad (4.2)$$

С урахуванням масштабування з коефіцієнтом k_0 і заміни $k_i = k_0 k'_i$ для $i > 0$ перетворення координат (4.1) набуває вигляду:

$$r_d = d(r) = r(\sum_{i=0}^n k_i r^{2i}) \quad (4.3)$$

Рівняння (4.3) не має аналітичного рішення щодо r при $n > 1$, тому будемо шукати рішення чисельно. А оскільки зворотне перетворення з фіксованими параметрами дисторсії потрібно обчислювати багаторазово (трудомісткість пропорційна площі зображення), розумно одного разу побудувати наближену модель зворотного перетворення і користуватися нею замість чисельного рішення рівняння (4.3) в кожній точці.

В зв'язку з тим, що перетворення радіальної дисторсії досить гладке, а точки відносно центру радіального спотворення зміщені симетрично, значення функції $r = d^{-1}(r_d)$ чисельно оцінювалось для m рівновіддалених один від одного значень r_d на ділянці $[0, r_{\text{крит}}]$ і використовувалася лінійна інтерполяція для обчислення r для всіх точок на вхідному зображенні.

4.2 Алгоритм автокалібрування фото

Будемо розуміти під межами на зображенні різкий перехід між двома різними рівнями яскравості. Прообразами таких меж на зображенні в тривимірному світі служать межі забарвлення, заломі поверхонь і розриви глибини (таке відбувається, коли один предмет ближче до камери, ніж інший). Детектуються такі межі зазвичай з використанням детекторів хребтових структур [43] або детекторів країв [44-46].

Такі границі на зображенні переважно прямолінійні, якщо вони породжуються предметами, зробленими людиною і носять переважно побутовий характер, а не естетичний: стики стін, краї столу, монітора, смуги дорожньої розмітки і т.д. Однак внаслідок радіальної дисторсії ці кордони спотворюються.

Запропонований алгоритм відновлення буде виходити саме з цього припущення: межі які спостерігалися на зображенні були прямими в сцені, але набули кривизну в результаті дії радіальної дисторсії. В такому випадку виправлення, близьке до правильного, дасть зображення, межі якого в більшості своїй стали прямими.

Для пошуку такого виправлення алгоритм виконує ряд тестових відновлень вхідного зображення і вибирає серед них те, на якому межі виглядають найбільш прямими. Для цього порівнюються Хаф-образи зображень кордонів, відновлених зображень. Порівняння здійснюється наступним чином: спочатку обчислюється оцінка прямолінійності для кожного пучка паралельних меж під певним нахилом, потім обчислюється загальна оцінка прямолінійності для всього зображення. Відновлення, для якого оцінка по модулю максимальна, вважається правильним.

4.2.1 Виправлення дисторсії при відомих фіксованих параметрах

Нехай дано зображення l_d , спотворене радіальною дисторсією. Відомо, що дисторсія на l_d описується моделлю Брауна виду (1.14) з відомими параметрами $\tilde{k} = k_i, (i = 1, \dots, n)$.

Розглянемо задачу формування зображення I з скомпенсованою радіальною дисторсією.

Для кожного пікселя з координатами (x, y) на формованому зображенні I здійснимо геометричне перетворення координат за формулою (1.14) з набором параметрів \tilde{k} . Значення яскравості на пікселі з координатами (x_d, y_d) на спотвореному зображенні l_d буде шуканим значенням на пікселі на формованому зображенні I . При цьому, оскільки зображення l_d задано тільки в вузлах цілочислової сітки координат, для нецілих значень x_d і y_d цілочисельні значення повинні бути отримані шляхом інтерполяції функції l_d .

Звернемо увагу, що для отримання зображення з скомпенсованою дисторсією виявилось достатнім використання тільки прямого перетворення координат (1.14).

4.3 Тестування запропонованих алгоритмів

Для тестування запропонованих алгоритмів використовувалися поодинокі зображення. Зображення були отримані камерами з різними калібрувальними об'єктивами. В той час як при зйомці одиночних зображень сцени кожен кадр вже брався максимально «інформативним».

Зображення містили знімки з тривимірними сценами, що містять прямі лінії, всередині і поза приміщень. Характеристики отриманих зображень представлені в таблиці 1. Приклади тестових даних можна побачити на рисунку 3.1.

Зображення містять радіальні спотворення які викликані сферичною формою лінзи і тангенціальні спотворення, викликані похибками в установці лінзи паралельно площині зображення.

Оцінювати будемо якість компенсації дисторсії на ідеальних сітках, рівних за розміром вихідного зображення.

Для прикладу розглянемо способи корекції радіальної дисторсії за допомогою методу для якого потрібно знати параметри камери.

Таблиця 1 — Характеристика зображень які використовуються в алгоритмах

	Розширення зображення в пікселях	Формат зображення
рис. а)	750x500	.jpg
рис. б)	512x340	.jpg
рис. в)	1000x559	.png
рис. г)	600x337	.jpg
рис. д)	1000x667	.jpg

4.3.1 Алгоритм корекції при відомих параметрах камери.



а)



б)



в)



г)



д)

Рисунок 4.1 — Результат виконання алгоритму з відомими k_1, k_2 .

Даний алгоритм добре підходить для корекції дисторсії на зображенні, якщо заздалегідь відомі параметри камери та всі знімки зроблені на одну й ту саму камеру. Навіть якщо є недоліки в обробці по заданим параметрам k_1, k_2 їх досить просто скорегувати та отримати те зображення яке очікувалось. Ще недоліками є те, що не завжди ми знаємо всі параметри які нам потрібні, такий спосіб варто використовувати для поодиноких зображень або невеликої їх кількості. Даний алгоритм не потребує високотехнологічного обладнання та час виконання програми дуже малий, якщо порівнювати з алгоритмом «автокалібрування».

Таблиця 2 — Характеристики зображень після обробки

	Параметри k_1, k_2	Розширення зображення в пікселях	Формат зображення	Час роботи програми
рис. а)	-1.6, 2.56	750x500	.jpg	~1 хв.
рис. б)	-1, 1	512x340	.jpg	~1 хв.
рис. в)	-1.5, 2.25	1000x559	.png	~7 хв.
рис. г)	-1.8, 3.24	600x337	.jpg	~1 хв.
рис. д)	-1, 1	1000x667	.jpg	~3 хв.

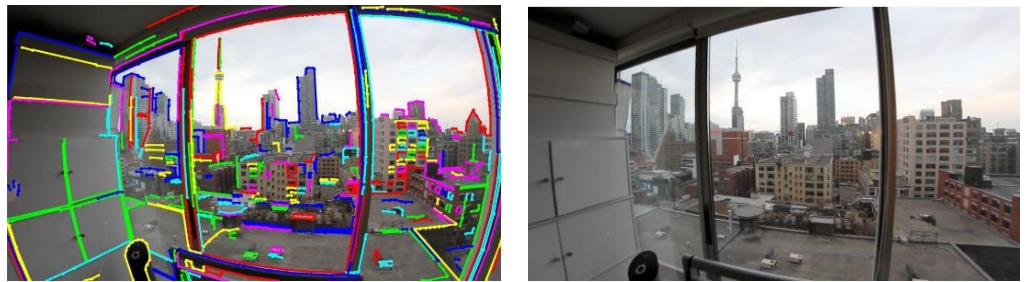
З таблиці видно, що час роботи програми залежить від формату зображення та від розширення в пікселях. Простий формат такий як .jpg — алгоритм обробляє близько 1-2 хвилин, але більш складні формати такі як .png — обробка складає близько 10 хвилин при розширенні HD.

Приклад коду у програмі MATLAB у Додатку А

4.3.2 Алгоритм корекції при невідомих параметрах камери.



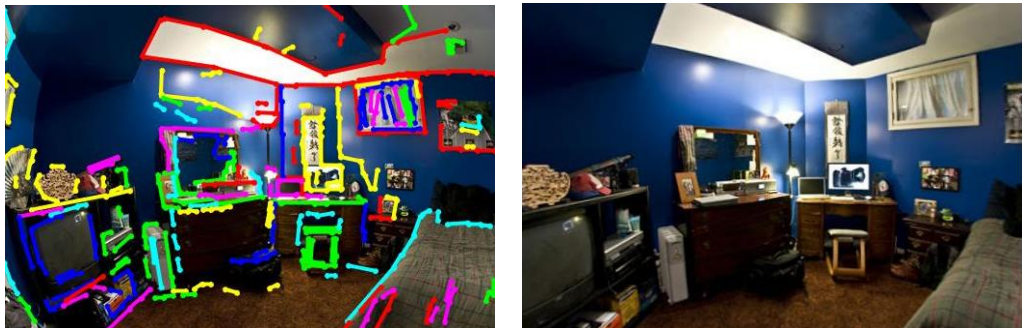
a)



б)



в)



г)

Рисунок 4.2 — Результат виконання алгоритму «автокалібрування» з невідомими k_1, k_2 .

Використовуючи алгоритм «автокалібрування», де програма сама знаходить параметри дисторсії k_1 , k_2 , одразу видно різницю в часі порівняно з алгоритмом вище. Цей метод більш підходить для обробки зображень з різних камер та об'єктивів, потребує новітнє обладнання та використовується в масовій обробці зображень на виробництві.

Таблиця 3 — Характеристики зображень після обробки

	Параметри k_1, k_2	Розширення зображення в пікселях	Формат зображення	Час роботи програми
рис. а)	автоматично	750x500	.jpg	~6 хв.
рис. б)	автоматично	512x340	.jpg	~5 хв.
рис. в)	автоматично	1000x559	.png	~18 хв.
рис. г)	автоматично	600x337	.jpg	~7 хв.
рис. д)	автоматично	1000x667	.jpg	~11 хв.

Тут також як і в Таблиця 2 — Характеристики зображень після обробки все залежить від формату зображення та від розширення, час роботи може збільшуватися в декілька разів.

Приклад коду у програмі MATLAB у Додатку Б

ВИСНОВКИ

Результати роботи полягають в наступному:

1. Був проведений аналітичний огляд сучасних методів калібрування радіальної дисторсії на зображеннях, які були отримані від невідомого джерела, були виявлені переваги та недоліки цих методів.
2. Був проведений аналіз поведінки однопараметричної та двопараметричної моделі дисторсії в площині зображення.
3. Досліджені геометричні перетворення прямих під дією радіальної дисторсії та були сформульовані загальні закономірності такого перетворення.
4. Розглянуто роботу алгоритму корекції радіальної дисторсії при відомих та невідомих параметрах камери на поодинокому зображенні.
5. Розроблені в дипломній роботі алгоритми реалізовані з можливістю їх впровадження в промислові системи розпізнавання.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Волосов, Д. Фотографическая оптика / Д. Волосов — М.: Искусство. — 1971.
2. Заказнов, Н. Теория оптических систем / Н. Заказнов, С. Кирюшин, В. Кузичев. — Машиностроение М., 1992.
3. Conrady, A. E. Decentred lens-systems / A. E. Conrady — Monthly notices of the royal astronomical society.
4. Brown, D. C. Decentering distortion of lenses / D. C. Brown — Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. — 1966.
5. Fitzgibbon, A. W. Simultaneous linear estimation of multiple view geometry and lens distortion / A. W. Fitzgibbon — Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.
6. Zhang, Z. A flexible new technique for camera calibration / Z. Zhang — IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. — 2000.— с. 1330—1334.
7. Calibration of camera intrinsic parameters using a single image / K. Yan — Proceedings of the 2017 International Conference on Robotics and Artificial Intelligence. — 2017. — с. 39—45.
8. Research of improved Zhang's calibration method / W. Yu — 2017 Chinese Automation Congress (CAC). — IEEE. 2017. — с. 1423—1427.
9. A robust detection method of control points for calibration and measurement with defocused images / W. Ding — IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. — 2017. — с. 2725—2735.
10. Zhao, Y. Method of camera calibration using concentric circles and lines through their centres / Y. Zhao, X. Wang, F. Yang — Advances in Multimedia. — 2018. — т. 2018.
11. Миронова, Т. В. Анализ деформаций, оптических неоднородностей и дисторсионных искажений с помощью искусственных спеклов в цифровой фотографии.

12. Wang, X. Real-time multi-target localization from unmanned aerial vehicles / X. Wang, J. Liu, Q. Zhou — *Sensors*. — 2017. — c. 33.
13. Automatic distortion correction of endoscopic images captured with wide-angle zoom lens / T.-Y. Lee — *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. — 2013. — c. 2603—2613.
14. Shortis, M. Calibration techniques for accurate measurements by underwater camera systems / M. Shortis — *Sensors*. — 2015.
15. Quan, X. Empirical equation for the index of refraction of seawater / X. Quan, E. S. Fry — *Applied optics*. — 1995. — c. 3477—3480.
16. Zhang, Z. On the epipolar geometry between two images with lens distortion / Z. Zhang // *Proceedings of 13th International Conference on Pattern Recognition*. 1996. — c. 407—411.
17. Luong, Q.-T. Matrice fondamentale et calibration visuelle sur l'environnement. Vers une plus grande autonomie des syst`eme robotiques. канд. / Luong Quang-Tuan. — 1992.
18. Nelder, J. A. A simplex method for function minimization / J. A. Nelder, R. Mead — *The computer journal*. — 1965. — c. 308—313.
19. Liu, X. Correcting large lens radial distortion using epipolar constraint / X. Liu, S. Fang — *Applied optics*. — 2014. — c. 7355—7361.
20. Lehtola, V. Radial distortion from epipolar constraint for rectilinear cameras / V. Lehtola, M. Kurkela, P. Rönholm — *Journal of Imaging*. — 2017.
21. A Simple and Efficient Method for Radial Distortion Estimation by Relative Orientation / Y. Duan — *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. — 2017. — c. 6840—6848.
22. Zhang, Z. Camera calibration with lens distortion from low-rank textures / Z. Zhang, Y. Matsushita, Y. Ma — *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2011 IEEE Conference on*. — IEEE. 2011. — c. 2321—2328.

23. Spitschan, B. Estimation of radial distortion using local spectra of planar textures / B. Spitschan, J. Ostermann — 2017 Fifteenth IAPR International Conference on Machine Vision Applications (MVA). — IEEE. 2017. — c. 472—477
24. Wang, A. A simple method of radial distortion correction with centre of distortion estimation / A. Wang, T. Qiu, L. Shao — Journal of Mathematical Imaging and Vision. — 2009. — c. 165—172.
25. Wu, F. Correction of image radial distortion based on division model / F. Wu, H. Wei, X. Wang // Optical Engineering. — 2017.
26. Robust Line-Based Radial Distortion Estimation From a Single Image / L. Zhang — IEEE Access. — 2019.
27. Bukhari, F. Robust radial distortion from a single image / F. Bukhari, M. N. Dailey — International Symposium on Visual Computing. — Springer. 2010. — c. 11—20.
28. Bukhari, F. Automatic radial distortion estimation from a single image / F. Bukhari, M. N. Dailey — Journal of mathematical imaging and vision. — 2013. — c. 31—45.
29. Zhang, X. DMS2015short-21: Robust radial distortion estimation using good circular arcs / X. Zhang, W. Liu, W. Xing — Journal of Visual Languages & Computing. — 2015. — c. 237—245.
30. Benligiray, B. Blind rectification of radial distortion by line straightness / B. Benligiray, C. Topal — 2016 24th European Signal Processing Conference (EUSIPCO). — IEEE. 2016. — c. 938—942.
31. Feasible Self-Calibration of Larger Field-of-View (FOV) Camera Sensors for the Advanced Driver-Assistance System (ADAS) / V. Kakani [и др.] — Sensors. — 2019. — c. 3369.
32. Grammatikopoulos, L. An automatic approach for camera calibration from vanishing points / L. Grammatikopoulos, G. Karras, E. Petsa — ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing. — 2007. — т. 62, № 1. — c. 64—76.

33. He, B. Camera calibration with lens distortion and from vanishing points / B. He, Y. Li — *Optical Engineering*. — 2009.
34. Wildenauer, H. Closed form solution for radial distortion estimation from a single vanishing point. / H. Wildenauer, B. Micusik — *BMVC*. — 2013.
35. Rosten, E. Camera distortion self-calibration using the plumb-line constraint and minimal Hough entropy / E. Rosten, R. Loveland — *Machine Vision and Applications*. — 2011. — с. 77—85.
36. Карпенко, С. М. Метод восстановления изображений, подверженных радиальной дисторсии / С. М. Карпенко, С. А. Гладилин, Д. П. Николаев — *Сборник трудов конференции Информационные технологии и системы* — 2008. — с. 502—505.
37. Kanuki, Y. Automatic compensation of radial distortion by minimizing entropy of histogram of oriented gradients / Y. Kanuki, N. Ohta, A. Nagai — *Pattern Recognition (ACPR), 2013 2nd IAPR Asian Conference on*. — 2013. — с. 912—916.
38. Kanuki, Y. Speeding up and performance evaluation of a fully automatic radial distortion compensation algorithm for driving assistance cameras / Y. Kanuki, N. Ohta — *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*. — 2015. — с. 1892—1895.
39. Radial lens distortion correction using cascaded one-parameter division model / X. Mei — *2015 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. — IEEE. 2015. — с. 3615—3619.
40. Simultaneously vanishing point detection and radial lens distortion correction from single wide-angle images / S. Yang — *Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2016 IEEE International Conference on*. — IEEE. 2016. — с. 363—368.
41. An iterative optimization algorithm for lens distortion correction using twoparameter models / D. Santana-Cedr'es — *Image Processing On Line*. — 2016. — с. 326—364.
42. Automatic Lens Distortion Correction Using One-Parameter Division Models / M. Alem'an-Flores — *Image Processing On Line*. — 2014. — с. 327—343.

- 43.Lindeberg, T. Scale-space / T. Lindeberg — Wiley Encyclopedia of Computer Science and Engineering. — 2007. — c. 2495—2504.
- 44.Canny, J. A computational approach to edge detection / J. Canny — IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. — 1986. — c. 679—698.
- 45.Mousavi, S. M. H. Analysis of a robust edge detection system in different color spaces using color and depth images / S. M. H. Mousavi, V. Lyashenko, S. Prasath — Computer Optics. — 2019.
- 46.SAR image edge detection via directional Bhattacharyya coefficient with its application on image segmentation / S. Fan — Eleventh International Conference on Machine Vision. — 2019.

ДОДАТОК А

```

function [ dst ] = UndistortImage( src, scale, k1, k2 )

if nargin < 4
    k2=0;
end

h = size(src,1);
w = size(src,2);

hu = h*scale;|
wu = w*scale;

dst = zeros(size(src),class(src));

for j = 1:hu
    for i=1:wu

        xu = (i - 0.5*wu)/w;
        yu = (0.5*hu - j)/w;

        rs = xu^2+yu^2;
        c = (k1*rs+k2*rs^2);
        xd = xu+xu*c;
        yd = yu+yu*c;

        id = int32(0.5*w + xd*w);
        jd = int32(0.5*h - yd*w);

        if (id<1 || id>w)
            continue;
        end
        if (jd<1 || jd>h)
            continue;
        end
        dst(j,i,:)=src(jd,id,:);

    end
end

end

```

ДОДАТОК Б

```

% Вибрати зображення
I = imread('Department Dataset/Image2_fixed.bmp');

% Виявлення груп сегментів ліній за допомогою EDPF + EDLines
lineGroups = getLineSegmentsFromImage(I);

% побудувати графік початкових сегментів рядка
plotTitle = '1 - All line segments';
plotLinesOnImage(I, lineGroups, plotTitle);

% фільтрація сегментів рядка
lineGroups = filterLineSegments(lineGroups, size(I), 25, 50);

% побудувати графік відфільтрованих сегментів ліній
figure;
plotTitle = '2 - Filtered line segments';
plotLinesOnImage(I, lineGroups, plotTitle);

% групування решти сегментів рядка
lineGroups = groupLineSegments(lineGroups, 800, 30);

% побудувати графік груп відрізків ліній
figure;
plotTitle = '3 - Line segment groups';
plotLinesOnImage(I, lineGroups, plotTitle);

% виберіть набір груп сегментів рядків з послідовним відбором назад
% ви можете прокоментувати цю частину, якщо сцена переважно лінійна,
% оскільки це займає близько 95% часу роботи
lineGroups = selectLineSegmentGroups(lineGroups, I);

% побудувати графік груп відрізків ліній
figure;
plotTitle = '4 - Selected line segment groups';
plotLinesOnImage(I, lineGroups, plotTitle);

% знайти параметри спотворення
funToSolve = @(x) getDistParamError(x, I, lineGroups);
[kParams, ~] = fminsearch(funToSolve, [0;0]);

% Спотворене зображення
IntrinsicMatrix = [1 0 0; 0 1 0; size(I, 2) / 2 size(I, 1) / 2 1];
radialDistortion = [kParams(1) kParams(2) 0];
cameraParams = cameraParameters('IntrinsicMatrix', IntrinsicMatrix,
'RadialDistortion', radialDistortion);
undistI = undistortImage(I, cameraParams);

% Вивести графік спотворених зображень
figure;
plotTitle = '5 - Undistorted image';
imshow(undistI);

```