МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА
НАУКОВО-НАВЧАЛЬНИЙ ІНСТИТУТ
КОМП'ЮТЕРНОЇ ФІЗИКИ ТА ЕНЕРГЕТИКИ
Кафедра комп'ютерної фізики

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломної роботи
за освітньо-кваліфікаційним рівнем магістр

«Алгоритм локального калібрування
для детектування об'єктів малого контрасту»

Виконав: студент 2 курсу, групи НФ-64
Корнійчук М.Т.
спеціальність:
105 Прикладна фізика та наноматеріали
освітня програма: Комп'ютерна фізика
Керівник: к.ф-м.н. Рогова С.Ю.

Рецензент:

Харків – 2022

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна

Навчально-науковий інститут комп'ютерної фізики та енергетики
Кафедра комп'ютерної фізики
Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) магістр
Спеціальність 105 Прикладна фізика та наноматеріали

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____Костянтин Нємченко

підпис

"____"_____2022 року

З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Корнійчук Микита Тимофійович

1.Тема роботи «Алгоритм локального калібрування для детектування об'єктів малого контрасту», керівник роботи: Рогова Світлана Юріївна, кандидат фізико-математичних наук, затверджені наказом по університету 21 грудня 2021 року № 0210–05/2288.

2. Строк подання студентом роботи: 12.05.2022.

3. Перелік питань, які потрібно розробити:

1. розглянути типи та задачі алгоритмів локального калібрування для детектування об'єктів малого контрасту;

2. дослідити ефективність запропонованого в дипломі методу покращення детектування об'єктів малого контрасту;

3. розробити математичні алгоритми для реалізації запропонованого методу;

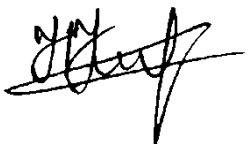
4. розробити програмне забезпечення програмно-апаратного комплексу;

5. провести тестування роботи програми та визначити якість запропонованих методів.

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Вибір теми, узгодження, а також затвердження її на кафедрі
2	Робота над літературою та іншими джерелами
3	Затвердження теми на кафедрі
4	Написання вступу до роботи та першого розділу
5	Написання другого розділу
6	Написання третього розділу
7	Завершення написання дипломної роботи (висновки та література)
8	Подача науковому керівнику
9	Відгук, рецензія, підготовка до захисту
10	Попередній захист
11	Захист

5.Дата видачі завдання

Студент  Микита КОРНІЙЧУК

Керівник роботи _____ Світлана РОГОВА
підпис

РЕФЕРАТ

Корнійчук Микита «Алгоритм локального калібрування для детектування об’єктів малого контрасту»

Кваліфікаційна робота магістра з прикладної фізики. – Х.: ХНУ імені В. Н.Каразіна, 2022. – 61 с.

У роботі розглянути типи та задачі алгоритмів локального калібрування для детектування об’єктів малого контрасту в великій кількості різноманітних системах детектування. Шляхом одночасного застосування було проведено порівняння низки методів калібрування передаточних функцій яскравості з ціллю вибору найкращого з запропонованих алгоритмів. Як результат було показано ефективність методу локального калібрування в послідовних діапазонах яскравості.

Під час виконання дипломної роботи досліджувалась ефективність запропонованого в дипломі методу покращення детектування об’єктів малого контрасту у порівнянні з іншими методиками калібрування детекторів зображень. Як результат дипломної роботи був розроблений математичний алгоритм для реалізації запропонованого методу, який ураховував особливості нелінійної системи детектування в широкому динамічному діапазоні. Цей алгоритм був застосований у програмному забезпеченні, яке є частиною програмно-апаратного комплексу обробки зображень. Було проведено практичне тестування роботи програми на реальних зображеннях та визначена висока якість запропонованих методів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: КАЛІБРУВАННЯ, ПІКСЕЛЬ, КОНТРАСТУВАННЯ, ПЕРЕДАТОЧНА ФУНКЦІЯ, ВИРІВНЮВАННЯ ЯСКРАВОСТІ

РЕФЕРАТ

Корнейчук Никита «Алгоритм локальной калибровки для детектирования объектов малого контраста»

Квалификационная работа магистра по прикладной физике. – Х.: ХНУ имени В. Н.Каразина, 2022. – 61 с.

В работе рассмотреть типы и задачи алгоритмов локальной калибровки для детектирования объектов малого контраста в большом количестве различных систем детектирования. Путем одновременного применения было проведено сравнение нескольких методов калибровки передаточных функций яркости с целью выбора наилучшего из предложенных алгоритмов. Как результат была показана эффективность метода локальной калибровки в последовательных диапазонах яркости.

При выполнении дипломной работы исследовалась эффективность предложенного в дипломе метода улучшения детектирования объектов малого контраста по сравнению с другими методиками калибровки детекторов изображений. Как результат дипломной работы был разработан математический алгоритм для реализации предложенного метода, учитывающий особенности нелинейной системы детектирования в широком динамическом диапазоне. Этот алгоритм был применен в программном обеспечении, являющемся частью программно-аппаратного комплекса обработки изображений. Проведено практическое тестирование работы программы на реальных изображениях и определено высокое качество предлагаемых методов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: КОНТРАСТИРОВАНИЕ, КАЛИБРОВКА, ПИКСЕЛЬ, ПЕРЕДАТОЧНАЯ ФУНКЦИЯ, ВЫРАВНИВАНИЕ ЯРКОСТИ

ABSTRACT

Korneichuk Nikita "Local calibration algorithm for detecting objects of low contrast"

Master's qualification work in applied physics. - Kh.: KhNU named after V. N. Karazin, 2022. - 61 p.

In this paper, we consider the types and tasks of local calibration algorithms for detecting objects of low contrast in a large number of different detection systems. By simultaneous application, several methods for calibrating the brightness transfer functions were compared in order to select the best of the proposed algorithms. As a result, the effectiveness of the local calibration method was shown in successive brightness ranges.

When performing the thesis, the effectiveness of the method proposed in the thesis for improving the detection of low-contrast objects was studied in comparison with other methods for calibrating image detectors. As a result of the thesis, a mathematical algorithm was developed to implement the proposed method, taking into account the features of a nonlinear detection system in a wide dynamic range. This algorithm was applied in software that is part of the image processing software and hardware complex. Practical testing of the program operation on real images was carried out and the high quality of the proposed methods was determined.

KEYWORDS: CONTRASTING, CALIBRATION, PIXEL, TRANSFER FUNCTION, BRIGHTNESS EQUALIZATION

ЗМІСТ

ВСТУП.....8
1. ПРИНЦИПИ ТА ЗАДАЧІ КАЛІБРОВКИ ФІЗИЧНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ.....10
1.1.Основні проблеми та поняття.....10
1.2. Приклади застосування калібрування вимірювальних систем.....11
1.3. Алгоритм калібрування.....12
1.4.Результати вимірювань.....16
1.5. Різниці процедур калібрування та лінійності відклику.....18
2. Дослідження та використання сучасних методів калібрування.....22
2.1. Проблема оптимізації пикселів в високою лінійностю.....22
2.2. Методи калібрування.....27
2.3. Нестандартні методи калібрування. Метод зваженого голосування.....32
3. АЛГОРИТМ ЛОКАЛЬНОГО КАЛІБРУВАННЯ.....44
3.1. Поетапний опис аалгоритмуу локального калібрування.....44
3.2. Код програми та реалізація.....51
3.3. Задачі фільтрації.....53
ВИСНОВКИ.....58

ВСТУП

Актуальність теми.

У всіх сучасних приборах детектування зображень значення кольору на зображенні пов’язані з освітленістю зображення за допомогою нелінійної функції, яка називається радіометричною функцією відгуку. Оскільки ця функція залежить від діафрагми та витримки, інтенсивність зображення одного і того ж об’єкта може змінюватися під час отримання послідовності зображень через функцію автоматичної експозиції камери. Хоча це бажано для оптимального використання обмеженого динамічного діапазону більшості камер, це спричиняє проблеми для низки застосувань комп’ютерного зору.

У багатьох роботах автори пропонують методи оцінки радіометричної функції відгуку та застосовують їх до радіометрично вирівняних зображень, щоб значення кольорів були несуперечливими для всіх зображень послідовності. Такі підходи обчислюють функцію реакції, експозицію та зміни балансу білого між зображеннями (до деякої неоднозначності) для рухомої камери без будь-яких попередніх знань про експозиції. Вони показують продуктивність своїх алгоритмів, оцінюючи функцію відгуку на синтетичних зображеннях, а також на даних реального світу, використовуючи її для радіометричного вирівнювання зображень.

В цьому дипломі для досягнення поставленої мети визначені інші такі задачі: розглянути типи та задачі алгоритмів локального калібрування для детектування об’єктів малого контрасту в великій кількості різноманітних системах детектування. Шляхом одночасного застосування провести порівняння низки методів калібрування передаточних функцій яскравості з ціллю вибору найкращого з запропонованих алгоритмів, та в результаті роботи показати ефективність методу локального калібрування в послідовних діапазонах яскравості.

Під час виконання дипломної роботи досліджувалась ефективність запропонованого в дипломі методу покращення детектування об’єктів малого контрасту

Об’єкт дослідження – обробка зображень та комп’ютерний зір.

Предмет дослідження – алгоритми для нелокального вирівнювання яскравості за інтенсивністю.

Методи дослідження – математичні методи обробки даних, які дають змогу розробити нові алгоритми покращення зображень в задачах дефектоскопії.

Наукова новизна одержаних результатів.

– розроблений математичний алгоритм для реалізації методу локальної вирівнювання відклику, який ураховував особливості нелінійної системи детектування в широкому динамічному діапазоні.

– створено програмне забезпечення програму для реалізації методу, що запропонований в дипломі.

Практичне значення отриманих результатів:

– розроблений алгоритм був застосований у програмному забезпеченні, яке є частиною програмно-апаратного комплексу обробки зображень;

– було проведено практичне тестування роботи програми на реальних зображеннях та визначена висока якість запропонованих методів.

Структура і обсяг роботи. Магістерська робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 61 сторінок, із них основного тексту 58 сторінок, 15 рисунки за текстом, список використаних джерел із 27 найменувань на 3 сторінці.

1. ПРИНЦИПИ ТА ЗАДАЧІ КАЛІБРОВКИ ФІЗИЧНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

1.1.Основні проблеми та поняття

Стандартним методом визначення чутливості датчика зображення є побудова кривої середньої дисперсії шляхом побудови графіка середнього вихідного сигналу датчика проти дисперсії вихідного сигналу датчика для діапазону рівнів освітлення. Метод використовує той факт, що на рівнях сигналу, де дисперсія рівня сигналу переважає дробовий шум від приходу оптичних фотонів, дисперсія та рівні сигналу повинні бути рівними при вимірюванні в електронах. Цей факт зумовлений тім , що електрони, як і фонони є частинками, які треба описувати розподілом Пуассона, а основною властивістю цього розподілу, є той факт , що дисперсія відповідної випадкової величину дорівнює середньому.

Однак недоліком методу середньої дисперсії є те, що він передбачає, що чутливість не змінюється залежно від рівня сигналу, припущення, яке, як відомо, є недійсним для низьковольтних датчиків зображення. Накопичення електронів у вузлі накопичення заряду пікселя змінить ємність вузла, тому, коли вже присутня велика кількість електронів, додаткові електрони будуть мати меншу різницю в потенціалі вузла, ніж якби таку ж кількість додаткових електронів було додано, коли жодних електронів уже не було.

Залежна від сигналу зміна ємності призводить до нелінійної реакції транзистора, посилюючи сигнал у пікселі, що призводить до нелінійного виходу датчика. У наступному підрозділі чутливість буде визначена в повному динамічному діапазоні з урахуванням його нелінійності.

1.2. Приклади застосування калібрування вимірювальних систем

Лінійна цифрова вихідна реакція на вхідну інтенсивність яскравості є обов'язковою для датчика зображення в багатьох програмах, де продуктивність зображення залежить від абсолютних значень сигналу, таких як машинний зір і кількісне зображення [1].

Розроблено різні підходи для лінеаризації реакції випромінювання. Обробка поза чіпом зазвичай використовує поліноми або пошукову таблицю (LUT) для покращення лінійності систем зображення [2].

Щоб підвищити ефективність схеми та зменшити наступні обчислювальні задачі на м'якому рівні, багато зусиль з оптимізації лінійності також було витрачено на рівні мікросхеми, або з пікселя, або з схеми. Більша частина нелінійних властивостей пікселя спричинена нелінійним підсиленням вихідного повторювача та залежністю напруги інтеграційного конденсатора від області плаваючої дифузії. У багатьох роботах запропоновано новий дизайн пікселя, який використовує одно-каскадний операційний підсилювач замість звичайного повторювача джерела для керування ланцюгами навантаження. Цей тип структури пікселів може уникнути внесення нелінійності. Як приклад, прийнято тип пікселя ємнісного трансімпедансного підсилювача (CTIA) для реалізації високолінійного CIS шляхом передачі електронів у постійний конденсатор метал-ізолятор-метал (MIM) замість нелінійного інтеграційного конденсатора CFD. У порівнянні з CFD конденсатор MIM має невеликий коефіцієнт напруги. Ця структура може ще більше зменшити нелінійність, викликану нелінійним інтегруючим конденсатором. Обидві конструкції досягають кращої лінійності за рахунок шуму та коефіцієнта заповнення.

Як другий приклад, було розроблено вбудований метод цифрового калібрування для покращення лінійності CIS на системному рівні. Шляхом калібрування динаміки сигналу АЦП, пікселі можуть досягти нелінійності менше 0,06% після калібрування. Однак відкалібрований наростаючий

сигнал датчика зображення має фіксуватися в умовах постійного освітлення, що не завжди легко реалізувати.

У цьому підрозділі на основі запропонованого раніше методу калібрування дамо опис збільшення роздільної здатність АЦП та пропонуємо інший тип методу калібрування для покращення лінійності прототипного CMOS-датчика зображення. Цей новий метод калібрування має перевагу в тому, що він незалежний від будь-якого освітлення для захоплення каліброваного сигналу динаміки.

Масив датчиків зображення, що складається з 128 × 128 пікселів, виготовлено за процесом 0,18 мкм 1P4M CIS. Експериментальні результати показують 96% покращення лінійності запропонованого стандартного пікселя 4T в режимі пікселів і 33% покращення в режимі напруги.

1.3. Алгоритм калібрування

Для покращення лінійності запропонованого CIS досліджуються два методи калібрування. Принцип дії методу калібрування режиму пікселя (PM) є таким, що на якому піксель зчитується звичайним способом; VRST – це постійна напруга постійного струму, і період часу між двома сусідніми спадними фронтами визначає час експозиції. Нелінійна передатна функція між кількістю вхідних фотонів і кінцевим цифровим виходом (DO) АЦП зберігається в SRAM. Дані SRAM потім використовуються для попереднього спотворення рампи АЦП таким чином, що результуюча нелінійність АЦП компенсує нелінійну поведінку CIS .

Під час калібрування PM кількість фотонів, накопичених датчиком, змінюється за рахунок збільшення часу експозиції від одиниці TEXP до 4096 × TEXP при постійній інтенсивності світла. MIN – вхідний цифровий код ЦАП без калібрування, який рівномірно збільшується від 0 до 16383(214-1). Таким чином, ЦАП генерує лінійний сигнал наростання

VRAMP1. Цифровий вихід 12-розрядного АЦП фіксується протягом кожного часу експозиції. NIN – це послідовність експозиції, яка однаково збільшується від 0 до 4095. MIN_C_PM – це відповідна вихідна послідовність після відображення та інтерполяції. Процес відображення усуває помилки зміщення та посилення даних, зібраних із SRAM. Відкалібрований сигнал наростання VRAMP1_C_PM, згенерований ЦАП, який містить інформацію про нелінійності пікселя та схеми зчитування, використовується для погашення останніх нелінійностей.

У підрозділі представлено метод калібрування режиму напруги (VM), де фотодіод відключається шляхом вимикання транзистора TX, а декрементний періодичний наростаючий сигнал VRAMP2 додається до стоку транзистора RST. VRAMP2 імітує вихідний сигнал на плаваючу дифузійну область пікселя в режимі пікселя. Він має два значення, що відносяться до двох різних фаз звичайного пікселя. Монотонний зростаючий вихідний сигнал отримується за допомогою наступної схеми CDS. Цифрований за допомогою АЦП, кінцевий цифровий вихід містить інформацію про нелінійності схеми SF та зчитування. Аналогічно, калібрування режиму напруги засноване на функції передачі напруги між вхідним сигналом зміни напруги VRAMP2 і кінцевим цифровим виходом, починаючи з SF Після відображення та інтерполяції інкрементальна послідовність MIN_C_VM перетворюється ЦАП у новий сигнал наростання VRAMP1_C_VM, за допомогою якого можна компенсувати нелінійність SF та схеми зчитування. Хоча калібрування VM не може скасувати нелінійності, викликані фотодіодом та інтеграційним конденсатором у пікселі, воно має перевагу, що не залежить від будь-якого освітлення для захоплення каліброваного сигналу наростання.

Інші методи калібрування, які поєднують переваги методу режиму напруги з точністю методу піксельного режиму, досліджуються.

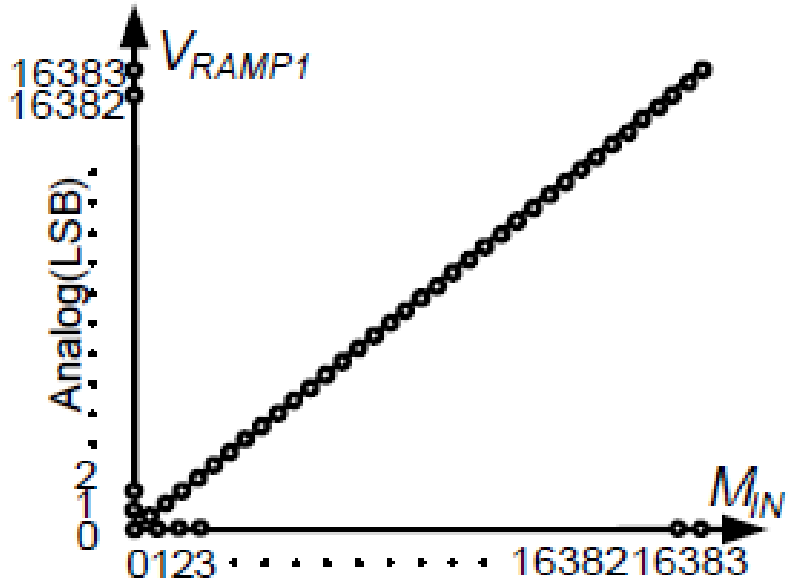


Рис.1. Приклад початкових даних

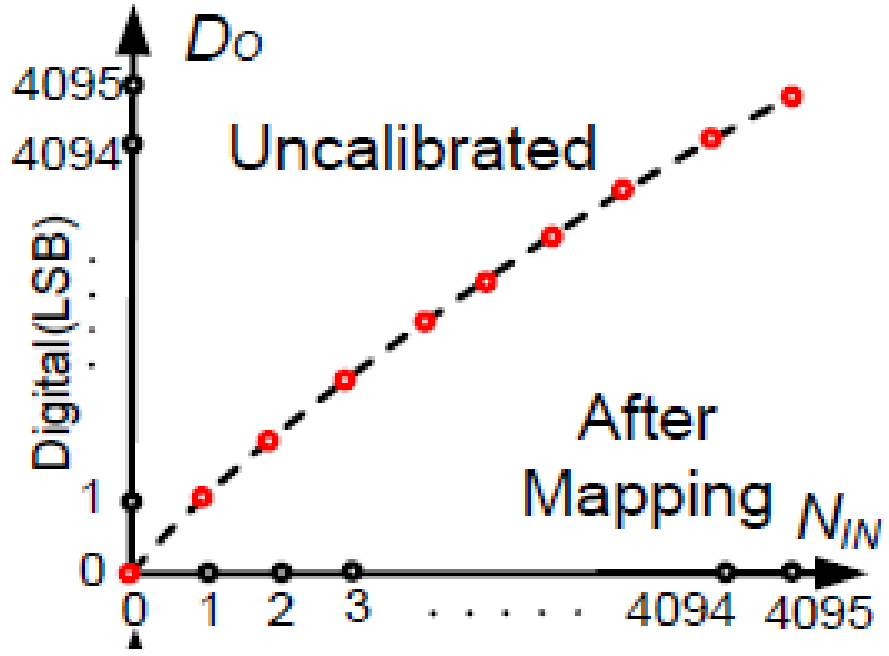


Рис.2. Приклад некаліброваної кривої

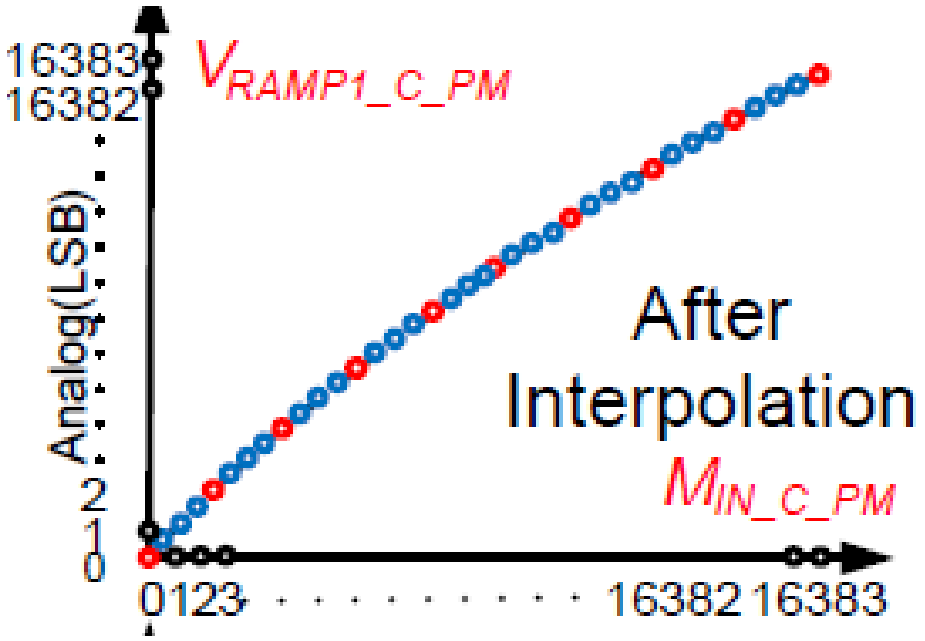


Рис.3. Приклад заповнення відсутньої інформації

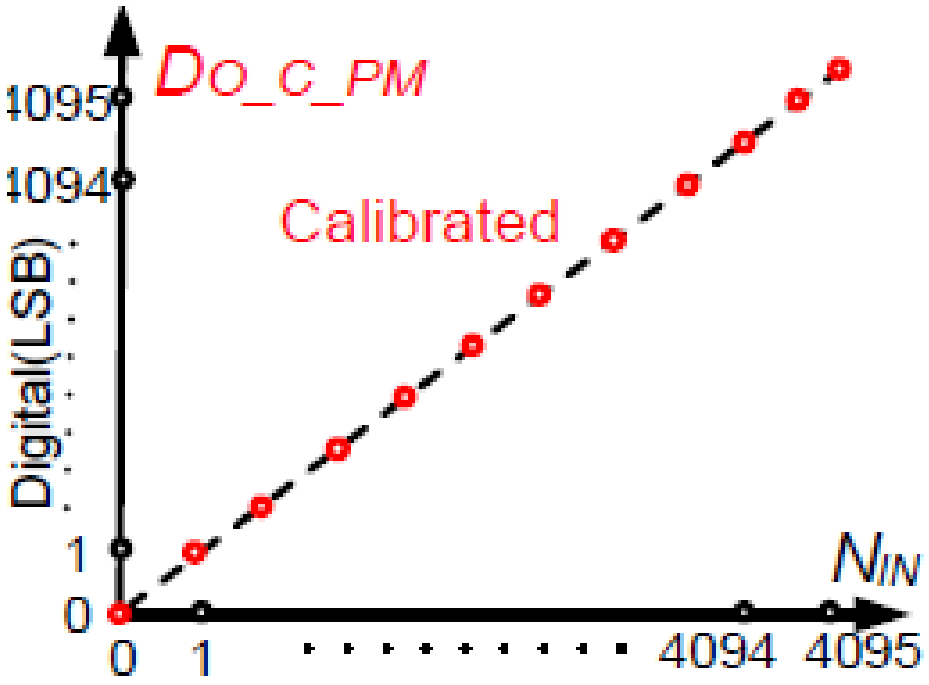


Рис.4. Приклад результату проведення калібрування.

1.4.Результати вимірювань

Під час експерименту шляхом подачі на вхід або зміни напруги, створеної ЦАП з більш високою роздільною здатністю, або низькочастотної синусоїди. У цій конструкції, враховуючи метод калібрування, для вимірювання нелінійності АЦП використовується зміна напруги, створена тим самим ЦАП. Результати вимірювання нелінійності містять нелінійність АЦП, а також ЦАП. Виміряні DNL та INL АЦП у стовпці показано на малюнку 7. Час аналого-цифрового перетворення становить 163,84 мкс з тактовою частотою 25 МГц і споживає лише 120 мкВт на колонку. За результатами вимірювання похибки DNL становлять -0,357/+0,368 LSB, а похибки INL -0,88/+1,963 LSB, що відповідає нелінійності 0,034%.

Характеристики нелінійності всіх АЦП в масиві наведені на малюнку 8. Усі канали мають нелінійність менше 0,052%.

Серед десятків піксельних дизайнів один тип пікселя V4 із низьким рівнем шуму вибрано, щоб продемонструвати ефективність запропонованого методу калібрування. Всі вимірювання проводяться з одиничним посиленням для колонкового підсилювача. Вольфрамова лампа забезпечує стабільне і постійне освітлення. Кількість фотонів, що надходять до датчика, змінюється шляхом лінійного збільшення часу експозиції. Усі оцінки лінійності виконуються за допомогою вікна, що містить 8×30 пікселів, усереднених за 100 знятих кадрів. Малюнок 9. (a) показує DNL

результати масиву Pixel V4. Чорна лінія показує результати вимірювань без калібрування, а червона та синя лінії представляють результати з калібруваннями PM та VM відповідно. Рисунок 9. (b) і (c) показують результати INL. За допомогою цих двох методів калібрування нелінійність пікселя V4 покращується з 0,68% до 0,46% і 0,026% відповідно. У порівнянні з калібруванням VM, ми досягаємо кращої лінійності за допомогою методу калібрування PM, оскільки він може повністю відкалібрувати нелінійність, викликану пікселем, особливо конденсатором

нелінійної інтеграції. Ці два методи калібрування також дійсні для інших типів пікселів.

На малюнку 10 показано покращення лінійності для кожного пікселя із запропонованими методами калібрування. Можна зробити висновок, що методи калібрування ефективні для кожного пікселя.

Вхідний посилений шум пікселя V4 як функція підсилення колонкового підсилювача зображено на Рис. 5. При високому посиленні колонкового підсилювача вхідний посилений шум пікселя V4 становить 145 мкВ при аналоговому посиленні 18 дБ.

На Рис. 5 показано зроблене зображення тестової діаграми, зроблене цим дизайном. Є 14 груп різних пікселів дизайну з різними коефіцієнти посилення перетворення та шуму, що робить відгук фотона нерівномірним.

У цьому підрозілі ми вивчили два різні методи калібрування для покращення лінійності CIS, реалізованих у процесі CIS 0,18 мкм. За допомогою калібрування CIS може досягти нелінійності менше 0,026%, що в 2 рази краще, ніж сучасні.

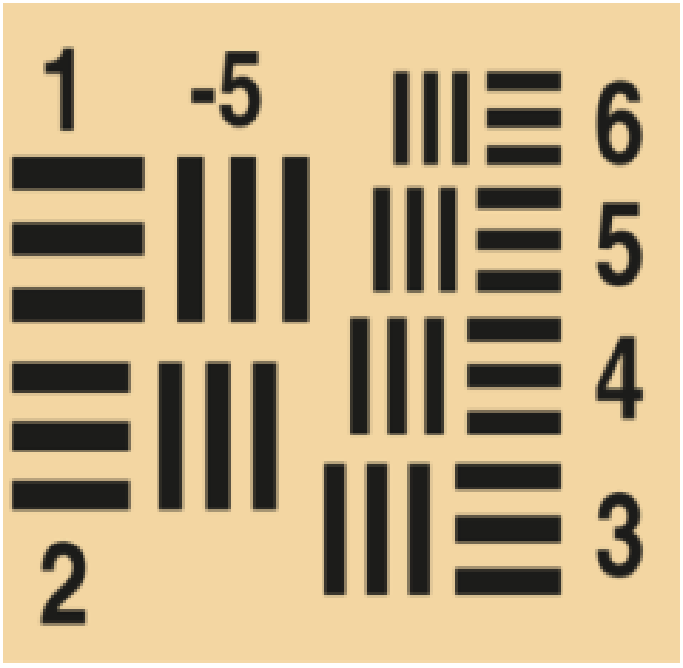


Рис.5. Оригінальний тест-об’єкт

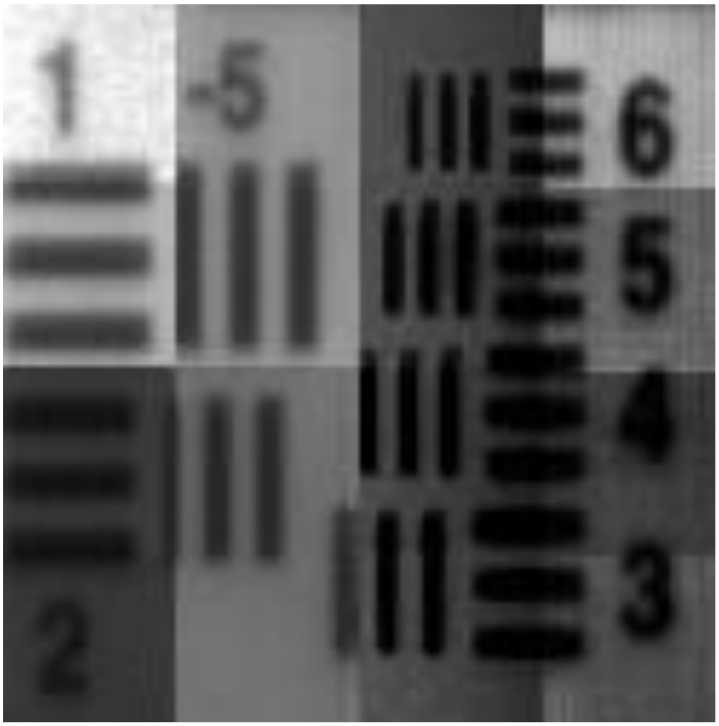


Рис.6. Зображення оригінального тест-об’єкту.

1.5. Різниці процедур калібрування та лінійності відклику

У цьому підрозділі ми обговоримо деякі принципи роботи систем обробки зображень, таких як скануючий електронний і скануючий зондовий мікроскоп. Ми поговоримо про поняття лінійності зображення та калібрування розмірів.

Як відомо, і скануючі електронні, і скануючі зондові мікроскопи генерують зображення шляхом переміщення зонда по поверхні зразка та запису відповідей на зонд. Отриманий шаблон відомий як растрове сканування, при якому зонд переміщується по всьому зразку в одному напрямку, потім трохи зміщується в ортогональному напрямку і сканування повторюється. Цей процес має відбуватися належним чином, щоб створити достовірне та правильне зображення досліджуваного зразка. Однією з причин для перевірки продуктивності системи є перевірка того, що процес растрового сканування працює правильно. Проблеми з цим процесом відображатимуться як спотворення зображення.

Метою мікроскопії є створення зображень, на яких можна точно виміряти особливості, навіть якщо точні вимірювання розмірів не використовуються. Це може здатися сміливим твердженням, але дозвольте мені пояснити. У скануючому мікроскопі осі сканування (напрям сканування та напрямок зсуву в растровому скануванні) очікуються ортогональними. Лінійна та ортогональна осі сканування створять зображення, у якому видимий розмір об’єкта однаковий незалежно від положення на зображенні. Якщо осі сканування перекошені (не зовсім ортогональні), то зображення буде спотворене, оскільки видиме положення певної точки не буде просто відповідати фактичному положенню на зразку – квадратна деталь на зразку буде відображатися як паралелограм, наприклад. Аналогічно, якщо сканування не є лінійними, збільшення зображення буде відрізнятися від точки до точки, оскільки процес формування зображення не є послідовним у зразку. Ці спотворення руйнують просту відповідність між кожною точкою на зображенні та кожною точкою на зразку. Простіше кажучи, це означає, що розмір і відносне розташування даного об’єкта залежатимуть від того, розташована вона зліва, в центрі чи в якомусь іншому місці зображення.

Тепер ми можемо зрозуміти, навіщо нам потрібне зображення з точністю розмірів. Навіть якщо нас не турбують фактичні вимірювання, ми все одно хочемо правильного і точного зображення досліджуваного предмета. Якщо зображення недостатньої якості, щоб забезпечити точні вимірювання, насправді воно не є хорошим відображенням зразка. Мікрофотографії не часто публікуються з приміткою, що вони «не в масштабі».

Нелінійність вимірювальних приладів (у тому числі мікроскопів) можна кількісно описати двома способами. "Нелінійність зображення" відноситься до вимірювань абсолютного положення об'єкта в зображенні. Для ілюстрації припустимо, що довжина сканування (повна шкала)

дорівнює 1,0 одиницям. Якщо об’єкт дійсно розташовано на півдорозі між початком і кінцем сканування (тобто в точці 0,50), а замість цього прилад повідомляє, що об’єкт розташовано в точці 0,51, то інтегральна неінеарність для цього вимірювання дорівнює 0,01 (або 1). % повної шкали). «Диференціальна нелінійність» відноситься до поділу пари ознак. Якщо дана пара ознак дійсно розділена одиницею 0,10, і прилад повідомляє про поділ 0,099, коли пара розташована біля початку сканування, і розділення 0,101, коли пара розташована ближче до кінця сканування, тоді диференціальна нелінійність становить 2 % (виражена у відсотках від поділу ознак).

Як правило, диференціальна нелінійність має більше значення, оскільки вимірювання відстані між занадто точками на зразку є суттю мікроскопії. Кожне зображення під мікроскопом є картою, що описує просторові відносини між різними ознаками зразка. Для зручності інтерпретації бажано, щоб це відображення було простим – ми хочемо, щоб зображення виглядало як екземпляр. Навіть якщо вимірювання не призначені, спотворення відносних відстаней між різними частинами зображення створює хибне враження про досліджуваний зразок. Це зменшує здатність зображення передавати значущу інформацію мікроскопісту.

Збільшення зображення, очевидно, пов’язане з лінійністю зображення, оскільки зміни збільшення зображення створюють спотворення. Однак лінійне зображення не гарантує правильного збільшення, а також відкаліброване збільшення в одній точці не гарантує, що воно буде відкалібровано в іншій точці. Якщо зображення має однакове збільшення в кожній точці, масштаб також є лінійним у кожній точці. Цей аргумент також можна змінити — якщо масштаб лінійний у кожній точці, то збільшення однакове в кожній точці — але в будь-якому випадку збільшення невідоме, поки не буде належним чином відкалібровано.

Єдиний спосіб гарантувати точне зображення - перевірити поле зображення в кожній точці за допомогою відомого посилання. Деякі калібрувальні зразки вимагають значної праці оператора для виконання цього аналізу. Простий у використанні зразок для калібрування забезпечить маркери по всьому зображенню. Реплики дифракційної решітки для зразка забезпечують зразок з цією характеристикою, як і калібрувальні зразки МОХТЕК. Окрім покриття всієї області зображення, важливо мати маркери калібрування, які легко інтерпретуються. Це, наприклад, слабкість мікросфер. Їх випадковий розподіл як за розміром, так і за місцезнаходженням ускладнює легкий і швидкий аналіз лінійності або збільшення зображення.

Правильна процедура полягає в тому, щоб створити зображення відповідного калібрувального зразка в робочих умовах, який буде використовуватися з вашим експериментальним зразком. Звичайна сітка або періодичні прямі лінії забезпечують зображення, яке ваше око може легко проаналізувати на предмет спотворень щогли. При невеликій практиці здорове око може виявити спотворення до одного або двох відсотків. Це забезпечує швидкий аналіз лінійності зображення, або виявлення проблем, які потребують вирішення, або забезпечення впевненості в тому, що зображення є лінійним. Після встановлення лінійності зображення швидке вимірювання відкаліброваних позначок у будь-якій точці зображення визначить точність збільшення для всього зображення. Збільшення можна відрегулювати належним чином.

Це швидка та проста процедура, яку можна виконати менше ніж за десять хвилин і може заощадити години роботи. Крім того, коли ваші зображення публікуються, ви знаєте, що вони є точними репрезентаціями вашого зразка і що ваша експериментальна техніка бездоганна.

2. Дослідження та використання сучасних методів калібрування

2.1. Проблема оптимізації пикселів в високою лінійностю

Високолінійні датчики зображення важливі для широкого спектру застосувань, таких як медичне та наукове зображення [1]–[3]. За останні кілька років було проведено багато досліджень з лінеаризації реакції випромінювання CMOS-датчика зображення [4]–[9].

У попередніх дослідженнях обговорюються фактори, що сприяють нелінійним похибкам КІС [10]. Нелінійність пікселя зазвичай домінує над нелінійними помилками CMOS-датчика зображення в цілому. У традиційному пікселі 4T нелінійне посилення вихідного повторювача (SF) і залежність від напруги CFD інтеграційного конденсатора на вузлі FD найбільше сприяють нелінійності пікселя [10].

Оптимізація лінійності на рівні пікселів є найбільш прямим способом зменшення нелінійності CIS. Нова піксельна конструкція запропонована в [6], яка використовує однокаскадний диференціальний підсилювач замість повторювача джерела для керування ланцюгами навантаження. Ця нова структура пікселя може зменшити нелінійність SF, скасовуючи ефект тіла SF-транзистора. Проте, більше транзисторів вводиться в піксель за рахунок інших характеристик, таких як шум і коефіцієнт заповнення.

Без застосування будь-якої спеціальної конструкції піксельної структури, більше досліджень зосереджено на покращенні лінійності на системному рівні. Алгоритми калібрування поза чіпом зазвичай використовуються для калібрування виходу датчика [11], [12], що споживає додаткову потужність та час роботи. У [6] метод цифрового калібрування на чіпі використовується для покращення лінійності CIS без додавання будь-яких витрат до площі чипа або споживання енергії. Після запису цифрового виходу датчика зображення зі збільшенням часу інтегрування вхід 10-розрядного АЦП попередньо спотворюється для компенсації нелінійних

помилок системи формування зображення [6]. Цей метод калібрування різко зменшує нелінійність пікселя структури 4T із значення 0,42 % до 0,06 %. Однак спочатку потрібно зафіксувати відкалібрований наростаючий сигнал датчика зображення з умовою постійного освітлення. Не завжди зручно знімати криву передачі тепловізора з фіксованим освітленням.

У цьому підрозділі обговорюється більше методів для подальшого мінімізації нелінійності датчика зображення та подолання недоліків раніше представленого методу калібрування. Спочатку досліджуються та порівнюються декілька типів піксельних структур, призначених для оптимізації лінійності. Подібно до запропонованого буферного пікселя в [6], тип пікселя 4T, який використовує транзистор pMOS SF з підключеним джерелом і об'ємом, скасовує коефіцієнт тіла SF; таким чином досягається кращий результат лінійності. Крім того, також представлена піксельна конструкція, заснована на ємнісному транс-імпедансному підсилювачі, що дозволяє досягти видатного результату лінійності при збереженні відносно високого коефіцієнта заповнення за рахунок спільного використання більшості транзисторів в колонці.

Потім на основі методу калібрування піксельного режиму, представленого в [6], запропоновано два інші методи калібрування, режим напруги та режим струму, щоб покращити лінійність датчика без потреби в постійному освітленні. Примітно, що метод калібрування поточного режиму може калібрувати нелінійність, викликану нелінійним інтегруючим конденсатором пікселя, значно покращуючи лінійність CIS.

Оптимізація пікселів і методи цифрового калібрування експериментально перевірені за допомогою прототипу CIS, виготовленого за технологією комерційного датчика зображення CMOS 0,18 мкм.

Для традиційного пікселя 4T накопичений фото-генерований заряд перетворюється в аналогову напругу і зчитується за допомогою повторювача джерела. Коефіцієнт посилення SF змінюється залежно від

вихідної напруги SF VPIX, яка погіршується. продуктивність лінійності пікселя [10]. Крім того, нелінійний CFD також впливає на лінійність пікселя. CFD складається з кількох різних типів ємностей, з яких насамперед ємності переходу змінюються залежно від напруги на вузлі FD, що робить загальну ємність нелінійною [10], [13].

Напруга зміщення VLN контролює значення струму зміщення в пікселі; і струм зміщення розподіляється між пікселями в одному стовпці. Джерела живлення піксельного VDD і транзистора RST VDD_RST розділені.

Щоб зменшити нелінійні ефекти, викликані SF в пікселі 4T, в [6] був запропонований тип буферного пікселя V2. Pixel V2 використовує однокаскадний підсилювач у конфігурації одиничного посилення як аналоговий буфер для керування ланцюгами навантаження. У конфігурації із замкненим контуром ефект тіла скасовується, а лінійність покращується за рахунок меншого коефіцієнта заповнення та більшого шум [6].

У цьому чіпі-прототипі представлено більше піксельних структур, спрямованих на кращу лінійність, тоді як пікселі V1 і V2 все ще включені для порівняння. Спочатку вводяться дві піксельні структури V3 і V4 з використанням транзистора pMOS SF. У пікселі V3 більшість транзисторів SF і рядка вибору підключені до джерела живлення, тому ефект тіла pMOS SF все ще присутній. У пікселі V4 основна частина pMOS SF прив’язана до джерела в окремій n-лунці, що скасовує ефект тіла pMOS SF.

Без використання складної конструкції аналогового буфера як піксель V2, піксель V4 досягає одиничного підсилення за допомогою одного транзистора. Таким чином, цей тип пікселя може реалізувати більший приріст перетворення без шуму; однак транзистори вибору рядка та транзистори джерела повторювача пікселя V4 використовують розділені n-ямки; мінімальна відстань між різними n-ямами обмежена правилами проектування, що обмежує коефіцієнт заповнення. Pixel V3 має коефіцієнт

заповнення 60%, а піксель V4 — 48%. У порівнянні з традиційним пікселем 4T, який використовує SF типу nMOS, пікселі V3 і V4, які використовують SF типу pMOS, мають менший шум, особливо мерехтіння. На фіг.2 струм зміщення пікселів змінюється шляхом зміни напруги зміщення VLP.

Хоча пікселі V2 і V4 можуть пом’якшити нелінійність, викликану SF, і таким чином досягти кращого результату лінійності, нелінійний CFD все ще сприяє нелінійній поведінці пікселя. Подальші рішення можуть бути використані для зменшення нелінійних похибок через непостійну ємність.

Для зменшення нелінійності, викликаної CFD, використовується новий піксель на основі структури CTIA. На рис. 3 показана схема цього пікселя CTIA V5, який складається з операційного підсилювача (OPA), конденсатора зворотного зв'язку, перемикача скидання та аналогового буфера. Для OPA прийнято однотактний вхідний телескопічний каскадний підсилювач для досягнення високого посилення на невеликій площі через обмежений розмір пікселя [9]. Порівняно зі структурою підсилювача з диференціальним входом, ця несимметрична структура має перевагу у більш високому коефіцієнті заповнення та низькому рівні шуму. OPA має посилення напруги 82 дБ і споживає 1 мкА. Конденсатор зворотного зв'язку в пікселі реалізується конденсатором метал-ізолятор-метал (MIM) CINT (близько 4fF), який має наднизький коефіцієнт напруги. Коли підсилювач досягає високої напруги, замкнутий контур змушує інтегрувати фотострум на CINT. Таким чином отримується високолінійний вихід з пікселя CTIA. Вихідний каскодний каскад підсилювача має вищий вихідний опір, ніж вихідний повторювач у традиційному пікселі 4T. Тому аналоговий буфер додається після трансімпедансного підсилювача. Вихід пікселя можна записати у вигляді (1), де IPD — фотострум, а AOPA — коефіцієнт підсилення аналогового буфера.

Весь піксель містить сім транзисторів nMOS, тоді як pMOS та інші транзистори nMOS всередині пунктирної лінії спільні для всіх пікселів у

стовпці, це призводить до коефіцієнта заповнення 36% з розміром пікселя 12 мкм × 10 мкм. Напруги зміщення VB1∼VB3, VLN генеруються поза пікселем. Підсилення перетворення (CG) пікселя CTIA в основному визначається значенням конденсатора MIM CINT. Напруга скидання пікселя дорівнює напрузі затвор-джерело вхідного транзистора підсилювача, який чутливий до зміни процесу. Однак наступна схема корельованої подвійної вибірки (CDS) може зменшити цей тип шуму [9].

Теоретично, піксель CTIA може досягти хорошої лінійності. Однак складна структура пікселя призводить до меншого коефіцієнта заповнення порівняно з іншими структурами пікселів. Крім того, піксель CTIA має гіршу шумову продуктивність. У пікселі CTIA основні джерела тимчасового шуму включають шум OPA, шум скидання, викликаний транзистором скидання, і шум аналогового буфера. Шум скидання та більшість шумів мерехтіння підсилювачів можуть бути додатково погашені за допомогою наступної схеми CDS [14], [15].

Вихідна потужність шуму трансімпедансного підсилювача [14] показана в (2), де CPD – ємність фотодіода, а CL – навантажувальна ємність підсилювача; k – постійна Больцмана, T – абсолютна температура; _ – константа шуму, що залежить від структури підсилювача [14].

Тепловий шум, внесений наступним аналоговим буфером у пікселі [16], показаний у (3), де b – коефіцієнт транспровідності навантажувального та вхідного транзисторів у буфері; CL,ota — навантажувальна ємність аналогового буфера.

Для ілюстрації та перевірки методу калібрування поточного режиму, запропонованого в Розділі III, у цій статті адаптовано два додаткові пікселі V6 і V7 на основі 4T піксельних структур V1 і V3. Ці пікселі показані на рис. 4. У порівнянні з пікселями 4T V1 і V3, до вузла FD пікселя V6 і пікселя V7 додано додатковий транзистор. Джерело цього додаткового транзистора підключено до схеми поглинання калібрувального струму, а

затвор транзистора керується сигналом _IIN. Коли сигнал _IIN увімкнено, FD розряджається в вихідний піксельний струмоприймач, де наднизький струм IIN. Схема каналу зчитування. імітує фотострум, перетворений фотодіодом. IIN можна використовувати для зйомки кривої переносу електронної напруги датчика зображення та подальшого калібрування датчика зображення.

2.2. Методи калібрування

У запропонованих структурах пікселів, особливо в CTIA, оптимізація лінійності на рівні пікселя може покращити продуктивність лінійності пікселя. Однак схема зчитування все ще сприяє виникненню нелінійних помилок датчика зображення.

Раніше калібрування піксельного режиму було представлено в [6] для калібрування нелінійних помилок датчика зображення.

У цьому чіпі-прототипі роздільна здатність АЦП була підвищена з 10 біт до 12 біт для досягнення кращої ефективності калібрування. Крім того, досліджуються і пропонуються два інші методи калібрування для подолання недоліків першого методу.

4T pixel V3 використовується для ілюстрації принципів роботи першого методу калібрування: калібрування режиму пікселя.

Як показано на рис. 7, VDD_RST є постійним; фотодіод спочатку скидається імпульсами _TX і _RST, потім піксель зчитується звичайним способом; сусідні спадні фронти сигналу _TX визначають час експозиції TEXP пікселя. Сигнал _RST знову активується, щоб увімкнути зчитування VRST, який є сигналом скидання пікселя; в той же час послідовно активуються керуючі сигнали _AMP_RST і _ADC_RST, а колонковий підсилювач і АЦП здійснюють автоматичне встановлення нулів. Після цього активується сигнал _TX, накопичені електрони фотодіода під час

фази інтегрування будуть передані до FD. Далі, диференціальне значення скидання пікселя та значення сигналу відбирається на конденсаторі CSH цифровим сигналом _SH і оцифровується колонковим АЦП. Хронометраж інших керуючих сигналів для датчика зображення такі ж, як і схема синхронізації, введена в [17].

Принцип методу калібрування піксельного режиму полягає у захопленні нелінійної передатної функції між кількістю вхідних фотонів і кінцевим цифровим виходом (DO) АЦП; потім дані використовуються для модифікації рампи АЦП для компенсації вихідної нелінійної поведінки CIS [6]. Роздільна здатність і продуктивність лінійності ЦАП визначають вплив методу калібрування [17]. Роздільна здатність ЦАП оновлюється до 14 біт, оскільки роздільна здатність АЦП, використаного в цій статті, становить 12 біт.

Є два способи збільшити кількість фотонів, що потрапляють на піксель. Перший спосіб фіксує час експозиції датчика зображення та лінійно змінює інтенсивність джерела світла; інший спосіб набагато простіше: збільшивши час витримки датчика при фіксованому освітленні. У цій роботі використовується другий метод.

Під час калібрування PM час експозиції збільшується з 1 × TEXP до 4096 × TEXP з фіксованою інтенсивністю світла. Цифровий вхідний код ЦАП MIN збільшується від 0 до 16383 (214−1) і генерує лінійний сигнал наростання VRAMP1. Цифровий вихід АЦП фіксується і зберігається в SRAM для кожного часу експозиції. Процес відображення видаляє зміщення та помилки посилення з даних. Дані потім інтерполюють з 12 біт до 14 біт, щоб відповідати роздільній здатності ЦАП. Остаточна послідовність даних MIN_C_PM надсилається на вхід ЦАП для генерування каліброваного сигналу наростання VRAMP1_C_PM, що містить інформацію про нелінійності пікселя та схеми зчитування. Застосовуючи нелінійний сигнал наростання, вихідні нелінійності датчика зображення скасовуються.

Калібрування піксельного режиму може компенсувати нелінійність, викликану схемою зчитування, а також схемою пікселя; таким чином, він різко покращує лінійність датчика зображення без додаткового впливу на споживання енергії, розмір мікросхеми та швидкість. Однак передавальну функцію датчика зображення потрібно фіксувати за допомогою постійного освітлення.

У цій роботі запропоновано методи калібрування VM і CM для усунення залежності від умов освітлення. На рис. 8 (а) представлено метод калібрування напруги, коли транзистор TX залишається вимкненим, а фотодіод не використовується. Крива передачі датчика зображення вимірюється в темному середовищі. Замість збільшення часу експозиції, декрементний періодичний сигнал VRAMP2 подається до стоку транзистора RST. VRAMP2, створений ЦАП, імітує напругу на плаваючому вузлі дифузії в піксельному режимі. VRAMP2 має два значення, що представляють дві різні фази звичайної операції з пікселем. Монотонний зростаючий вихідний сигнал досягається за допомогою наступної схеми CDS.

Оцифрований за допомогою вбудованого АЦП, кінцевий цифровий вихід містить нелінійну інформацію SF та схеми зчитування. Аналогічно, на основі функції передачі напруги між вхідним сигналом динаміки VRAMP2 і кінцевим цифровим виходом, калібрування режиму напруги записує нелінійну інформацію SF та схеми зчитування. Після відображення та інтерполяції інкрементальна послідовність MIN_C_VMi перетворюється ЦАП у новий сигнал наростання VRAMP1_C_VM, який буде використовуватися для компенсації вихідної нелінійності схеми SF та зчитування. Порівняно з методом калібрування PM, споживана потужність і розмір системи збільшаться за допомогою методу VM, оскільки другий ЦАП потрібен для генерування періодичного наростаючого сигналу VRAMP2 для пікселя. Крім того, техніка калібрування режиму напруги не

може отримати інформацію про фотодіод і характеристики ємності-напруги CFD; як така, нелінійність, спричинена CFD, не може бути відкалібрована, і покращення є менш ефективним у порівнянні з калібруванням PM. Таким чином, пропонується третій тип методу калібрування: калібрування поточного режиму.

Процес калібрування CM ілюструється пікселем V7, де додатковий калібрувальний транзистор використовується для передачі калібрувального струму. Як показано на рис. 8(b), під час калібрування CM фотодіод також відключається.

Доданий транзистор уникає впливу на іншу групу пікселів з різною структурою пікселів у тому самому стовпці. Сигнал _ICAL керує часом роботи TICAL калібрувального струму. Струм калібрування підтримується постійним, а період TICAL поступово змінюється. Вихідна напруга пікселя пропорційна періоду TICAL.

Якщо нелінійність, викликана перетворенням фотонів в електрони, є незначною, цей метод повинен відкалібрувати нелінійність, викликану пікселем і схемою зчитування. Основна операція CM така ж, як і робота в піксельному режимі.

Збільшуючи час роботи _ICAL, можна отримати криву передачі між калібрувальним зарядом і кінцевим цифровим виходом. Як і інші режими калібрування, оновлений сигнал наростання використовується для калібрування нелінійності датчика зображення. Калібрування CM може покращити ефект калібрування порівняно з калібруванням VM. Найбільш помітною проблемою калібрування поточного режиму є розробка невеликого калібрувального джерела струму. Струм фотодіода зазвичай знаходиться в діапазоні fA~pA в залежності від інтенсивності та довжини хвилі джерела світла [18], [19]. Важко сконструювати таке невелике джерело струму, щоб імітувати фотострум, створюваний фотодіодом. У цій статті всі 64 пікселі в стовпці поділяють один згенерований калібрувальний

струм. Існують два типи структур для реалізації стабільного опорного струму. Перший тип опорного струму заснований на помножувачі _ [20], [21], тоді як інший тип використовує опорну напругу та резистор [22], [23].

У цьому тестовому чіпі опорний струм, створений звичайним перетворювачем напруга-струм, віддзеркалюється для живлення FD в пікселях. У ланцюзі напруга-струм використовується складений каскодний підсилювач. Петля негативного зворотного зв'язку змушує протікати струм через транзистор nMOS, що еквівалентно вхідній напрузі VREF, поділеній на резистор RIN. VREF – вихідна напруга схеми з програмованою забороненою зоною. Струм через резистор RIN віддзеркалюється для генерування 32 калібрувальних струмів, по одному на колонку. Щоб досягти струму нижче nA, резистор має бути порядку G_, що охоплює велику площу мікросхеми. У [24] резистор реалізований комутованим конденсатором. У цій конструкції для економії площі мікросхеми та для полегшення регулювання струму вибрано нечіповий резистор RIN. Опорний струм регулюється зміною значення напруги VREF або значення резистора RIN бортового резистора. Абсолютне значення калібрувального струму не настільки критичне, доки калібрувальний струм стабільний. Подовжуючи час роботи TICAL, можна отримати декрементний вихід пікселя. Значення RIN слідує (4), де IICAL – калібрувальний струм; TICAL_MAX – максимальний час роботи калібрувального струму; NROW – це кількість спільних пікселів у стовпці, а _VFD – діапазон напруги на FD. У цій роботі пропонується декілька різних піксельних структур, включаючи буферизовану архітектуру пікселів CTIA, щоб реалізувати високу лінійність на рівні пікселя. Три методи калібрування додатково демонструють свої переваги та недоліки щодо покращення лінійності на системному рівні. Результати вимірювань на мікросхемі підтвердження концепції, виготовленому за допомогою комерційного процесу 0,18 мкм CIS, показують покращення лінійності з усіма використаними методами. Піксель

CTIA досягає найкращого результату лінійності з усіх піксельних структур. Метод калібрування піксельного режиму забезпечує найкращі результати лінійності для всіх типів пікселів. Метод калібрування режиму напруги демонструє перевагу роботи без постійного освітлення при збереженні покращення лінійності. Режим калібрування струму має перевагу методу режиму напруги та досягає покращення лінійності, що наближається до методу піксельного режиму.

2.3. Нестандартні методи калібрування. Метод зваженого голосування

Натхненні тензорним голосуванням [12], ми дамо опис голосуванню за яскравістю, як новий підхід до реєстрації зображень із глобальним і локальним вирівнюванням яскравості. Ключем до нашого безмодельного підходу є пряма оцінка функції заміни шляхом зведення складної оцінки до надійного двовимірного тензорного голосування у відповідних просторах для голосування. Модель функції заміни не передбачається. Дані про яскравість спочатку кодуються у двовимірні тензори кульок. За умови лише монотонного обмеження ми голосуємо за оптимальну функцію заміни, поширюючи обмеження гладкості за допомогою щільного тензорного поля. Наш метод ефективно визначає відсутні сегменти кривої та відхиляє виходи зображення, не припускаючи будь-якої спрощуючої чи складної моделі кривої. Проголосовані функції заміни використовуються в нашому ітеративному алгоритмі реєстрації для обчислення найкращої матриці деформації. На відміну від попередніх підходів, наш надійний метод виправляє невідповідність експозиції, навіть якщо два зображення, що перекриваються, спочатку не вирівняні. Голосування за яскравість ефективно коригує різницю експозиції, усуває віньєтки і, таким чином,

покращує реєстрацію зображення. Ми представляємо результати на різноманітних зображеннях.

2.3.1 Ввідні поняття

Створення панорам або мозаїки все ще є недорогим і загальноприйнятим методом створення фотографій з більш високою роздільною здатністю та/або з більш широким кутом зору. Для успішного створення візуально прийнятної або безшовної мозаїки з кількох зображень було запропоновано багато методів реєстрації [12, 13, 9, 16], які вирівнюють зображення, зроблені за підкласом рухів камери. Однак у процесі реєстрації освітленість (або яскравість), записана камерою, що рухається/обертається, часто є непостійною навіть для статичної сцени. Зміна експозиції та інші внутрішні параметри камери ще більше ускладнюють процес запису світла, викликаючи різкий перехід кольору від одного зображення до іншого. Шви в композиті зображення досить помітні. Найгірше, ці ускладнення можуть призвести до неправильної реєстрації зображення. Мозаїка зображень із великою різницею експозиції призводить до неприродного переходу кольору та неправильної реєстрації. Існує кілька факторів, які впливають на яскравість, записану камерами, а саме: дисперсія експозиції між зображеннями, баланс білого цифрової камери, гамма-корекція, віньєтування 1 та параметри дигітайзера [3, 5, 15]. Коли два зображення вирівняні, щоб усунути шви та артефакти через перераховані вище фактори, можна застосувати розтушовування [13] для локального змішування двох зображень, що перекриваються. В якості альтернативи, модель для функції відгуку [15] може бути оцінена для корекції яскравості або різниці експозиції областей, що перекриваються. Оцінка функції відповіді є недостатньо обмеженою проблемою. Одним із поширених підходів до вирішення проблеми є виконання радіометричного калібрування шляхом отримання кількох зображень статичної сцени за різних умов освітлення.

Вимоги щодо узгодженості інших умов, ніж експозиції, мають вирішальне значення для стабільності отриманої моделі. Це важко, особливо коли шум і неясність зображення дуже поширені. Більше того, навіть якщо таку модель можна надійно оцінити, метрика оцінки може бути недоступною для оцінки ефективності чи оптимальності отриманої моделі. У цій роботі ми пропонуємо безмодельний та ефективний підхід до вирішення проблеми невідповідності яскравості, коли реєструються два зображення, що перекриваються. Наш підхід називається голосуванням за яскравістю, яке натхнене двовимірним тензорним голосуванням, безамодним підходом для виведення структури в 2D. Голосування за яскравість надійно видаляє викиди зображення та оцінює оптимальну функцію відображення для глобальної та локальної заміни яскравості. Оптимальність нашої оціненої функції відгуку підлягає єдиному обмеженню: монотонне обмеження, тобто більша експозиція, завжди повинна генерувати яскравіші кольори пікселів, і навпаки. На відміну від алгоритму в [3], нам потрібна лише фокусна відстань першого зображення, щоб виключити природне віньєтування. Ніякої іншої кривої чи спрощуючої моделі не передбачається.

Для зручності довідки ми підсумовуємо поняття та термінологію, використані в цьому дипломі нижче: I(x, y) — колір пікселя в позиції (x, y) зображення I. Відповідна освітленість сцени V , записана зображенням I , задовольняє

$$I = u(V) \tag{1}$$

де u є функцією відповіді [15], яку далі можна розкласти як f. Функція f називається глобальною функцією відгуку, яка сукупно характеризує експозицію, баланс білого, гамма-корекцію та параметри дигітайзера. Віньєтування, як величина варіанта позиції, вирішується функцією локальної відповіді k. Таким чином, глобальна функція відповіді f описує процес глобального відображення кольорів, тобто якщо два пікселі

отримують однакову кількість світла в одному зображенні, вони мають однакове значення кольору незалежно від їхнього положення в площині зображення. З іншого боку, функція локальної реакції k(▪) пов’язана з позиціями пікселів: пікселі навколо меж зображення темніші, ніж пікселі в центрі зображення, навіть якщо вхідне опромінення подібне. У цій роботі ми не оцінюємо явно u(▪). Натомість функція заміни g(▪) є нашою метою. g(▪) безпосередньо вимірює різницю кольорів між зображеннями. Зв'язок між g(▪) та u(▪) аналізується в розділі. 4.1. Решта цього документа організована таким чином: Розділ 2 обговорює та порівнює пов’язану роботу та оглядає наш внесок. У розділі 3 ми розглянемо тензорний алгоритм голосування. У розділі 4 наведено огляд наших алгоритмів підбору кольорів, які засновані на голосуванні за яскравість. У розділах 5 і 6 ми описуємо деталі оцінки алгоритмів глобальної та локальної функції відповіді. У розділі 7 обговорюються та представлені наші Нарешті, ми завершуємо нашу роботу в розділі

Існують два класи досліджень, пов’язаних із нашим методом: мозаїчна реєстрація з переходом експозиції чи корекцією по зображеннях та радіометричне калібрування.

2.3.2. Мозаїчне оформлення з корекцією експозиції

За останні роки було розроблено багато передових методів реєстрації. Щоб виправити різницю в експозиції, одним із напрямків є змішування кольорів пікселів у зоні накладання. Відеомозаїка [11] — це алгоритм реєстрації для оцінки гомографії за методом Левенберга-Марквардта. Щоб зменшити видимі артефакти, він змішує область перекриття за допомогою функції дволінійного зважування. Однак деякі «крапчасті» плями все ще залишаються під різними експозиціями. У [13] для кращого ефекту змішування можна використовувати алгоритм на основі пір’я, але неприродний шов все ще неминучий для різних умов освітлення. Берт та

інші [1] використовували сплайн з багатьма роздільною здатністю для виконання змішування. Uyttendaele та інші [14] використовували метод на основі блоків для обчислення функції відгуку для відображення освітленості. Використовуючи функції усереднення та інтерполяції, досягається більш природний перехід в їх результатах. Одним з недоліків цих методів є те, що вони припускають, що зображення вже правильно зареєстровані. Більше того, змішування виконується лише в області накладання, щоб більш природним чином передавати зображення з одного середовища експозиції в інше.

2.3.3. Радіометричне калібрування

Іншим класом підходу до усунення різниці освітленості є радіометричне калібрування/калібрування освітленості [8, 2, 6, 15, 5]. Зробивши кілька статичних зображень з різною експозицією, оцінюється, що функція відгуку u(▪) або її обернена u−1(▪) генерує карти яскравості високого діапазону. У [8] u−1(▪) моделюється як поліном високого порядку

$$I = u{-}1(V) = H\, n{=}0\ cnV\ n. \qquad (2)$$

Отже, калібрування розглядається як визначення порядку N і коефіцієнтів cn. Рамеш та інші [15] прийняли модель із забрудненням шумом і використали метод максимальної правдоподібності для оцінки u(▪). Однак ці методи зазвичай застосовуються до статичної сцени з деякими передбачуваними моделями зображення або шуму. Потрібні додаткові знання, наприклад інформація про вплив [2]. Враховуючи лише два незареєстрованих зображення з однією зоною накладання, ці методи не можуть бути використані безпосередньо в процесі реєстрації та оцінки зображень. Наш метод не робить явного висновку про функцію відповіді

u(▪). Замість цього ми формулюємо проблему як колірну карту, щоб вирівняти різницю яскравості між зображеннями. Hasler et al [3] об’єднують реєстрацію зображення та оцінку внутрішніх параметрів камери в один процес оптимізації та глобально усувають різницю в яскравості між зображеннями. Однак вони припускають, що параметричні моделі, наприклад, гамма-корекція та віньєтування, камери відомі.

2.3.4 Огляд 2Д тензорного голосування

У цьому підрозділі ми дамо стислий огляд 2D-тензорного голосування [7]. Наш підхід — це метод вилучення кривої розтушовування та усунення шуму, який використовує тензор для представлення маркерів і голосування для зв’язку між токенами. Тензор і голосування об'єднані полем для голосування. Поле голосування — це щільне тензорне поле для постулювання гладких зв’язків між токенами. Нас цікавить відповідь на наступне геометричне запитання у 2D. Припустимо, що існує гладка крива, що з'єднує початок координат O і точку P. Нехай також відома нормаль _N до кривої в точці O. Який найбільш вірогідний нормальний напрямок у P? 2(a) ілюструє ситуацію. Ми стверджуємо, що оскулююче коло, що з'єднує O і P, є найбільш вірогідним з'єднанням [7], оскільки воно мінімізує повну кривизну вздовж гіпотезованої дуги кола і, таким чином, кодує обмеження гладкості. Найімовірнішою нормалью є нормаль до дуги кола в точці P (товста стрілка на рис. 2(a)). Сила голосу цієї норми зменшується відповідно до такої функції: DF(r, ϕ, σ) = e −(r2+cϕ2σ2) де r — довжина дуги OP, ϕ — кривизна, c — константа, яка контролює розпад із великою кривизною, а σ — плавність, яка також визначає розмір околиці. Якщо ми розглянемо всі можливі розташування P у двовимірному просторі, то отриманий таким чином набір нормальних напрямків становить поле голосування двовимірної палички, рис. 2(b). Зверніть увагу, що σ є єдиним вільним параметром. Враховуючи вхідний маркер A, як проголосувати за інший

маркер B, щоб встановити плавний зв’язок між ними, припускаючи, що норма A відома, рис. 2(b). Спочатку фіксуємо σ, щоб визначити розмір поля голосування або масштаб аналізу. Потім ми вирівнюємо поле голосування за нормою A шляхом перекладу та обертання. Якщо B знаходиться в околиці поля для голосування A, B отримує паличний голос [vx vy]T із вирівняного поля. отже,

Голосування подібне до згортки, а поле голосування схоже на маску згортки, за винятком того, що результат голосування не є скаляром. Як розглянуто в підрозділі 2.2.1, глобальна та локальна відповідь функції ускладнюють процес кольорового запису, який змінюється від зображення до зображення.

2.3.5. Проведення аналізу.

Розглянемо два зображення I та I_2, які перекриваються але зроблені при різних експозиціях. Якщо ці зображення зроблені коректно, то функція $w()$ трансформує оригінальне вхідне зображення на таке, яке згорнуте. Припустимо, що $I(x, y)$ and I_2 (x_2, y_2) є відповідними пік селями в ціх зображеннях. Співвідношення між яскравістю в них дається співвідношенням

$$V(x, y) = tV_2(x_2, y_2), \tag{3}$$

де t – це співвідношення між експозиціями, і воно визначається часом експозицій кожного з зображень.

Таким чином, ми маємо

$$I(x, y) = uI(V(x, y)) = g(I_(x_2, y_2)), \tag{4}$$

де uI та uI_2 не обов’язково ті самі функції відклику, а g має назву функція зсуву. Якщо I і I_2 зареєстровані некоректно, нам треба оцінювати не тільки

функцію зсуву g, яка визначає різницю експозицій, а також і функції згортки w для того, щоб підігнати відповідні пикселі.

2.3.6. Алгоритм для оцінювання функції g.

Оскільки оцінка g піддається шуму, невизначеності та зміщення в області перекриття зображень, третій крок в алгоритмі уточнення є найважливішим. Ми припускаємо відсутність моделі для функції заміни і використовуємо інформацію про кольори пікселів між зображеннями. Подібно до f і k у функції відповіді u, яка відображає освітленість до кольору пікселів, ми розкладаємо функції заміни на відповідні глобальні та локальні компоненти, скажімо, глобальний і локальний, який відображає зображення в області накладання. Глобальна функція заміни — це глобальне відображення кольорів між зображеннями, тоді як функція локальної заміни використовується для оцінки ефекту віньєтування для кожного зображення. Нагадаємо, що віньєтки – це поступове і невелике затемнення навколо меж зображення. Це менш проблематично для точності реєстрації, ніж для помилкової глобальної функції заміни. З цієї причини ми спочатку виконуємо оцінку глобальної функції заміни і розглядаємо будь-які віньєтки як шум або викиди в процесі оцінки. Після цього на вхідному зображенні оцінюється локальна функція заміни. Остаточна функція заміни gбудується шляхом їх компонування, тобто

$$\text{(replacement function) } g() = global(local()) \tag{5}$$

єдиним вхідним значенням для алгоритму є приблизна фокусна відстань першого еталонного зображення, щоб приблизно протидіяти початковим віньєткам при оцінці функції локальної заміни. Щоб застосувати процес голосування в просторі зображення без припущення щодо моделі та відповідності, ми пропонуємо надійну яскравість підхід голосування, який є

похідним від загального двовимірного тензорного голосування. У таблиці 1 порівнюються тензорне голосування та голосування за яскравістю.

2.3.7. Яркостне голосування для кольорової компенсації

Ключова ідея голосування за яскравість для оптимального глобального висновку заміни має подвійний характер: (1) надійний та ефективний висновок шляхом збору тензорної підтримки в околиці та (2) використання монотонного обмеження. У цьому розділі ми вводимо процес голосування та переносимо опис монотонного обмеження до розділу. 5.4. Відображення кольорів виконується від ˜ I_ до I, де кожне значення ˜ I_ відображається для точного одного кольору в I. Відповідно, замість виконання вилучення кривої за допомогою загального тензорного голосування, як описано в розділі 3, ми застосовуємо процес голосування за яскравість для кожного дискретного кольору. в ˜ I_, а унікальна оптимальна відповідність в I вибирається як точка кривої для глобальної функції заміни (наприклад, рис. 9(c) у розділі результатів). Оскільки саме один оптимальний колір заміни в I вибирається із заданого кольору ˜ I_ за допомогою процесу голосування за яскравістю, інші тензори помітності того ж значення кольору в ˜ I_ або в тому самому стовпці голосування (червоне поле), роблять не проголосували. Натомість вони лише одержувачі голосів або голоси. Посилаючись на рис. 3, ми проілюструємо синіми стрілками напрямки голосування від виборців до виборців по сусідству. Після голосування за яскравістю обчислюється власна система виведених тензорів помітності. В якості оптимального положення кривої приймається значення на ділянці з максимальною виразністю кривої $\lambda max - \lambda min$ у кожному стовпці голосувань (крива на рис. 9(c)). Зауважимо, що глобальна функція заміни є монотонною, тому оптимальність кривої також обмежена.

3. Щоб застосувати монотонне обмеження в голосуванні за яскравість, ми пропонуємо локальний алгоритм підгонки для уточнення кривої, отриманої тензорним голосуванням у попередньому розділі. Дві ситуації

4. Спершу ми сортуємо вибірки для кожного вертикального стовпця в просторі для голосування відповідно до результатів голосування в порядку спадання та поміщаємо їх у чергу, пов'язану з кожним стовпцем. Індекс положення d для кожного зразка вводиться, щоб вказати положення зразка в колонці. Алгоритм локальної підгонки

виконується наступним чином: якщо позиція однієї результативної точки Pi нижча за Pi−1, перейдіть від вибірки найвищої помітності до

найнижчий зразок помітності в черзі, пов'язаній із стовпцем, і для кожного індексу позиції d ітерація від Pi до Pi-m, де m є параметром, визначеним користувачем.

2.3.8. Багатомасштабне яркосне голосування

Щоб прискорити процес голосування, ми застосовуємо багатомасштабну схему голосування, щоб зменшити вплив шуму через неправильну реєстрацію та віньєтки. Приміщення для голосування можна розглядати як однорідну вибірку

яскравість зображення. Отже, ми застосовуємо алгоритм піраміди Гаусса для побудови ієрархії зображень так, що зображення даного рівня має лише одну чверть точок наступного нижчого рівня. Припустимо, що ми голосуємо та генеруємо криві функції на рівні i − 1. Лише точки на кривій поширюються на рівень I

щоб зробити висновок більш тонкого. Кожна точка рівня i−1 має п'ять відповідних точок наступного рівня. Тому на рівні i нам потрібно проголосувати не більше ніж за 5 ni балів, де ni — щільність вибірки на зображенні рівня i. На рис. 5 показано два спільних зображення в двох послідовних масштабах або рівнях у піраміді Гаусса. Глобальна заміна

призводить до зображення з подібною яскравістю. Однак, щоб краще вирівняти їх, нам потрібно також усунути віньєтки. Базуючись лише на знаннях фокусної відстані першого опорного зображення, ми застосовуємо інший процес голосування, щоб оцінити локальну заміну.

2.3.9. Оцінка локальної функції заміни за допомогою голосування

Локальна функція заміни - це відображення, що залежить від положення. Новий простір для голосування необхідний для врахування змін позиції в кодуванні тензора помітності. Оскільки, як відомо, об’єктив і діафрагми завжди мають кругову форму і центросиметричні до оптичного центру, віньєтування є функцією відстані r від оптичного центру, яка зазвичай проектується на центр зображення. Отже, ми розбиваємо зображення на однорідні концентричні кільця, як показано як Ті на рис. 6(a). Кожне кільце має однакову ширину w, що є аналогом рівномірної щільності вибірки n у просторі спільного зображення для оцінки глобальної заміни (розділ 5). Наш новий простір для голосування параметризований (r, l), де r — середнє значення внутрішнього та зовнішнього радіусів для кожного кільця, а l — рівень віньєтування для різних кільцеподібних ланцюгів у вхідному зображенні: нехай оригінал (девіньєтований) колір у вхідному зображенні має бути Сі, а забруднений колір після віньєтування — С_я Тоді,

$$l = Ci - C_i \tag{6}$$

Щоб оцінити невідомий Сі, ми спочатку грубо девіньєтуємо перше опорне зображення, підставляючи вхідну фокусну відстань у природне рівняння віньєтування [3]. Тоді Сі можна розглядати як відповідний колір на опорному зображенні в області накладання. Процес проілюстрований на рис. 6(c). Отже, наш простір (r, l) аналогічний простору спільного зображення (˜ I_, I) для оцінки глобальної кривої заміни, і тензори помітності також кодуються таким же чином. Крім того, тут також

застосовується подібне монотонне обмеження, оскільки пікселі на межі зображення (великий r) темніші, ніж пікселі поблизу центру зображення (малий r). Як результат, той самий процес голосування за яскравість можна застосувати для оцінки локальної функції заміни. Багатомасштабну обробку також можна виконати, щоб прискорити процес висновку та підвищити здатність виключати викиди, як показано на рис. 6(a) і (b), де ширина w кільця для різних рівнів масштабується, аналогічно щільності вибірки. n у глобальному випадку. Враховуючи, що ширина кільцевих ланцюгів w у найкращому просторі для голосування досить мала, ми щільно відбираємо функції віньєтування, що дає гарне наближення для локальної заміни. Після того як ми отримали як глобальну, так і локальну функції заміни, глобальну(▪) і локальну(▪) (розділ 5 і цей розділ), ми об’єднуємо їх, щоб оцінити g(▪).

Ми описали новий і надійний підхід, голосування за яскравість, для вирішення проблеми глобального та локального вирівнювання яскравості для реєстрації зображення. Наш метод глобально та локально коригує яскравість двох зображень, що перекриваються, без припущення складної моделі камери або будь-яких спрощуючих припущень, крім монотонного обмеження. Наша ітераційна схема швидко сходиться завдяки надійній оцінці функцій заміни за допомогою тензорного голосування. У порівнянні з іншими методами, голосування за яскравість є новим, оскільки забезпечує принципово інший підхід до виконання вирівнювання яскравості та ефективне, оскільки отримується оптимальна функція за монотонного обмеження. У всьому процесі потрібна лише приблизна фокусна відстань для першого опорного зображення. Наша майбутня робота зосереджена на інтеграції надійного голосування в процес реєстрації зображень за наявності рухомих об’єктів, а також на застосуванні його до програм на основі зображень.

3. АЛГОРИТМ ЛОКАЛЬНОГО КАЛІБРУВАННЯ

3.1. Поетапний опис алгоритму локального калібрування

3.3.1. Приклад двох точок

Розглянемо приклад с трьома точками Рис.3.1.1:

$$(x_1, y_1) = (1,5)$$
$$(x_2, y_2) = (2,10) \quad (7)$$
$$(x_3, y_3) = (3,25)$$

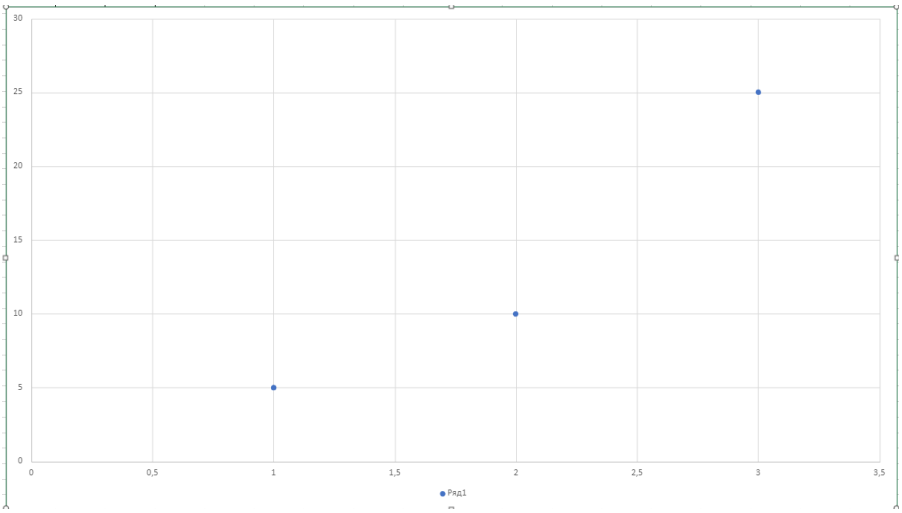


Рис.7. Графік с трьома точками.

Для проведення інтерполяції, у даному випадку, існує два варіанти:

– Кусково-лінійна інтерполяція;

$$y^{(1)}(x) = y_1 \frac{x - x_2}{x_1 - x_2} + y_2 \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \quad (8)$$

– Квадратична інтерполяційна лінія другого порядку;

Суть методу кусково-лінійної інтерполяції зводиться до обчислення двох рівнянь прямих першого порядку, через точки $x_1 y_1 x_2 y_2$ та$x_2 y_2 x_3 y_3$. На

отриманому графіку можна побачити негладкий перехід, а саме у місті перетину двох прямих у точці $x_2 y_2$. Квадратична інтерполяція у свою чергу проводиться одразу через три точки, так як являється лінією другого порядку.

Рівняння квадратичної інтерполяційної лінії через три точки:

$$y^{(2)}(x) = y_1 \frac{x - x_2}{x_1 - x_2} \frac{x - x_3}{x_1 - x_3} + y_2 \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \frac{x - x_3}{x_2 - x_3} + y_3 \frac{x - x_1}{x_3 - x_1} \frac{x - x_2}{x_3 - x_2}, \quad (9)$$

У випадку якщо дано чотири точки для побудування графіку квадратичної інтерполяції, краще поділити даний набір точок на два та провести дві квадратичні інтерполяційні прямі другого порядку. Вийде рівняння виду:

$$y_1' = y_1 \frac{x-x_2}{x_1-x_2} \times \frac{x-x_3}{x_1-x_3} + y_2 \frac{x-x_1}{x_2-x_1} \times \frac{x-x_3}{x_2-x_3} + y_3 \frac{x-x_1}{x_3-x_1} \times \frac{x-x_2}{x_3-x_2} \quad (10)$$

$$y_2' = y_2 \frac{x-x_3}{x_2-x_3} \times \frac{x-x_4}{x_2-x_4} + y_3 \frac{x-x_2}{x_3-x_2} \times \frac{x-x_4}{x_3-x_4} + y_4 \frac{x-x_2}{x_4-x_2} \times \frac{x-x_3}{x_4-x_3} \quad (11)$$

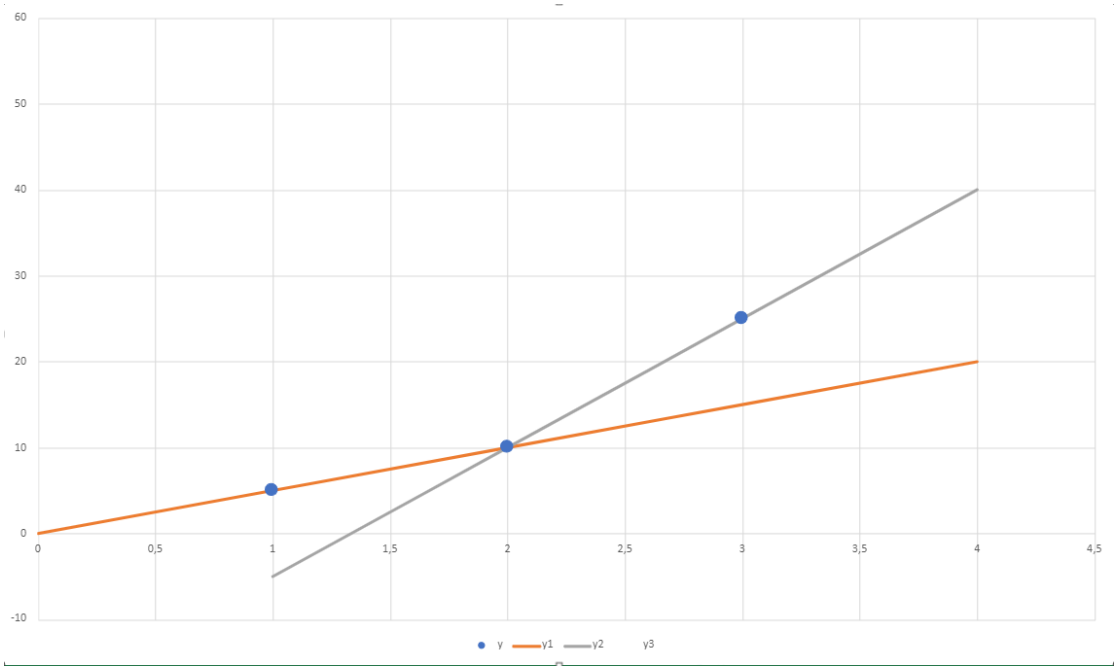


Рис.8. Дві інтерполяційні прямі першого порядку

де y1 – інтерполяційна лінія першого порядку між першою та другою точкою, а y2 – між другою та третьою

Але на графіку буде чудово видно, що дві інтерполяції не сходяться в точці, тому для правильного переходу між двома інтерполяціями використаємо кубічну інтерполяцію:

$$y_1' = y_1' \times \frac{x-x_3}{x_2-x_3} + y_2' \times \frac{x-x_2}{x_3-x_2} \quad (12)$$

або

$$y_1' = 5x^2 - 10x + 10 \quad (13)$$

Таким чином не тільки сам графік стає славнішим, а і можливе передбачення наступних показників більш точним Рис.9., де y_3 – квадратична інтерполяційна пряма.

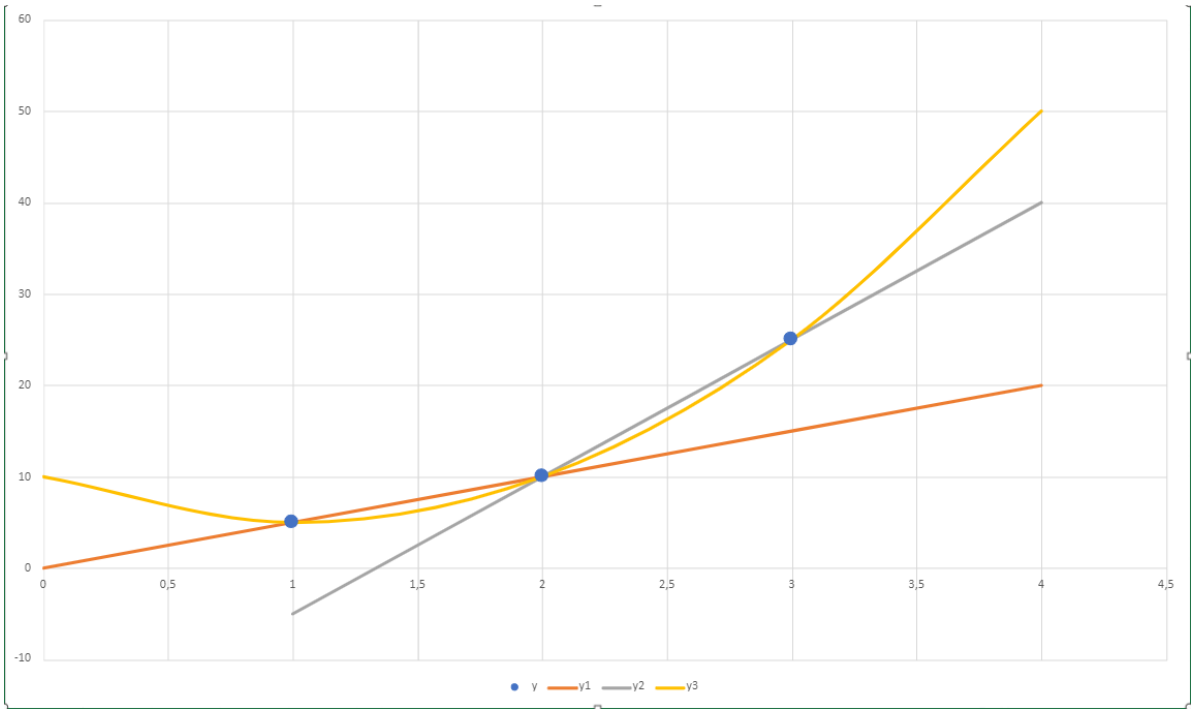


Рис.9. Дві інтерполяційні прямі першого порядку та квадратична інтерполяційна пряма

Тепер необхідно побудувати інтерполяційні криві для більшого набору точок, візьмемо чотири:

$$\begin{aligned} x_1y_1 &= (1{,}5) \\ x_2y_2 &= (2{,}10) \\ x_3y_3 &= (3{,}25) \\ x_4y_4 &= (3{,}30) \end{aligned} \tag{14}$$

В даному випадку будемо використовувати вже квадратичну інтерполяцію. Побудуємо інтерполяцію між x_1y_1, x_2y_2, x_3y_3 та x_2y_2, x_3y_3, x_4y_4 по наступним формулам:

$$y_1^{'} = y_1 \frac{x-x_2}{x_1-x_2} \times \frac{x-x_3}{x_1-x_3} + y_2 \frac{x-x_1}{x_2-x_1} \times \frac{x-x_3}{x_2-x_3} + y_3 \frac{x-x_1}{x_3-x_1} \times \frac{x-x_2}{x_3-x_2} \tag{15}$$

тобто

$$y_1^{'} = 5x^2 - 10x + 10, \tag{16}$$

та

$$y_2^{'} = y_2 \frac{x-x_3}{x_2-x_3} \times \frac{x-x_4}{x_2-x_4} + y_3 \frac{x-x_2}{x_3-x_2} \times \frac{x-x_4}{x_3-x_4} + y_4 \frac{x-x_2}{x_4-x_2} \times \frac{x-x_3}{x_4-x_3} \tag{17}$$

тобто

$$y_2^{'} = -5x^2 + 40x - 50. \tag{18}$$

Посилаючись на випадок с трьома точками, можна прийти висновку, що використовуючи такий метод вийде не дуже точний результат у місті перетину двох інтерполяційних кривих. Так воно і є, але важливою різницею є дві точки перетину інтерполяційних прямих, в випадку чотирьох точок їх буде дві Рис.10.

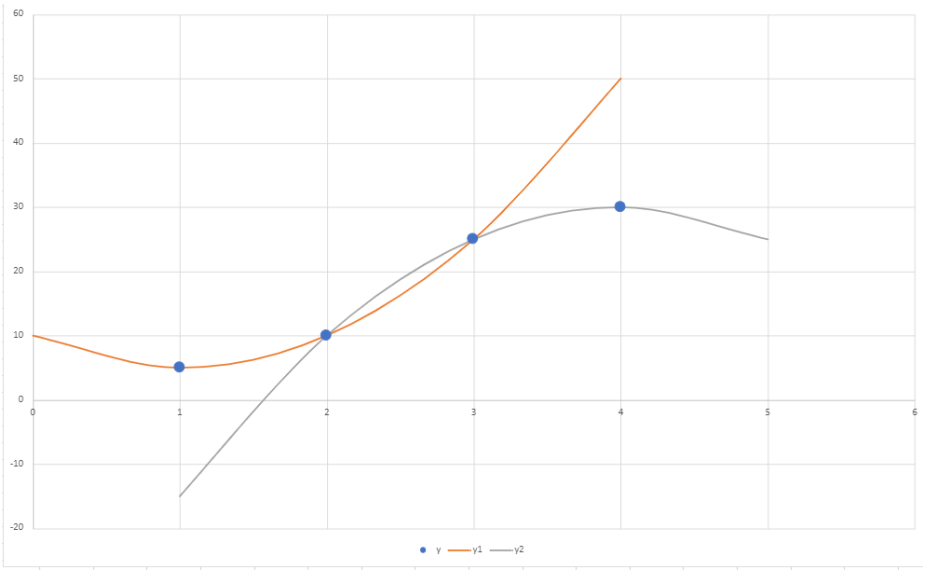


Рис.10.Дві квадратичні інтерполяційні прямі.

де y1 – квадратична інтерполяційна пряма міх точками x_1y_1, x_2y_2, x_3y_3, а y2 – x_2y_2, x_3y_3, x_4y_4

Щоб зробити плавний перехід між x_2y_2 та x_3y_3 побудуємо кубічну інтерполяційну криву між самими квадратичними інтерполяційними прямими (Рис.11):

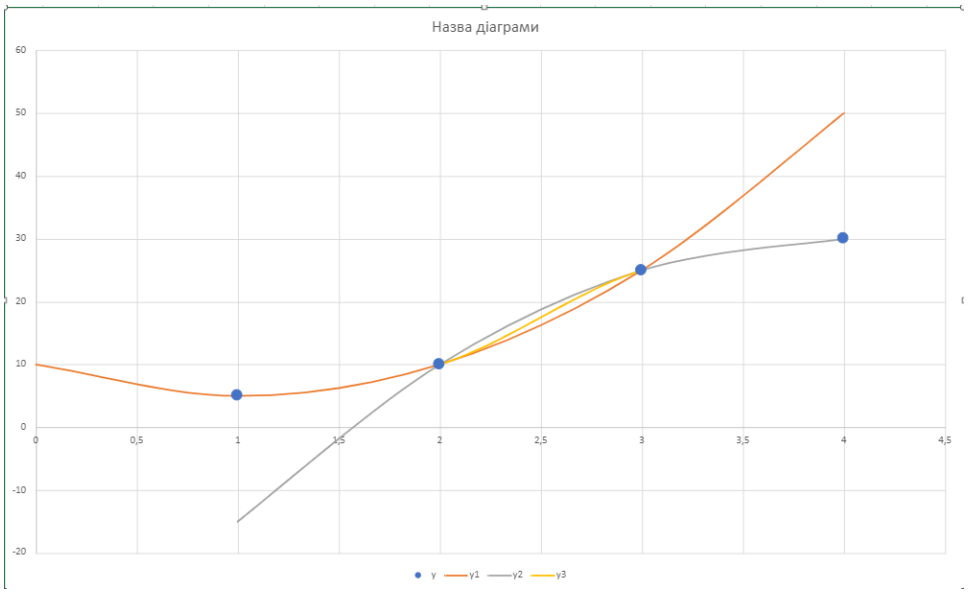


Рис.11.Графік с кубічною інтерполяційною кривою

$$y_{12}^{'} = y_1^{'} \times \frac{x-x_3}{x_2-x_3} + y_2^{'} \times \frac{x-x_2}{x_3-x_2} \quad (19)$$

Але окрім кубічної інтерполяція (звичайної інтерполяції поліномами) існує дуже багато інших видів інтерполяції. Один з них – інтерполяція сплайнами. Принципова відмінність ідеї сплайн-інтерполяції від інтерполяції поліномом полягає в тому, що поліном один, а сплайн складається з декількох поліномів, а саме їх кількість дорівнює кількості інтервалів, всередині яких вираховується інтерполяцію. У прикладі наведеному вище можна побачити три інтервали, звідси можна прийти висновку, що буде три сплайна.

Кожен із цих поліномів – це поліном третього ступеня (строго кажучи, ступеня не вище третього, тому що на якомусь із інтервалів інтерполююча крива може ставати квадратичною параболою або навіть лінійною функцією, але в загальному випадку це все-таки поліном саме третього ступеня) . Записуючи вищесказане формульно, отримаємо що всі наші точки будуть з'єднані якоюсь кривою $S = \{S_1, S_2, S_3\}$ де кожен S_i – це поліном третього ступеня, а саме:

$$S_i(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d \quad (20)$$

Для того, щоб однозначно задати один поліном 3-го ступеня, необхідно 4 умови. У прикладі є 3 полінома, тобто, щоб задати їх усі, потрібно сумарно 3·4=12 умов. Умови для існування сплайну:

1) Кожна точка, яка визначає поліном є його умовою, тобто для трьох поліномів, кожен з яких базується на двох точках, необхідно шість умов.

2) Для кожної проміжної точки з множини має виконуватися умова, що перші та другі похідні для лівого та правого поліномів повинні співпадати, тобто:

$$S_i'(a) = S_{i+1}'(a) \tag{21}$$

та

$$S_i''(a) = S_{+1i}''(a) \tag{22}$$

По дві такі умови на кожну із проміжних точок дає ще 4 умови. Слід додати, що ми ставимо лише сам факт рівності, яке конкретно значення вони у своїй приймають – це зовсім інше завдання і вважається вона досить складно.

3) Залишились «граничні умови», від завдання яких і залежить, який сплайн вийде. Необхідно, щоб одна з умов виконувалась.

a) «Природний сплайн»:

$$S_i'(a) = S_i'(b) = 0 \tag{23}$$

b) Безперервність другої похідної:

$$S_i''(a) = S_i''(b) \tag{24}$$

c) Періодичний сплайн:

$$S(a) = S(b),\ S_i'(a) = S_i'(b),\ S_i''(a) = S_i''(b) \tag{25}$$

Ці властивості спаленів зробили їх потужним інструментом в задачах фізики, в яких необхідно зробити гладку апроксимацію експериментальних даних. Ми також будемо використовувати в нашій задачі такі підходи. Вони дозволять нам побудувати локальну процедуру калібрування відклику кожного окремого пікселу детектора.

3.2. Код програми та реалізація

Для реалізації програми була обрана середа розробки Microsoft Visual Studio Community 2021. За допомогою інструментів Windows Forms було створено основний діючий функціонал та інтерфейс (Рис.12)

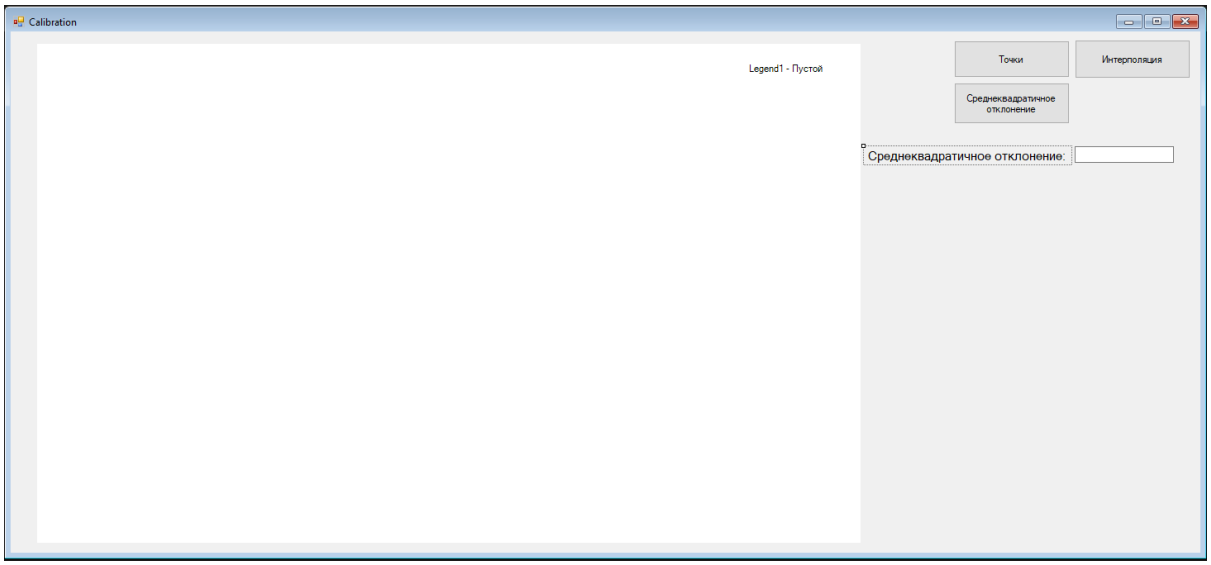


Рис.12.Інтерфейс програми

Наявні наступні кнопки:

- «Точки» - відображення на графіку заданих точок.
- «Интерполяция» - інтерполяція по заданим точкам.
- «Среднеквадратичное отклонение» - знаходження середньоквадратичного відхилення цифрового зображення

Для перевірки роботи програми використаємо набір із семи точок:

$$(1,5); (2,10); (3,25); (4,30); (5,25); (6,40); (7,30);$$

Беручи по три точки, для побудування квадратичної інтерполяції, необхідно буде побудувати всього п’ять квадратичних інтерполяцій та чотири кубічних інтерполяцій. Код програми Рис.13

```
Colibration_algorithm | ColibrationalgorithmCalibration | least_squares_Click(System::Object ^ sender, System::EventArgs ^ e)

System::Void ColibrationalgorithmCalibration::least_squares_Click(System::Object^ sender, System::EventArgs^ e)
{
    System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::Series^ series5 = (gcnew System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::Series());
    series5->ChartArea = L"ChartArea1";
    series5->ChartType = System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::SeriesChartType::Line;
    series5->Legend = L"Legend1";
    series5->Name = L"Интерполяция";
    this->chart1->Series->Add(series5);

    double x_sum = 0, y_sum = 0, xy_sum = 0, x2_sum = 0, y_inter1, y_inter2, y_cinter, x_cord = 0;

    for (int i = 0; i < size_mass-3; i++) {
        for (x_cord = mass[i][0]; x_cord <= mass[i + 3][0];) {
            y_inter1 =
                mass[i][1] * (x_cord - mass[i + 1][0]) / (mass[i][0] - mass[i + 1][0]) * (x_cord - mass[i + 2][0]) / (mass[i][0] - mass[i + 2][0]) +
                mass[i + 1][1] * (x_cord - mass[i][0]) / (mass[i + 1][0] - mass[i][0]) * (x_cord - mass[i + 2][0]) / (mass[i + 1][0] - mass[i + 2][0]) +
                mass[i + 2][1] * (x_cord - mass[i][0]) / (mass[i + 2][0] - mass[i][0]) * (x_cord - mass[i + 1][0]) / (mass[i + 2][0] - mass[i + 1][0]);
            y_inter2 =
                mass[i+1][1] * (x_cord - mass[i + 2][0]) / (mass[i + 1][0] - mass[i + 2][0]) * (x_cord - mass[i + 3][0]) / (mass[i + 1][0] - mass[i + 3][0]) +
                mass[i + 2][1] * (x_cord - mass[i + 1][0]) / (mass[i + 2][0] - mass[i + 1][0]) * (x_cord - mass[i + 3][0]) / (mass[i + 2][0] - mass[i + 3][0]) +
                mass[i + 3][1] * (x_cord - mass[i + 1][0]) / (mass[i + 3][0] - mass[i + 1][0]) * (x_cord - mass[i + 2][0]) / (mass[i + 3][0] - mass[i + 2][0]);

            y_cinter = y_inter1 * (x_cord - mass[i + 2][0]) / (mass[i + 1][0] - mass[i + 2][0]) + y_inter2 * (x_cord - mass[i + 1][0]) / (mass[i + 2][0] - mass[i + 1][0]);

            if (x_cord < mass[1][0] ) {
                this->chart1->Series[1]->Points->AddXY(x_cord, y_inter1);
            }
            else if (x_cord > size_mass - 1 || x_cord == mass[size_mass][0]) {
                this->chart1->Series[1]->Points->AddXY(x_cord, y_inter2);
            }
            else if (x_cord <= mass[i + 2][0] && x_cord >= mass[i + 1][0]) {
                this->chart1->Series[1]->Points->AddXY(x_cord, y_cinter);
            }
            x_cord = x_cord + 0.1;
        }
    }
}

System::Void ColibrationalgorithmCalibration::mean_square_Click(System::Object^ sender, System::EventArgs^ e) {
```

Рис.13.Код програми для інтерполяції

Результат роботі програми Рис.3.2.3.

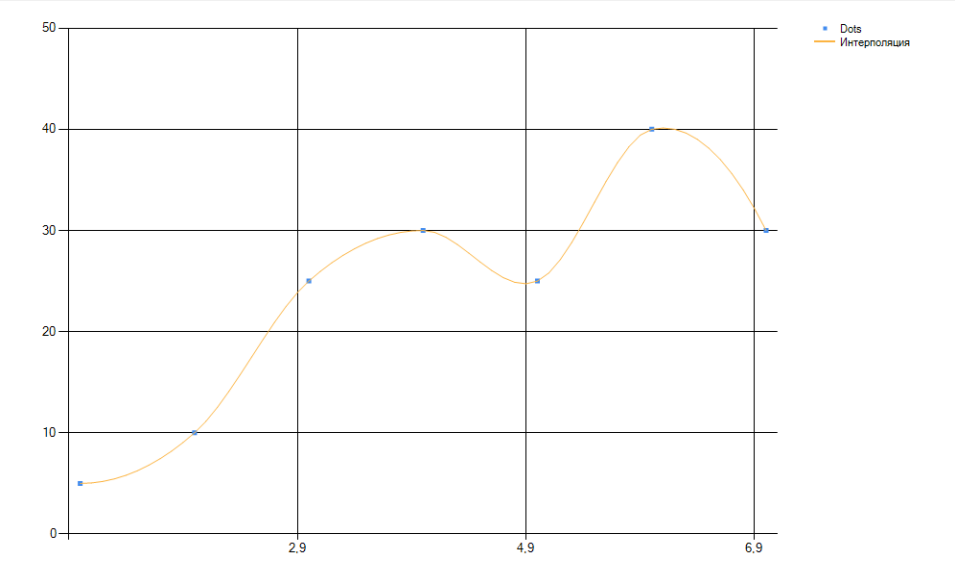


Рис.14. Графік інтерполяції по заданим точкам

Таки сином ми продемонструвати реалізацію запропонованого алгоритму, який дозволяє для кожної області яскравості знаходити свою функцію передачі, та реалізує плавний перехід між цими областями.

3.3. Задачі фільтрації

Зараз світ тісно зв’язаний з використанням цифрових зображень, починаючи від використання у томографії та закінчуючи обробкою знімків для фіксації дорожніх правопорушень. Головною метою фільтрації зображень є поліпшення самого зображення для його подальшого використання. У випадку фільтрації цифрового зображення, числові характеристики яскравості та контрасту будь-якої точки цифрового зображення, замінюється іншим значенням яскравості та контрасту, які визначаються в найменшій мірі появленням шуму [1]. Через це дуже часто задача контрастування цифрового зображення приводить к його фільтрації.

Розрізняють такі види фільтрації: частотна і просторова [1]. Частотні методи перетворень цифрових зображень [2-8] базуються на принципі перетворення Фур'є, основна ідея полягає в знаходженні вихідної функції як суми тригонометричних функцій різних частот, помножених на задані коефіцієнти. В тому випадку, якщо отримана функція періодична отримане представлення називається рядом Фур'є. В другому випадку, отримана неперіодична функція, яка має кінцеву площу під графіком, виражається як інтеграл від тригонометричних функцій, помножених на деяку вагову функцію [2]. Другий випадок - це перетворенням Фур'є і в більшості практичних задач являється більш інформативним, ніж ряд Фур'є. Також слід зауважити, що важливою властивістю Фур'є-перетворення можна назвати те, що після здійснення над даною функцією перетворень її можна повернути до початкового стану. Виходячи с цього, даний метод дозволяє обробляти частотну функцію в області, після чого повернутися до початкового вигляду без втрати інформації. Також перетворення Фур'є може застосовуватися для вирішення завдань фільтрації зображень. У практичних задачах реалізація частотних методів може бути аналогічна просторовим методам фільтрації [10-19].

Для використання просторових методів фільтрації цифрове зображення представляють у вигляді матриці масок. Ідея просторових алгоритмів полягає у використанні спеціальних операторів до кожного числового значення точки цифрового зображення. В якості таких операторів використовують прямокутні або квадратні матриці, які називають масками, ядрами чи вікнами [2-8]. На цьому методі фільтрації базуються лінійні, нелінійні (медіанні) та комбіновані (адаптивні) типи фільтрів.

При використані лінійної фільтрації вихідне значення пікселя задається сумою множення пікселів в області використання фільтра. У якості лінійного згладжуючого фільтра використовується усереднюючий фільтр з вихідним значенням, яке є середнім по усім крайнім пікселям маски фільтра. Такий фільтр використовується для видалення зернистості, яка була викликана імпульсним шумом.

Нелінійні фільтри подібні, в своєму підході, до лінійних. Операції чи перетворення, які базуються на методі нелінійної фільтрації, залежать від числових значень елементів матриці цифрового зображення, які знаходяться в аналізованій масці [20].

Найпростішим та базовим методом нелінійної фільтрації є медійний фільтр. Принцип роботи медіанного фільтра полягає в обчисленні медіани усіх значень пікселів зображення в аналізованому вікні. При медіанній фільтрації значення пікселів обчислюється як усереднене значення усіх точок відповідної маски. Зазвичай при вирішенні прикладних задач обробки цифрових зображень медіанний фільтр є більш ефективним, а ніж звичайне усереднення, так як, при його використанні, виникають менші спотворення границь об’єктів обробленого зображення. Маски медіанної фільтрації представляють собою двовимірне вікно з однаковим значенням висоти та ширини, при цьому його центр розташовується в поточній точці фільтрації (Рис.1.1) [21-27]. Метод двовимірного медіанного фільтра визначає формула:

$$G_{i,j} = med\left[E_{i+s,j+t}; (s,t) \in W\right]; i,j \in Z^2 \qquad (26)$$

де $G_{i,j}$-елемент матриці пікселів цифрового зображення після фільтрації, $E_{i,j}$ - елемент матриці початкового зображення, $W_{s,t}$-елемент масиву ядра згортки зображення.

223	186	114
204	161	106
219	194	138

106 114 138 161 **186** 194 204 219 223

Рис.15. Робоче вікно при використанні медіанної фільтрації.

Однак, при застосуванні медіанного і лінійного фільтрів не враховується те, що параметри цифрового зображення змінюються при переході від точки до точки. В свою чергу, адаптивні фільтри позбавлені цього недоліку через те, що в залежності від характеристик зображення їх властивості змінюються. Функціонал адаптивних фільтрів може бути ширшим, а ніж лінійних і медіанний фільтрів, на основі яких вони створені. Все це залежить, як від характеристик самого цифрового зображення, так і від степені шуму на ньому. Нажаль при цьому збільшується складність алгоритмів і час роботи фільтра.

За основу в адаптивній лінійній фільтрації покладено вінеровський фільтр, який, в свою чергу, є одним з типів лінійного фільтра для адаптивної локальної обробки цифрових зображень [9]. Якщо значення середньоквадратичного відхилення інтенсивностей пікселів в розглядаємій

локальної області велике, то вінеровский фільтр виконує невелике згладжування і, навпаки, при меншому відхиленні область згладжування більше. Цей підхід часто буває ефективнішим, ніж звичайна лінійна фільтрація. До того ж перевага адаптивний фільтра ще полягає в тому, що він зберігає краї та інші високочастотні частини об'єктів зображення. Однак, час для обчислень вінеровського фільтра більший, а ніж в випадку лінійного фільтра.

Середнє значення яскравості обчислюється для центрального пікселя маски W_{ij} і містить значення яскравості вихідного цифрового зображення в обмеженій маскою локальної області зображення за формулою:

$$\overline{w} = \frac{1}{m*n} * \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} W_{ij} \quad (27)$$

Дисперсія маски дорівнює:

$$\delta^2 = \frac{1}{m*n} * \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} (W_{ij} - \overline{w})^2 \quad (28)$$

В даному алгоритмі для кожного нового положення вікна маски заново обчислюються відповідні значення. Згладжування шуму оцінюється через середнє квадратичне відхилення:

$$\delta = \sqrt{\delta^2} \quad (29)$$

В роботі [14] було описано адаптивний алгоритм на базі медіанного фільтра. При використанні медіанного фільтра значення пікселя завжди замінюється медіаною розглядаємого вікна. Після медіанної фільтрації вихідне значення пікселя, при високій щільності імпульсного шуму помітно погіршується. Принцип адаптації базується на тому, що спочатку піксель виявляється на імпульс, після чого теж саме відбувається і з медіаною. Заміна відбувається тільки в тому випадку, якщо піксель представлений

імпульсом, а медіана - ні. Якщо медіана виявилася імпульсом, відбувається збільшення розмірів маски, що змінить значення медіани і, можливо, поліпшить результати оскільки тепер все обчислюється заново.

Збільшення розміру маски покращить видалення шуму, але використання даного методу пов’язано з спотворенням контурів або границь об’єктів. Через це розмір маски повинен змінюватись залежно від області цифрового зображення, в монотонних областях використовувати великі розміри маски, поблизу перепадів яскравості розмір вікна зменшувати. Це реалізовано в алгоритмі на основі обчислення дисперсії - локальної та всього зображення.

Також, розмиття цифрового зображення можливо зменшити, вибираючи серед точок маски такі, яскравості яких мають незначні відмінності від необхідного значення і обчислювати середнє по цим точкам. Такий фільтр називають адаптивним з вибором шаблону. Значення яскравості центрального елемента маски визначається як середнє значення пікселя в шаблоні і де дисперсія найменша. Окрім зменшень втрат корисної інформації на цифровому зображенні, така обробка дозволяє використовувати алгоритм фільтрації до різних типів шуму, що дуже допомагає в фільтрації, якщо тип шуму заздалегідь невідомий.

Різні типи цифрових фільтрів використовують залежно від типу шуму, більш детально про такі випадки було описано у роботах [21, 23, 24,]. В дипломі для покращення вхідного зображення буде використовуватись метод низькочастотної фільтрації та метод фільтрації з накопичуванням після процедури локального калібрування запропонований у роботі.

ВИСНОВКИ

У роботі розроблені типи та задачі алгоритмів локального калібрування для детектування об’єктів малого контрасту в великій кількості різноманітних системах детектування. Шляхом одночасного застосування було проведено порівняння низки методів калібрування передаточних функцій яскравості з ціллю вибору найкращого з запропонованих алгоритмів. Як результат було показано ефективність методу локального калібрування в послідовних діапазонах яскравості.

Під час виконання дипломної роботи досліджувалась ефективність запропонованого в дипломі методу покращення детектування об’єктів малого контрасту у порівнянні з іншими методиками калібрування детекторів зображень. Як результат дипломної роботи був розроблений математичний алгоритм для реалізації запропонованого методу, який ураховував особливості нелінійної системи детектування в широкому динамічному діапазоні. Цей алгоритм був застосований у програмному забезпеченні, яке є частиною програмно-апаратного комплексу обробки зображень. Було проведено практичне тестування роботи програми на реальних зображеннях та визначена висока якість запропонованих методів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. J.E. Garcia, *et al.*, "Linearisation of RGB camera responses for quantitative image analysis of visible and UV photography: a comparison of two techniques," PLoS ONE 8(11): e79534, 2013.

2. Y.Bérube, *et al.*, "Color camera characterization with an application to detection under daylight," Vision Interface, Canada, pp. 280-287, 1999.

3. F. Wang, *et al.*, "A Highly Linear CMOS Image Sensor with a Digitally Assisted Calibration Method, " in Proc. Int. Image Sensors Workshop, Japan, pp. 336-339, 2017.

4. F. Wang, *et al.*, "Techniques for Pixel-level linearity optimization," presented at the workshop of CMOS Image Sensors for high performance applications, France, 2017.

5. F. Wang, *et al.*, "Linearity analysis of a CMOS image sensor," in Proc.Electronic Imaging, San Francisco, pp. 84-90, 2017.

6. Y. Wang, *et al.*, "Comparison of several ramp generator designs for column parallel single slope ADCs," in Proc. Int. Image Sensors Workshop, Norway, pp. 112-116, 2009.

7. Y. Oike, *et al.*, "An 8.3M-pixel 480fps Global-Shutter CMOS Image Sensor with Gain-Adaptive Column ADCs and 2-on-1 Stacked Device Structure," IEEE Symp. VLSI Circuits, pp. 222-223, 2016.

8. A. Suzuki, *et al.*, "A 1/1.7-inch 20 Mpixel back-illuminated stacked CMOS image sensor for new imaging applications," IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. Dig. Tech. Papers (ISSCC), pp. 110-111, 2015.

9. S. Lim, *et al.*, "A high-speed CMOS image sensor with column-parallel two-step single-slope ADCs,"

10. Н.Н. Бондина, Р.Ю. Муратов, Адаптивные алгоритмы фильтрации и изменения контраста изображения – Вестник НТУ "ХПИ" – 2014 – № 35 (1078) – С. 35 – 41

11. В.Ю. Гусев, А.В. Крапивенко, Методика фильтрации периодических помех цифровых изображений – Электронный журнал «Труды МАИ» – Выпуск – № 50 – С. 1–7.

12. Л.Р. Юнусова, А.Р. Магсумова, Фильтрация шумов – Научный журнал – 2020 – С. 41-42

13. Н.Н. Бондина, А.С. Калмычков, В.Э. Кривенцов, Сравнительный анализ алгоритмов фильтрации медицинских изображений – Вестник НТУ «ХПИ» – 2012 – № 38 – С. 14-24.

14. Р. Гонзалес, Р. Вудс, Цифровая обработка изображений – М.Техносфера, 2006. – С. 1072

15. Н.Н. Бондина, А.С. Калмычков, В.Э. Кривенцов, Сравнение алгоритмов фильтрации медицинских изображений – Вестник НТУ "ХПИ" – 2012 – № 38 (1012) – С. 14-25

16. В. В. Стругайло, Обзор методов фильтрации и сегментации цифровых изображений – ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл № ФС 77 – 48211 – С. 270-278

17. Н.Н. Бондина, А.С. Калмычков, О.А. Козина, Сравнение алгоритмов фильтрации медицинских изображений по оценкам их качества – Вестник НТУ "ХПИ" – 2013 – № 39 (1012)

18. В. Стругайло, Обзор методов фильтрации и сегментации цифровых изображений – ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл № ФС 77 – 48211 – С. 270-278

19. Н.Е. Андронова, П.Е.Гребенюк, А.М.Чмутин, Алгоритм и програмная реализация укправления оттеночным контрастом цифровых изображений – Инженерный вестник Дона – 2016 – № 4 – С. 15 – 21

20. Р. Гонсалес, Р. Вудс Цифровая обработка изображений. - М.:Техносфера, 2005. – 1072 с.

21. У. Прэтт Цифровая обработка изображений. – 1982. – Т. 1 – 310 с.

22. Non-destructive testing. Image quality of radiographs. Part 5. Determination of the image unsharpness value using duplex wire-type image quality indicators. – ISO 19232-5 – 2013 – 3 p.

23. U. Ewert, U. Zscherpel, K Bavendie, Replacement of film radiography by digital techniques and enhancement of image quality – Berlin – BAM Federal Institute for Materials Research and Training – 2007 – 14 p.

24. Ю.П. Михайлюк, Д.В. Начаров, Метод улучшения различимости объектов на цифровых изображениях, полученных в условиях недостаточной видимости – «Журнал радиоэлектроники» №6 – 2015

25. С.С. Завалишин, Алгоритм адаптивного контрастирования изображений – «Цифровая Обработка Сигналов» №3 – 2016 – С.60-65

26. А.А. Майоров, Цифровые технологии в радиационном контроле – «В мире НК » – № 1(35) – 2007 – с.5-12

26. Non-destructive testing. Image quality of radiographs. Part 5. Determination of the image unsharpness value using duplex wire-type image quality indicators. – ISO 19232-5 – 2013 – 3 p.

27. U. Ewert, U. Zscherpel, K Bavendie, Replacement of film radiography by digital techniques and enhancement of image quality – Berlin – BAM Federal Institute for Materials Research and Training – 2007 – 14 p.