

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи
магістра

на тему: **Комп'ютеризована система вимірювання геометричних параметрів
промислових виробів на машинобудівному підприємстві**

Виконав: студент 2 курсу, групи ІВТ-3м
Спеціальності: 175 «Інформаційно-
вимірювальні технології»
Невмержицький Володимир Сергійович
(прізвище та ініціали)

Керівник:
д.е.н., к.т.н., професор
Єфіменко Надія Анатоліївна
(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище та ініціали)

Рецензент:

(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище та ініціали)

Житомир – 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки
Кафедра метрології та інформаційно-вимірювальної техніки
Спеціальність 175 «Інформаційно-вимірювальні технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри інформаційно-
вимірювальних технологій

д.т.н., професор Подчашинський Ю.О.

« _____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу магістра

Студент _____ Невмержицький Володимир Сергійович

1. Тема роботи: Комп'ютеризована система вимірювання геометричних пара-
метрів промислових виробів на _____ машинобудівному підприємстві

Керівник роботи:

затверджена наказом по університету від « ____ » _____ 2025 р. № _____

2. Термін здачі закінченої роботи на кафедру « ____ » _____ 2025р.

3. Вихідні дані до роботи Розробка комп'ютеризованої системи вимірювання
геометричних параметрів промислових виробів на основі комп'ютерного
зору

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які підлягають розробці)

Огляд та аналіз методів, математичне моделювання, розробка структурної схеми
розробка програмного забезпечення, розробка метрологічного забезпечення

5. Перелік графічного матеріалу

структурна схема, блок-схема алгоритму,

6. Консультанти кваліфікаційної роботи магістра із зазначенням розділів

роботи, що їх стосуються

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1-2			
3-4			
5			

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд та аналіз існуючих методів вимірювання		Виконано
2	Математичне моделювання КІВС		Виконано
3	Технічні засоби КІВС		Виконано
4	Розробка програмного забезпечення		Виконано
5	Розробка метрологічного забезпечення і розрахунок метрологічних характеристик		Виконано
6	Оформлення пояснювальної записки		Виконано
7			
8.			
9			

Студент

Невмержицький В.С.

(підпис)

Керівник роботи

(підпис)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота присвячена розробці **комп'ютеризованої системи вимірювання геометричних параметрів промислових виробів на машинобудівному підприємстві.**

Актуальність теми полягає у необхідності впровадження сучасних високотехнологічних методів контролю якості, які здатні забезпечити високу точність, швидкість та автоматизацію виробничих процесів.

Метою роботи являється розробка комп'ютеризованої інформаційно-вимірювальної системи для визначення геометричних параметрів виробів машинобудівного підприємства на основі їх відеозображень.

Для досягнення поставленої мети було поставлено і вирішено наступні *задачі*:

Проаналізовано актуальні методи вимірювання геометричних параметрів об'єктів за їх відеозображеннями, проведено аналіз уже існуючих систем аналогічного призначення, розроблено структурну схему, розроблено алгоритм і програмне забезпечення системи. Проведено експериментальні дослідження і обраховано невизначеність вимірювань, а також похибку вимірювань.

Об'єктом дослідження є процес вимірювання геометричних параметрів об'єктів за їх відеозображеннями.

Предметом дослідження є комп'ютеризована система вимірювання геометричних параметрів промислових виробів на машинобудівному підприємстві.

Методом дослідження є розробка програмно-алгоритмічного забезпечення на основі алгоритмів комп'ютерного зору (сегментація, виділення контурів, субпіксельна точність), методи цифрової обробки сигналів, а також комп'ютерне моделювання з подальшою статистичною оцінкою результатів.

У *першому* розділі було проведено загальний огляд методів та засобів вимірювання геометричних параметрів об'єктів за їх відеозображеннями. Оглянуто існуючі рішення.

У *другому* розділі було розглянуто математичні основи на яких будуються вимірювання на основі відеозображень.

У *третьому* розділі було обрано та обґрунтовано вибір апаратного забезпечення для КІВС.

У *четвертому* розділі було обґрунтовано вибір технологій для розробки програмного забезпечення КІВС.

У *п'ятому* розділі було проведено аналіз існуючих стандартів в галузі вимірювань на основі комп'ютерного зору. Проведено експериментальні заміри, і визначено релативні похибки вимірювань розроблюваної системи.

Наукова новизна полягає в удосконаленні існуючої схеми комп'ютеризованої системи вимірювання геометричних параметрів промислових виробів на машинобудівному підприємстві шляхом впровадження в конструкцію більш якісних камер. А також удосконалення програмно-алгоритмічного забезпечення, шляхом інтеграції веб-технологій, і впровадження методів підвищення точності вимірів.

Практичне значення роботи полягає в отриманні готового концепту приладу, що відповідає стандартам, який може скласти конкуренцію зарубіжним аналогам за нижчу ціну, а також має можливість інтеграції у робочі процеси існуючих машинобудівних підприємств.

Робота складається з реферату, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, __ рисунків, __ таблиць та __ літературних джерел.

Ключові слова: інформаційно- вимірювальна система, комп'ютерний зір, геометричні параметри, обробка зображень, безконтактне вимірювання, калібрування.

ЗМІСТ

П

В

Е АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ТА

Е

М

Н
П2 Принцип роботи відеовимірювальної машини 16

Ю3 Калібрування системи..... 18

Б4 Аналогічні технічні рішення, що доступні на ринку 19

Р
Висновки до першого розділу..... 26

М МАТЕМАТИЧНІ ОСНОВИ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ

ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

Н

Н

И1 Виділення контурів прямих об'єктів на відео зображеннях 28

И2 Виділення круглих об'єктів на відеозображеннях 32

К3 Математичні основи калібровки камери шляхом використання

Иахової дошки (Метод Чжана)..... 34

Т
И4 Математична модель інформаційно-вимірювальної системи

Вимірювання геометричних параметрів виробів на машинобудівному

Відприємстві за їх відео зображеннями. 37

Висновок до другого розділу 37

М ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ

ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

Н

Н

Висновки до третього розділу..... 44

В

В Огляд методів вимірювання за відеозображеннями..... 12

М

М

Б

4.1 Вибір технологій для розробки.....	45
4.2 Алгоритм роботи програми.....	46
4.3 Ініціалізація камери	48
4.4 Калібрування.....	49
4.5 Видалення шумів/тіней та бінаризація зображення	51
4.6 Вимірювання розмірів об'єктів	53
4.7 Зберігання даних та логування	56
Висновки до четвертого розділу.....	59

Р.1 Законодавча база метрологічного забезпечення.....	60
Р.2 Визначення невизначеності	61
Р.3 Обчислення похибки вимірювання для автоматичного режиму вимірювань.....	64
Висновки до п'ятого розділу.....	66

В

И

ДОДАТКИ Помилка! Закладку не визначено.

Додаток А Помилка! Закладку не визначено.

Додаток Б..... Помилка! Закладку не визначено.

Додаток В Помилка! Закладку не визначено.

Додаток Г Помилка! Закладку не визначено.

К

В

И

Ю

О

Р

И

Н

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

IBC / IMS - інформаційно-вимірювальна система;

ШІ / AI - штучний інтелект;

CNN - згорткова нейронна мережа; архітектура для аналізу зображень.

SIFT - Scale-Invariant Feature Transform; алгоритм виділення ознак.

SURF - Speeded-Up Robust Features; алгоритм виділення ознак.

ORB - Oriented FAST and Rotated BRIEF; швидкий дескриптор ознак.

YOLO - You Only Look Once; детектор об'єктів у реальному часі.

Mask R-CNN - Mask Region-based CNN; сегментація з масками.

ViT - Vision Transformer; трансформер для обробки зображень.

GAN - Generative Adversarial Network; генеративно-змагальна мережа.

SVD - сингулярний розклад (Singular Value Decomposition); чисельний метод.

GUM - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement; гайд з оцінки

вимірювань

ВСТУП

Машинобудування є однією з ключових галузей української економіки, що визначає рівень технологічного розвитку країни та її конкурентоспроможність на світовому ринку. Проте сучасний стан галузі характеризується низкою негативних тенденцій: зниженням прибутковості підприємств, неефективним використанням виробничих ресурсів, застарілим обладнанням, скороченням чисельності персоналу та недостатньою якістю кінцевої продукції.

Актуальність теми полягає у необхідності впровадження сучасних високотехнологічних методів контролю якості, які здатні забезпечити високу точність, швидкість та автоматизацію виробничих процесів. Одним із найбільш перспективних напрямів є застосування систем машинного зору та відеовимірювальних технологій для безконтактного визначення геометричних параметрів деталей. Такі системи дозволяють мінімізувати вплив людського фактора, скоротити час вимірювань та забезпечити 100% контроль продукції.

Прямими аналогами на міжнародному ринку є комплекси **Keyence IM**, які підтверджують актуальність та затребуваність подібних технологій. Водночас їхні недоліки - висока вартість, складність інтеграції у виробничі процеси, обмеженість у модифікації програмного забезпечення та залежність від сервісних послуг виробника - створюють потребу у розробці вітчизняної системи з покращеними характеристиками.

Мета роботи:

Розробка комп'ютеризованої інформаційно-вимірювальної системи для визначення геометричних параметрів виробів машинобудівного підприємства на основі їх відеозображень

Завдання дослідження:

- розробити структурну схему системи;
- створити програмне забезпечення для обробки зображень та визначення параметрів;
- провести експериментальні вимірювання для оцінки точності системи;
- визначити метрологічні характеристики системи.

Об'єкт дослідження:

Процеси вимірювання та контролю геометричних параметрів виробів у машинобудуванні.

Предмет дослідження:

Комп'ютеризована інформаційно - вимірювальна система для визначення геометричних параметрів деталей.

Методи дослідження:

Аналітичне моделювання вимірювального каналу, алгоритми комп'ютерного зору (сегментація, виділення контурів, субпіксельна точність), методи цифрової обробки сигналів, а також комп'ютерне моделювання з подальшою статистичною оцінкою результатів.

Наукова новизна:

- удосконалено структурну схему інформаційно- вимірювальної системи;
- розроблено алгоритми обробки зображень для підвищення точності вимірювань;
- отримано математичну модель вимірювального каналу;

Практична цінність:

- визначено метрологічні характеристики системи;
- обґрунтовано можливість інтеграції у виробничі процеси машинобудівних підприємств;
- запропоновано альтернативу дорогим закордонним аналогам, що забезпечує високу точність та гнучкість при нижчій вартості.

Публікації. За темою кваліфікаційної магістерської роботи було опубліковано тезу на науково- практичній конференції.

Лугових О.О., Невмержицький В. С., Державний університет «Житомирська політехніка» КОМП'ЮТЕРИЗОВАНА СИСТЕМА ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИРОБІВ НА МАШИНОБУДІВНОМУ ПІДПРИЄМСТВІ ЗА ЇХ ВІДЕОЗОБРАЖЕННЯМИ ТЕЗИ ДОПОВІДЕЙ XV Міжнародної науково- технічної конференції Інформаційно- комп'ютерні технології , 28- 29 березня 2025 р. Режим доступу: <https://conf.ztu.edu.ua/wp->

Подчашинський, Ю., Лугових, О., Полянська, А., & Невмержицький, В. (2025). Інформаційно-вимірювальна система для визначення геометричних параметрів та параметрів руху промислових виробів за їх відеозображеннями. *Технічна інженерія*, (1(95), 403–410. [https://doi.org/10.26642/ten-2025-1\(95\)-403-410](https://doi.org/10.26642/ten-2025-1(95)-403-410)

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ОБ'ЄКТІВ ЗА ЇХ ВІДЕОЗОБРАЖЕННЯМИ

Огляд методів вимірювання за відеозображеннями

Сучасний стан сфери інформаційних технологій забезпечує нам різноманітні методи вимірювання на основі обробки відеозображень, що дозволяє точно визначати розміри об'єктів. До основних належать геометричні методи, фотограмметричні методи, а також методи комп'ютерного зору та ШІ. В даній роботі використовуються геометричні методи та методи комп'ютерного зору.

Геометричні методи вимірювання на основі відеозображень забезпечують визначення геометричних параметрів та просторових характеристик об'єктів за допомогою цифрових зображень або відеопослідовностей. Основна мета цих методів полягає у визначенні кількісних геометричних характеристик реальних об'єктів, таких як розміри, форма, положення та орієнтація у просторі, а також параметри їхнього руху - швидкості, прискорення та траєкторії [1]. Будь-який геометричний метод вимірювання ґрунтується на моделюванні процесу формування зображення. Камера розглядається як проєкційна система, яка перетворює точки реального простору в точки на площині зображення відповідно до правил центральної (проєктивної) проєкції. Точність відновлення метричних характеристик визначається:

- параметрами внутрішньої калібрування (фокусна відстань, коефіцієнти дисторсії, головна точка);
- параметрами зовнішньої калібрування (положення та орієнтація камери в просторі);
- точністю визначення відповідних точок між зображеннями.

На практиці використовуються різні геометричні підходи, що відрізняються залежно від кількості камер та типу додаткових даних.

Моновимірювання (Single View Metrology) передбачає використання лише одного зображення для отримання геометричної інформації про об'єкт. Оскільки

однокамерне зображення втрачає інформацію про глибину, відновлення метричних характеристик потребує додаткових апіорних даних. До таких даних належать:

- відомі розміри еталонних об'єктів;
- орієнтовані площини (наприклад, підлога чи стіна);
- точки зникання та лінії горизонту, які визначають напрямки паралельних у сцені прямих.

Метод базується на фундаментальних положеннях проєктивної геометрії. За допомогою метричних та афінних інваріантів можна визначати відношення відстаней або абсолютні розміри об'єктів на площині. Попри обмеження точності, моновимірювання є незамінним при аналізі статичних сцен або у випадках, коли додаткове обладнання недоступне [1-2].

Метод стереозображення (Stereo Vision) є однією з найбільш поширених технологій отримання тривимірної інформації. Він використовує два або більше зображень, зафіксованих камерами з різною просторовою позицією. Основним параметром, що дозволяє відновити глибину, є диспаратність - різниця координат відповідних точок на двох зображеннях. Стереобачення спирається на низку фундаментальних математичних понять:

- епіпольна геометрія, яка визначає обмеження на відповідність точок між зображеннями;
- фундаментальна та есенціальна матриці, що формалізують зв'язок між двома видами сцени;
- алгоритми stereo matching, що забезпечують пошук кореспондуючих пікселів і обчислення карти глибин.

Стереосистеми забезпечують високу точність вимірювань, що робить їх ефективними у робототехніці, автоматизованому контролі якості, навігації автономних систем та промислових вимірюваннях.

Метод структурованого світла (3D-сканування) належить до активних методів вимірювання, оскільки передбачає проєкцію контрольованих світлових патернів на поверхню досліджуваного об'єкта. Камера реєструє зміну форми цих патернів під впливом геометрії поверхні, що дає можливість точно відновити тривимірну

структуру сцени.

Основні етапи методу включають:

- формування висококонтрастних світлових структур (сіток, смуг, кодованих сигналів);
- аналіз їхньої деформації на зображенні;
- використання триангуляційних моделей для визначення глибини.

Структуроване світло забезпечує надзвичайно високу точність та застосовується у 3D-скануванні, медичній діагностиці, біомеханіці, реверс-інжинірингу та контролі виробничих процесів.

Фотограмметричні методи. Фотограмметрія є однією з найдавніших та водночас найсучасніших технологій відтворення просторових характеристик об'єктів за допомогою їхніх зображень. На відміну від суто геометричних методів комп'ютерного зору, фотограмметрія становить комплекс методів реконструкції тривимірної структури сцени на основі наборів перекривних фотографій та математичних моделей центральної проєкції. Будь-який фотограмметричний метод базується на таких ключових етапах:

- Виявлення та ідентифікація спільних точок (feature detection & matching) на різних зображеннях.
- Оцінювання положення камер (camera pose estimation) - визначення параметрів зовнішнього та внутрішнього орієнтування.
- Триангуляція - обчислення тривимірних координат точок за результатами аналізу їхніх проєкцій на зображеннях.
- Аеротриангуляція та зрівнювання - оптимізація параметрів камер і 3D-точок шляхом мінімізації похибки проєкції (методом найменших квадратів, bundle adjustment).
- Побудова тривимірної моделі - створення хмари точок, сітчастої моделі (mesh) та текстурування.

Фотограмметричні методи тісно взаємопов'язані з проєктивною геометрією та статистичними методами оцінювання параметрів.

Методи комп'ютерного зору та штучного інтелекту становлять основу

сучасних систем автоматичного аналізу зображень і відео. Історично розвиток комп'ютерного зору розпочався з класичних алгоритмів обробки зображень та геометричного моделювання, однак із появою машинного навчання, а згодом і глибинних нейронних мереж, ця галузь зазнала суттєвого розвитку, що привело до радикального підвищення точності та універсальності візуальних систем.

Традиційні методи комп'ютерного зору спираються на математичний аналіз зображень, фільтрацію, виділення контурів та ознак, а також на використання моделей геометрії проєкцій. На початковому етапі обробка зображень включала застосування класичних фільтрів для покращення контрасту, зменшення шумів або виявлення меж, що дозволяло отримати первинні характеристики сцени. Подальший розвиток привів до створення методів детектування локальних особливостей - характерних точок або патернів, інваріантних до поворотів, масштабування чи зміни освітлення. Такі алгоритми, як SIFT, SURF, ORB чи Harris, стали фундаментальними для задач зіставлення зображень, стабілізації відео, робототехнічної навігації та тривимірної реконструкції. Водночас геометричні методи, такі як епіпольна геометрія, триангуляція, стереозір і калібрування камер, забезпечили можливість отримувати 3D-вимірювання та просторові моделі сцени, використовуючи лише дані камер.

Однак можливості традиційних підходів були обмежені тим, що вони покладалися на ручні, заздалегідь визначені ознаки, які не завжди ефективно описували складні та різноманітні об'єкти реального світу. Цю проблему було значною мірою вирішено завдяки інтеграції методів машинного навчання. Спочатку використовувалися класичні алгоритми - метод опорних векторів, випадкові ліси, k-ближчих сусідів чи Adaboost. Вони дозволяли навчати системи розпізнавати об'єкти або класифікувати зображення, проте вимагали попередньої розробки інформативних дескрипторів, що обмежувало їхній потенціал.

Справжній прорив став можливим з появою глибинного навчання, зокрема згорткових нейронних мереж (CNN). На відміну від попередніх підходів, CNN здатні автоматично навчатися релевантних ознак без ручного втручання, оперуючи великими обсягами даних. Це зробило їх провідним інструментом для класифікації

зображень, локалізації та детекції об'єктів, сегментації сцен, відновлення глибини та реконструкції тривимірних структур. Архітектури на зразок ResNet, EfficientNet, YOLO чи Mask R-CNN стали стандартом у промислових, наукових та побутових застосуваннях. Сучасні моделі здатні не лише ідентифікувати об'єкти на зображеннях, а й виконувати відстеження рухомих цілей, прогнозувати їхню траєкторію та навіть генерувати нові зображення за допомогою GAN або дифузійних моделей.

Сучасна галузь вимірювань усе більше переходить до використання трансформерних архітектур. Vision Transformers (ViT) і моделей на їхній основі, включно з DETR для детекції та SegFormer для сегментації, демонструють здатність ефективно опрацьовувати як природні, так і технічні сцени, розглядаючи зображення як послідовність елементів, подібно до обробки тексту у природній мові. Ці підходи відкрили нові можливості для об'єднання методів комп'ютерного зору з алгоритмами природномовної обробки, що стало фундаментом для появи мультимодальних систем [26].

Сучасні системи технічного зору все частіше використовують гібридні підходи, що поєднують класичні геометричні моделі зі здатністю глибоких мереж до високорівневої інтерпретації даних. Наприклад, автономні транспортні засоби використовують детектори об'єктів на основі CNN або трансформерів для семантичного розпізнавання сцени, тоді як стереопари й SLAM-процедури забезпечують точне просторове позиціонування. Аналогічно в індустріальній автоматизації глибокі мережі застосовують для сегментації або класифікації об'єктів, тоді як геометричні методи визначають їхні координати та забезпечують коректну взаємодію роботизованих маніпуляторів з предметами [10].

1.2 Принцип роботи відеовимірювальної машини

Вимірювальна система машинного зору складається з двох частин: апаратної та програмної. Апаратна система відповідає за отримання зображення та виведення

результату. Програмна система виконує попередню обробки зображення та вимірювання геометричних параметрів.

Програмна частина включає чотири функції:

- отримання зображення;
- аналіз і обробка зображення;
- вимірювання розмірів;
- виведення результату.

Апаратна частина включає:

- джерело світла;
- об'єктив;
- камеру;
- карту отримання зображення.

Типова структурна схема комп'ютеризованої системи вимірювання геометричних параметрів на основі відеозображень представлена на рисунку 1.1.

Цифрові зображення, зібрані системою машинного зору, фіксують співвідношення розмірів цільових об'єктів. Але це співвідношення розмірів у пікселях. Щоб отримати конкретний геометричний розмір цілі, необхідно встановити зв'язок між положенням пікселів на зображенні та співвідношенням положення кожної точки в реальному світі. Цей процес називається калібруванням системи.

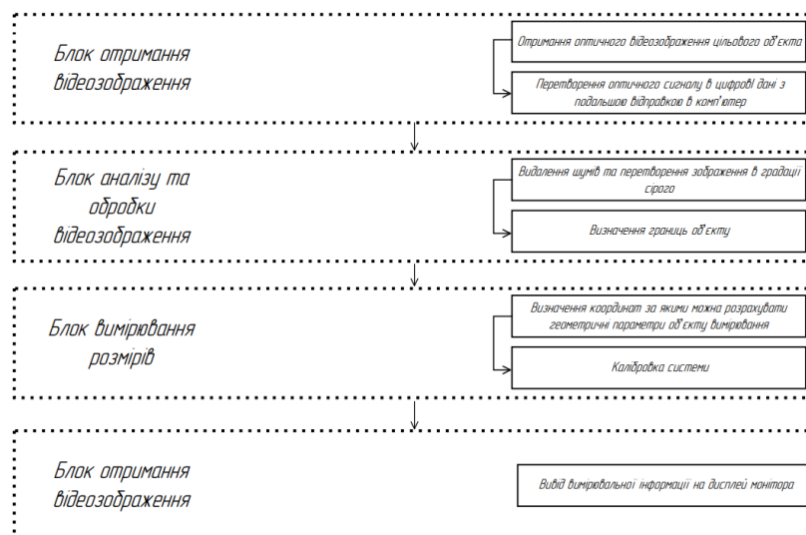


Рисунок 1.1 Структурна схема коп'ютеризованої ІВС

1.3 Калібрування системи

В розроблюваній ІВС було використано два методи калібрування: метод калібрування завідомо відомою масою, а також калібровка за допомогою шахової дошки.

Метод калібрування завідомо відомою масою полягає в наступному. Береться відомий блок маси (об'єкт розміри якого відомо заздалегіть, і не зміняться не зважаючи ні на що) як еталон, зображення маси вибирається з тими ж умовами вимірювання, що й фактичне вимірювання, і обчислюється значення пікселя в системі координат зображення. Відношення фактичного розміру еталону до розміру його пікселя є розміром калібрування камери. Під час вимірювання отримане зображення спочатку обробляється, а кількість пікселів у системі координат зображення підраховується та виражається як P . Воно порівнюється з фактичною довжиною L еталону, щоб отримати фактичний розмір S , якому відповідає кожен піксель. Можна виразити наступним чином (1.1).

$$S = \frac{L}{P} \quad (1.1)$$

S представляє фактичний розмір, що відповідає одному пікселю, а саме значення калібрування. Оскільки процес калібрування також вносить помилки, можна використовувати методи усереднення калібрування. Після отримання параметрів калібрування системи, розмір пікселя, отриманий за допомогою вимірювання зображення можна перетворити на фактичний розмір. Однак коефіцієнт калібрування таких систем потрібно повторно відкалібрувати після заміни різних частин, що підлягають вимірюванню, або умов вимірювання (освітлення, відстань видимості, фокусна відстань тощо).

Метод калібрування за допомогою шахової дошки дечим схожий з калібруванням з завідомо відомою масою, але при цьому має суттєві відмінності. Такою відмінністю є той факт, що для такого калібрування потрібно набагато більше візуальної інформації і майже не потрібна інформація про параметри камери,

її положення в просторі, освітлення тощо. Основна ідея методу полягає в тому, що камера спостерігає плоский шаблон - зазвичай це шахова дошка, надрукована на звичайному аркуші та прикріплена до твердої поверхні. Шахова дошка є ідеальним шаблоном, оскільки її кути легко та гарантовано детектуються алгоритмами комп'ютерного зору. Для калібрування достатньо зробити кілька знімків дошки під різними кутами. Ні точне положення камери, ні орієнтація шаблону не потребують вимірювання - це робить метод надзвичайно гнучким і зручним для подальшої роботи [15-16].

1.4 Аналогічні технічні рішення, що доступні на ринку

Досліджуючи тему вимірювань за відео зображеннями варто звернути увагу на вже існуючі рішення. Поставлені задачі можуть виконувати як готові пристрої, так і підсистеми в складі інших систем (наприклад в верстатах). Ці рішення можуть виконувати як повний цикл вимірювання, так і частково. До таких рішень відносяться:

- вимірювальні мікроскопи
- оптичні компаратори
- відеовимірювальні машини
- вимірювальні підсистеми в складі верстатів та конвеєрних ліній

Вимірювальні мікроскопи являють собою спеціалізовані оптичні вимірювальні прилади, що оснащені точними системами вимірювання лінійних розмірів та кутів, а також системою оцінки форм різних деталей (різьба, конуси, зубці, пази, профілі тощо). Використовується для контролю якості в промисловості, та точних вимірювань в метрології та науці.

Оптичний компаратор або цифровий вимірювальний проектор – це оптико-цифровий прилад, який використовує світло та систему лінз для збільшення зображення маленьких деталей, об'єктів або виробів, проєктуючи його на екран (або цифровий сенсор), щоб дозволити оператору точно вимірювати розміри, форми, відстані та дефекти за допомогою вбудованих цифрових шкал чи програмного

забезпечення, що значно підвищує точність порівняно з традиційними методами. Аналогічно вимірювальному мікроскопу використовується в промисловості для контролю якості продукції, а завдяки присутності програмного забезпечення розширюється покриття зони відповідальності відділів ВТК і забезпечується контроль більшої кількості параметрів, що в свою чергу позитивно відображається на якості продукції в майбутньому.



Рисунок 1.2 Вимірювальний мікроскоп Mitutoyo TM-505



Рисунок 1.3 Вимірювальний проектор Mitutoyo PJ-A3005 F-150

Відеовимірювальна машина/система представляє собою складний прецизійний інструмент який використовує відеокамери та програмне забезпечення для точного вимірювання розмірів, форм та інших геометричних характеристик об'єктів, замінюючи традиційні методи з контактними щупами, дозволяючи швидкий, безконтактний та високоточний контроль якості у промисловості.



Рисунок 1.4 Відеовимірювальна машина HD-68BA

Також особливу роль в світі вимірювань за відеозображеннями грають *вимірювальні підсистеми в складі верстатів*. Вони не являються собою окремі комплекси чи спеціалізовані прецизійні інструменти, але використовуються для поточного потокового контролю безпосередньо на виробництві, і разом з оператором верстата, конвеєра тощо, забезпечують першу лінію усунення бракованої продукції. Подібні підсистеми можуть бути як заводського виконання, прикладом якого може слугувати підсистема оцінки якості прилягання етикетки до туб, в тубонаповнювальній машині Citus Kalix, так і може бути місцевими модернізаціями обладнання шляхом додавання камер і використання чи написання відповідного програмного забезпечення.

Якщо згадувати конкретні пристрої, які можуть слугувати відправною точкою для створення своєї системи, то заслуговують уваги машини компанії Keyence. Розглянемо одну з них нижче. Було обрано серію пристроїв ІМ, як найпростішу з усіх пропонованих систем. Цей пристрій являється відеовимірювальною машиною для вимірювання деталей малого та середнього розміру. Виробник позиціонує цей

прилад для контролю якості продукції, як в процесі виробництва, так і у лабораторіях ВТК.



Рисунок 1.5 Тубонаповнювальна машина



Рисунок 1.6 BVM Keyence IM

Особливостями цього приладу є відсутність необхідності в точному позиціонуванні об'єкту вимірювання на столі. Це досягається завдяки телецентричній системі лінз та дзеркал які забезпечують фокус по всі площині столу. Телецентрична оптична система забезпечує відсутність ефекту риб'ячого ока, та мінімізує викривлення відео зображення.

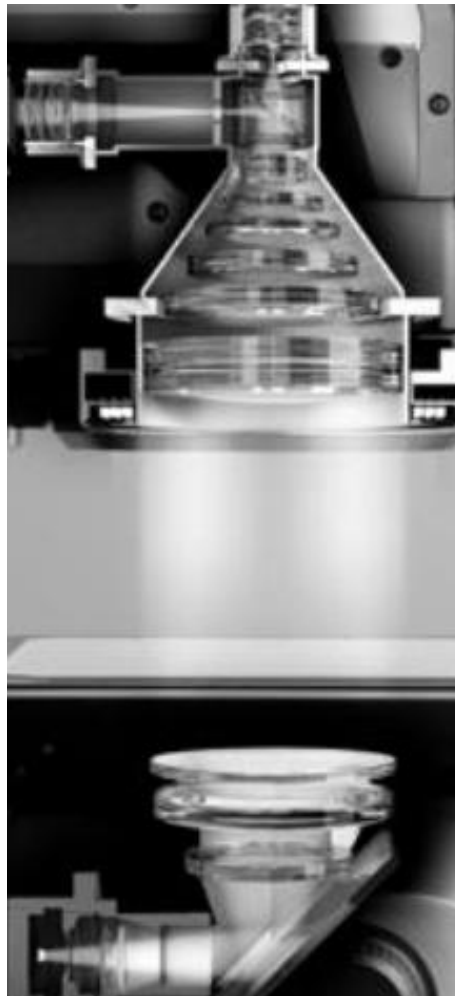


Рисунок 1.7 Система лінз BVM Keyence IM

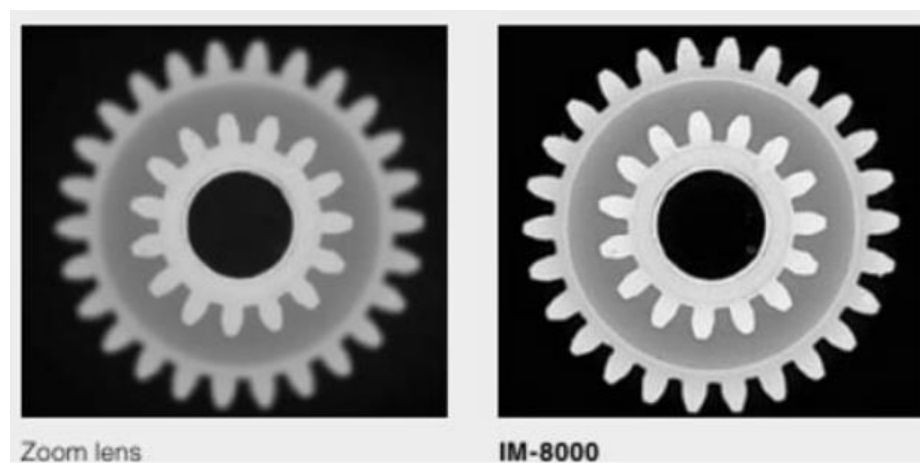


Рисунок 1.8 Відмінність звичайної оптики камери та телецентричної системи

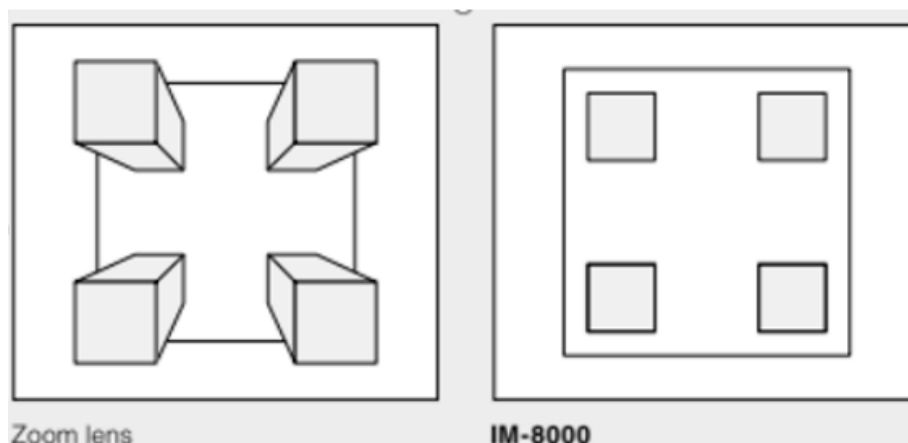


Рисунок 1.9 Порівняння звичайного об'єктива і телецентричної оптичної системи

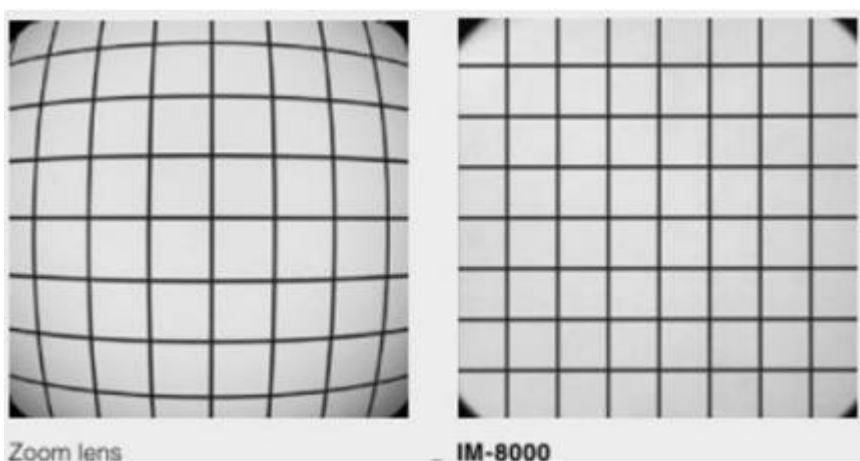


Рисунок 1.10 Порівняння викривлень звичайного об'єктива та телецентричної системи

В якості камери використовується 20-мегапіксельна монохромном CMOS матриця високої роздільної здатності. Так як основну роль в відеовимірювальних машинах грає програмне забезпечення то потрібно розглянути і його. Комплекс від Keyence має спеціальні алгоритми для точного відстежування границь об'єкту вимірювання на зображенні.

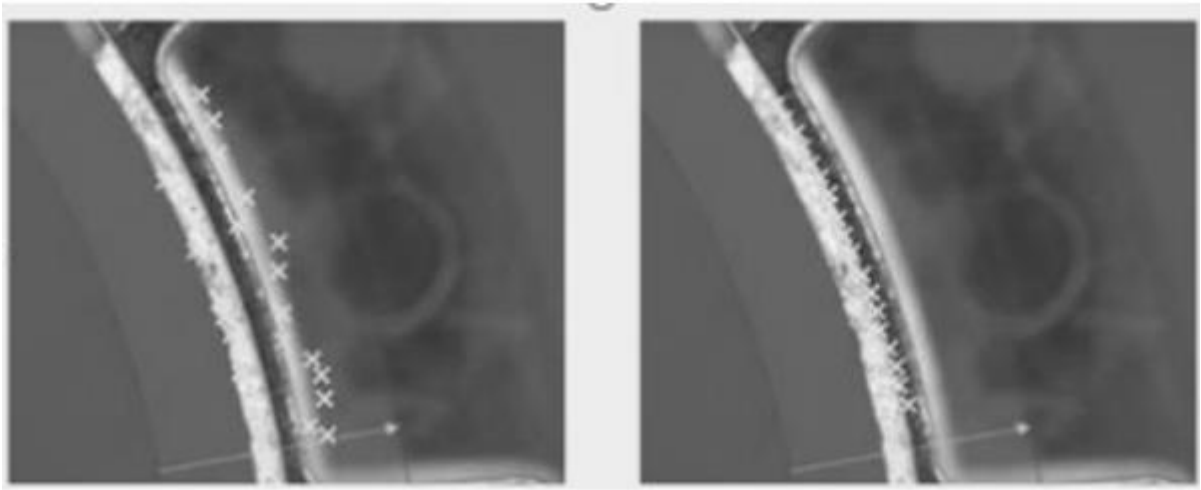


Рисунок 1.11 Демонстрація роботи алгоритму відстежування границь об'єкту вимірювання.

Також є алгоритми для правильної склейки відеозображень в панорамний знімок, що забезпечують вимірювання деталей, які не поміщаються повністю на вимірювальному столі. Щодо точності вимірювань, комплекс в залежності від комплектації забезпечує точність від ± 0.5 мікрон до ± 1 мікрона.

Висновки до першого розділу

У розділі проведено загальний огляд методів та засобів вимірювання геометричних параметрів об'єктів за їх відеозображеннями. Оглянуто існуючі рішення. Описано КІВС для визначення геометричних параметрів об'єктів за їх відеозображеннями, як об'єкт вимірювання.

2. МАТЕМАТИЧНІ ОСНОВИ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОМИСЛОВИХ ВИРОБІВ НА МАШИНОБУДІВНОМУ ПІДПРИЄМСТВІ

Вимірювальна система фіксує зображення, які відображають характеристики деталі за допомогою CMOS-камери. Оскільки деталі які виробляють на машинобудівних підприємствах частіше за все належать до непрозорих тіл, для отримання висококонтрастних зображень і полегшення подальшої обробки зображень тут потрібно використовувати підсвічування.

Джерело світла посилає світлові хвилі, які опромінюються кільцевою світловою трубкою на вимірювану частину, щоб деталь якомога більше перебувала на контрольованому фоні рівномірного освітлення (щоб зменшити вплив зовнішнього світла). Зображення оптичної системи здійснюється на світлочутливій поверхні CMOS-матриці.

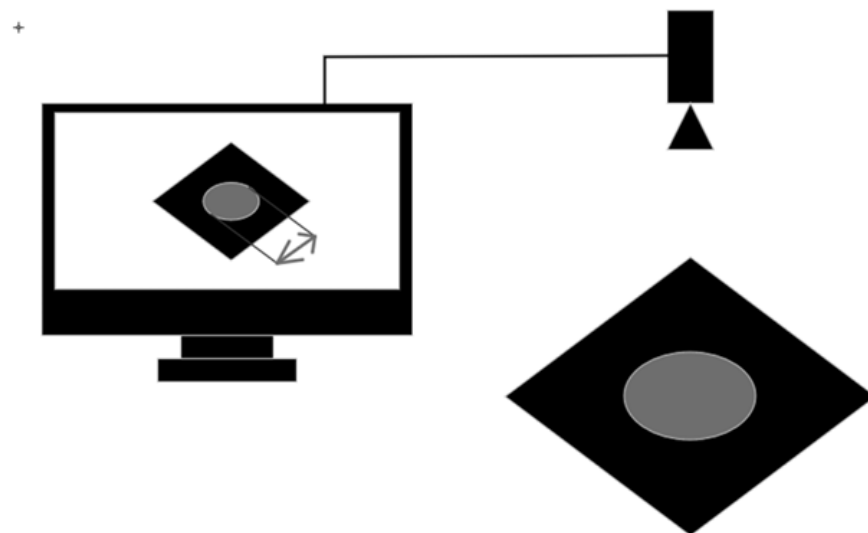


Рисунок 2.1 Схематичне зображення комп'ютеризованої системи
вимірювання геометричних параметрів

Плата отримання зображення (відеоадаптер комп'ютера) отримує вхідний аналоговий сигнал від камери (якщо камера аналогова), або і перетворює його у дискретний цифровий сигнал для обробки комп'ютером, в випадку з сучасними цифровими камерами, на вхід для обробки подається одразу цифрова інформація,

без необхідності перетворення, адже перетворення відбувається потужностями самої камери.

Обробляючи зібрані дані зображення, комп'ютер може швидко й точно обчислити розмір деталі та видати результат безпосередньо на графічну карту, щоб показати його. Схематично зображення системи представлено на рис. 2.1.

2.1 Виділення контурів прямих об'єктів на відео зображеннях

Зображення, зняте камерою, є 32-бітним зображенням RGB. Колір кожного пікселя представлено комбінацією червоного (R), зеленого (G) і синього (B). Кожен колір представлений 8 бітами, тому теоретично він може містити 255 різних кольорів та може не відтворювати справжній колір об'єкту [6].

Але вимірювання розміру деталей пов'язане з особливостями контурів зображення цих деталей. Ці особливості можна виразити зміною рівня сірого на зображенні, тому для того, щоб зменшити кількість операцій у процесі обробки зображення, зображення, зняте камерою, потрібно перетворити у зображення в градаціях сірого (монохромне) [6-7].

Обробка відтінків сірого, це процес перетворення вхідного кольорового зображення в зображення у відтінках сірого за допомогою алгоритму кореляції. Обробка відтінків сірого відображає значення сірого зображення в новому діапазоні, що полегшує ідентифікацію певних особливостей зображення та полегшує подальше маніпулювання зображенням. Гістограма градацій сірого природного зображення часто має більш високу частоту в інтервалі градацій сірого з низьким значенням, що робить темніші деталі на зображенні часто непомітними. Щоб зробити зображення чіткішим, сірий діапазон зображення можна розсунути, а рівень сірого з меншою частотою сірого зробити більшим, щоб гістограма у відтінках сірого мала тенденцію бути узгодженою в широкому динамічному діапазоні, тобто гістограма вирівнялась. Після вирівнювання гістограми деталі зображення можуть бути чіткішими, а частка кожної градації сірого більш середньою [12-14].

Зменшення шуму зображення виконується за допомогою вейвлет перетворень для зменшення шуму на вибраних частинах зображень.

Процес усунення шумів включає три етапи:

- багатомасштабне розкладання;
- багатомасштабне усунення шумів;
- вейвлет-інверсне перетворення.

Вейвлет-перетворення використовується для реконструкції зашумленого сигналу, що може видалити шум Гаусса (Gauss Noise) і шум солі та перцю (salt and pepper noise) в сигналі. Для зображень з високим співвідношенням сигнал-шум, для визначення контурів використовується метод найменших квадратів та алгоритм просторового моменту для локалізації контуру на субпіксельному рівні. Таким чином можна досягти точності для виявлення прямолінійних контурів, і отримати задовільні результати.

Точність субпіксельного позиціонування методу найменших квадратів лінійної регресії становить приблизно 0,1 пікселя, точність субпіксельного позиціонування просторового моменту становить приблизно 0,01 пікселя, і метод найменших квадратів для субпіксельного позиціонування набагато швидший за метод просторового моменту для субпіксельного позиціонування [12-13, 23, 27].

Тому варто використовувати метод найменших квадратів для зведення двовимірного визначення контуру до одновимірного визначення контуру, щоб прямолінійний контур міг досягти субпіксельної точності. У методі виявлення контуру з лінійним фільтруванням оптимально використовувати оператор Кенні, який є найбільш репрезентативним, і це також один із операторів, який краще виявляє ступінчатий ефект контуру.

Оператор Кенні використовується як функція визначення межі рівня цілого пікселя, щоб отримати всю межу рівня пікселя. Потім локація контурного субпікселя виконується за допомогою лінійної регресії за методом найменших квадратів. Алгоритм виявлення контурів через оператор Кенні реалізовано шляхом обчислення розміру градієнта та напрямку кожного пікселя у відфільтрованому

зображенні. Візьмемо шаблон 2×2 , його можна використовувати як похідну першого порядку для часткового диференціювання в напрямку x та y (2.1 – 2.3).

$$p = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}; Q = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix}; \quad (2.1)$$

Отриманий розмір і напрям градієнта:

$$M(x, y) = \sqrt{P^2(x, y) + Q^2(x, y)} \quad (2.2)$$

$$\theta = \arctan\left[\frac{Q(x, y)}{P(x, y)}\right] \quad (2.3)$$

Далі краї уточнюються шляхом диференціювання всіх негребневих піків у напрямку градієнта. Нарешті, виконується подвійна порогова сегментація та вибираються два порогові значення градієнта. Високий поріг зазвичай у 2-3 рази перевищує низький поріг. Спочатку точки пікселів зі значенням градієнта, меншим за високий поріг, видаляються з набору контурних точок, і отримується набір F контурних точок, а потім обробляється набір пікселів M з градієнтом між високим і низьким порогами. Якщо точка в M має сусідню точку в F , то ця точка додається до F , і, нарешті, виходить множина контурних точок.

Після отримання контурних точок, зображення з високим відношенням сигнал/шум очищається шляхом виділення контурів, векторний набір $E_i = \{E_1, E_2, \dots, E_m\}$ що містить контурні точки пікселів, отримується для виконання регресійної обробки на прямих краях механічних частин.

Оскільки деталі в машинобудуванні шліфуються з високою точністю, їх краї можна наблизити як пряму лінію, що задовольняє вимогам точності. Крім того, виявлене зображення ретельно оброблюється, контраст між цільовою та фоновією яскравістю на знятому зображенні високий, а векторна група контурів, отримана під час обробки на першому етапі, включає всі контурні точки всієї точності пікселів. Таким чином, безпосереднє виконання лінійної регресії для E_i не тільки має вищу точність позиціонування, але також має вищу швидкість обчислення.

Якщо E_i містить занадто багато шуму, лінійна регресія виконується безпосередньо на E_i , і повернута пряма лінія може відхилитися від справжнього

положення контуру, що призводить до великої помилки, і на даний момент вона не підходить для прямої регресії.

Коли модель визначена, основним завданням є оцінка параметрів. Лінійний коефіцієнт α оцінюється за допомогою лінійної регресії за методом найменших квадратів (2.4).

$$Q(a) = \sum (y_i - a_0 - a_1 x_{i1} - \dots - a_p x_{ip})^2 \quad (2.4)$$

Знаходиться мінімум формули, що є точкою $a: Q'(a) = \min Q(a)$, є невід'ємною похідною другого порядку α , нехай $Q(\alpha)$ буде похідною першого порядку α , що дорівнює 0, тоді можна отримати оцінку α за методом найменших квадратів (2.5).

$$\begin{cases} \frac{dQ(a)}{da_0} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_{i1} - \dots - a_p x_{ip}) = 0 & (i = 1, 2, \dots, p) \\ \frac{dQ(a)}{da_i} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_{i1} - \dots - a_p x_{ip}) = 0 & (i = 1, 2, \dots, p) \end{cases} \quad (2.5)$$

Було перетворено ці рівняння у нормальні рівняння з параметром a (2.6):

$$y = [y_1 y_2 \dots y_n]^T, X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1p} \\ 1 & x_{21} & \dots & x_{2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{np} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Далі формула приймає вигляд (2.7):

$$X^T X a = X^T y \quad (2.7)$$

З цього, найменшу квадратичну оцінку лінійного параметру можна розрахувати як (2.8):

$$a = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (2.8)$$

Якщо контурні точки мають нормальний розподіл, оцінка за методом найменших квадратів лінійного параметра є незміщеною оцінкою. Звідси отримують параметри лінійної оцінки, щоб отримати пряму лінію регресії. Пряма лінія - це субпіксельна позиція, що проходить через контурні пікселі. Чим більше точок бере участь в оцінці, тим вища точність регресії та менший вплив шуму. Після попередньої обробки зображення отримані значення можна безпосередньо обчислити. Для більшості деталей геометричне вимірювання включає радіус та лінійні розміри

(висота, ширина, глибина тощо). Через особливості деталей які створюють в машиннобудівній галузі можна використати алгоритм перетворення Хафа для виявлення прямих ліній. Його основна ідея полягає в тому, що кожна точка даних на прямій лінії перетворюється на пряму лінію або криву на площині параметрів, а зв'язок між параметричною кривою, що відповідає колінеарній точці даних, перетинається з однією точкою в просторі параметрів, і задача виділення прямої трансформується в задачу підрахунку. Основна перевага перетворення Хафа при виділенні рядка полягає в тому, що на нього менше впливають розриви та шум у рядку. З похідного зображення контуру можна виявити два відрізки прямої лінії, і по черзі отримують параметри положення кожної прямої лінії, тобто лінії висоти, ширини, глибини тощо [6-7, 11, 27].

2.2 Виділення круглих об'єктів на відеозображеннях

Коло або дуга на зображенні деталі також є набором субпіксельних точок після виявлення субпіксельних контурів. Підбирається коло за методом найменших квадратів, а потім знаходять діаметр частини кола. Принцип вимірювання діаметра деталей показано на рис. 2.2. Калібрувальне значення точки В обчислюється спочатку, оскільки радіус R деталі є довжиною відрізка лінії ОВ на малюнку, тобто відповідною фактичною відстанню між пікселями в сегменті АВ. Згідно з лінійним характером формули калібрування та геометричним співвідношенням від точки А до точки В, можна знати, що значення калібрування точки пікселя від точки А до точки В монотонно зростає. Тому між цими точками даних необхідно знайти відповідну точку. Кількість пікселів у сегменті АВ, помножена на значення калібрування цієї точки, дорівнює R.

Припустимо, дійсне число φ і $0 < \varphi < 1$. Наведені вище точки, які потрібно знайти, можна виразити як (2.9):

$$Y_{A\varphi} + Y_B(1 - \varphi) \quad (2.9)$$

В результаті буде отримано (2.10):

$$R = N[Y_{A\varphi} + Y_B(1 - \varphi)] \quad (2.10)$$

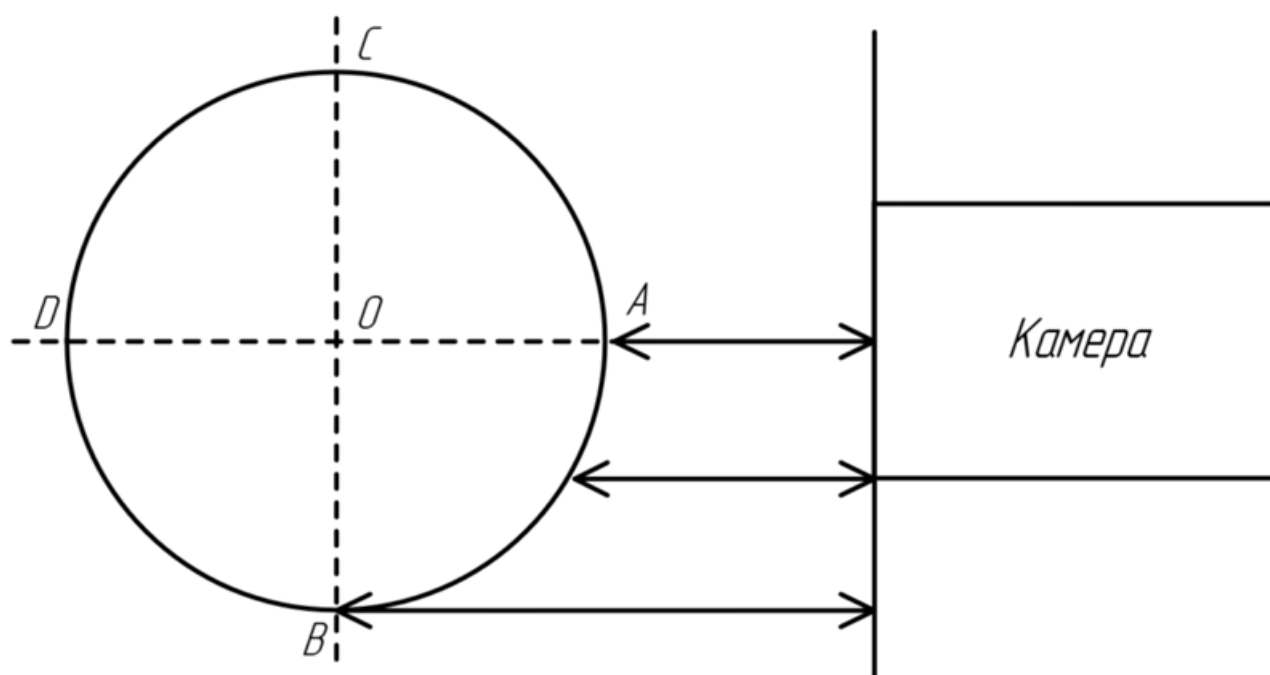


Рисунок 2.2 Принципи вимірювання діаметра деталей

Оскільки у формулі (2.10) лише R і φ є невідомими, де R є бажаним значенням, початкове значення R можна обчислити за початкового значення φ . Однак це значення R не є остаточним результатом, і його потрібно постійно переглядати, доки воно не досягне вимоги. Після отримання початкового значення R можна обчислити значення калібрування кожної точки від точки A до точки B , а потім накопичити для отримання наступного значення R . Якщо різниця між двома суміжними значеннями R менша за достатньо мале ε , значення R є кінцевим результатом. Якщо воно не менше ε , то за формулою (2.9) отримуємо нове значення φ . Потім використовується це значення φ , щоб знайти наступне значення R . Цей цикл буде працювати, доки не буде знайдено остаточний результат R . Вираз, який використовується для обчислення значень калібрування, що відповідають точкам, а також відстані точки від камери є (2.11):

$$\begin{aligned} Y_n &= a' + b' L_n + c' N \\ Y_{n+1} &= a' b' L_{n+1} + c' (N + 1) \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$L_{n+1} = 244 - \sqrt{R^2 - \left(\sum_{i=1}^n Y_i\right)^2}$$

Де представляють відповідні значення точок на АВ півколі, а означає відстань від камери. а', b', c' задані параметри. Через обчислення вищевказаного процесу отримують кінцевий результат вимірювання [7, 14].

2.3 Математичні основи калібровки камери шляхом використання шахової дошки (Метод Чжана)

Калібрування камер є фундаментальною задачею комп'ютерного зору, що забезпечує можливість відновлення метричних характеристик сцени та коректного виконання геометричних вимірювань. Відсутність точних параметрів проєкції унеможливорює отримання достовірних даних та корекцію оптичних спотворень. Метод калібрування, запропонований Чжаном, ґрунтується на використанні серії зображень плоского калібрувального шаблону з відомою геометрією, що дозволяє уникнути складних калібрувальних конструкцій.

Незалежно від методів калібрування, в основі лежить модель ідеальної камери, вона ж камера-обскура, вона ж pinhole камера. Конструктивно така камера являє собою коробку з маленьким отвором, через який проходить світло і формує перевернуте зображення на протилежній стінці [15].

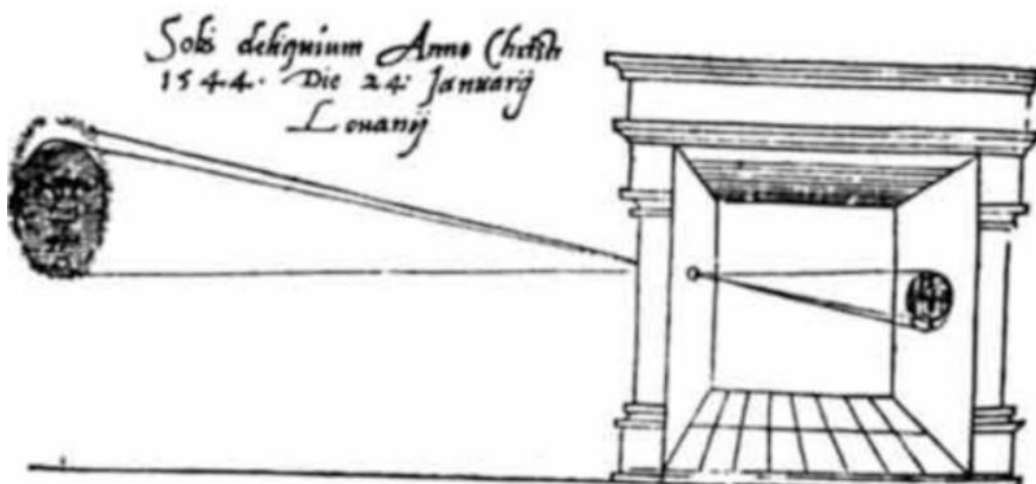


Рисунок 2.3 Класична конструкція камери-обскури

У такій камері точку об'єкта можна виразити як X (2.12).

$$X = (X, Y, Z)^T \quad (2.12)$$

Це просторове представлення, щоб просторове представлення перенести на площину потрібно використати формули (2.13)

$$x = f * \frac{X}{Z}, y = f * \frac{Y}{Z} \quad (2.13)$$

Де f – фокусна відстань, а Z – глибина точки відносно камери.

Для подальшого використання цієї моделі в процесі калібровки, потрібно перевести декартові координати в гомогенні (2.14), щоб в подальшому можна було виконувати операції над матрицями.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \equiv \frac{f}{Z} * \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} f \frac{X}{Z} \\ f \frac{Y}{Z} \\ 1 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} fX \\ fY \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

В компактному вигляді це можна виразити як (2.15):

$$x = \text{hom}^{-1}(M_p * \text{hom}(X)) \quad (2.15)$$

Матрицю проєкції M_p можна розібрати в дві матриці M_f і M_0 (2.16):

$$M_p = \begin{pmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} = M_f * M_0 \quad (2.16)$$

де M_f моделює внутрішні параметри (ідеальної) камери-отвори з фокусною відстанню f , а M_0 описує перетворення між координатами камери та світовими координатами [35-37].

Щоб перейти від нормалізованих координат до координат сенсора, враховуються масштабування, головна точка та косина. Це описується матрицею:

$$A = \begin{bmatrix} a & y & u_c \\ 0 & \beta & v_c \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Реальні камери мають лінзи, що спричиняють спотворення. Найпроблемнішим є радіальне:

$$\begin{aligned} \text{warp}(x, k) &= x[1 + D(|x|, k)], \\ D(r, k) &= k_0 r^2 + k_1 r^4 \end{aligned} \quad (2.18)$$

Це означає, що точка зміщується вздовж радіального напрямку залежно від відстані від центру. У практиці це проявляється як «бочкоподібне» чи «подушкоподібне» спотворення.

Безпосередньо процедура калібровки складається з кількох етапів. Спочатку отримують серії зображень плоского шаблону. На кожному зображенні знаходять відповідні точки. Далі для кожного виду оцінюють гомографію, яка пов'язує точки шаблону з точками на зображенні. З цих гомографій визначають внутрішні параметри камери. Потім для кожного виду знаходять зовнішні параметри - матрицю обертання та вектор перенесення. Після цього оцінюють коефіцієнти спотворення. На завершальному етапі всі параметри уточнюються методом нелінійної оптимізації. Далі обчислюється гомографія H що описує перехід між координатами шаблону та зображення. Для відповідних точок $(X_j, Y_j) \leftrightarrow (u_j, v_j)$ маємо:

$$u_j = HX_j, v_j = HY_j \quad (2.19)$$

Це призводить до системи рівнянь:

$$Mh = 0 \quad (2.20)$$

де h - вектор коефіцієнтів гомографії. Розв'язання здійснюється методом сингулярного розкладу (SVD). Це дозволяє знайти матрицю гомографії, яка найкраще узгоджує відповідні точки.

З кількох гомографій можна визначити внутрішні параметри $\alpha, \beta, \gamma, u_c, v_c$. Якщо косина $\gamma = 0$, достатньо двох зображень. Для кожного виду обчислюються матриця обертання R_i та вектор перенесення t_i . Коефіцієнти спотворення k_0, k_1 оцінюються методом найменших квадратів. Усі параметри уточнюються одночасно, мінімізуючи різницю між проєктованими та спостережуваними точками [16, 24].

2.4 Математична модель інформаційно-вимірювальної системи вимірювання геометричних параметрів виробів на машинобудівному підприємстві за їх відео зображеннями

Використовуючи весь вище описаний математичний апарат було сформовано наступну математичну модель створюваної ІВС:

$$y = f(x, \theta) + \varepsilon \quad (2.21)$$

де x - шукані геометричні параметри (довжини, діаметри, кути, координати), θ - параметри камери та сцени, y - виміряні піксельні ознаки, ε - шуми та похибки.

Пошук лінійних розмірів:

$$L_{\text{вим}} = aL_{\text{пiкс}}, a = \frac{L_{\text{реал}}}{L_{\text{пiкс}}} \quad (2.22)$$

При цьому a може бути, обчислена як за формулою 1.1 так і за допомогою обчислень, які були проведені при калібрувці шаховою дошкою описані в попередньому підрозділі.

Оцінка кола:

На основі обчислень описаних в підрозділі 2.2 отримується радіус кола в пікселях, до нього застосовуються коефіцієнти обчислені при калібрувці камери і переводиться в реальний розмір аналогічно лінійним(2.22). Візуально математичну модель можна представити на рис 2.4.

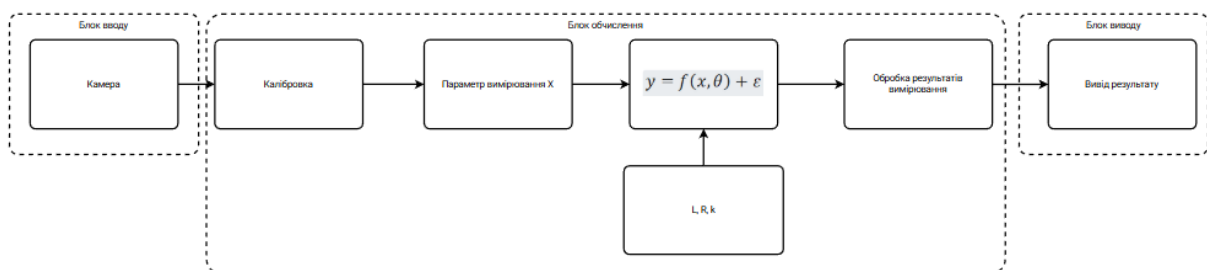


Рисунок 2.4 Математична модель ІВС

Висновок до другого розділу

В даному розділі було розглянуто математичні основи на яких будуються вимірювання на основі відеозображень. Увагу було приділено вимірюванням

лінійних розмірів, обробці кіл, а також процесу калібровки. На основі викладеного було сформовано математичну модель інформаційно-вимірювальної системи вимірювання геометричних параметрів виробів на машинобудівному підприємстві за їх відео зображеннями, на основі якої в подальшому буде розроблено програмне забезпечення.

3. ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОМИСЛОВИХ ВИРОБІВ НА МАШИНОБУДІВНОМУ ПІДПРИЄМСТВІ

Керуючись структурною схемою на рис 3.1 для системи планується використовувати наступну апаратну базу:

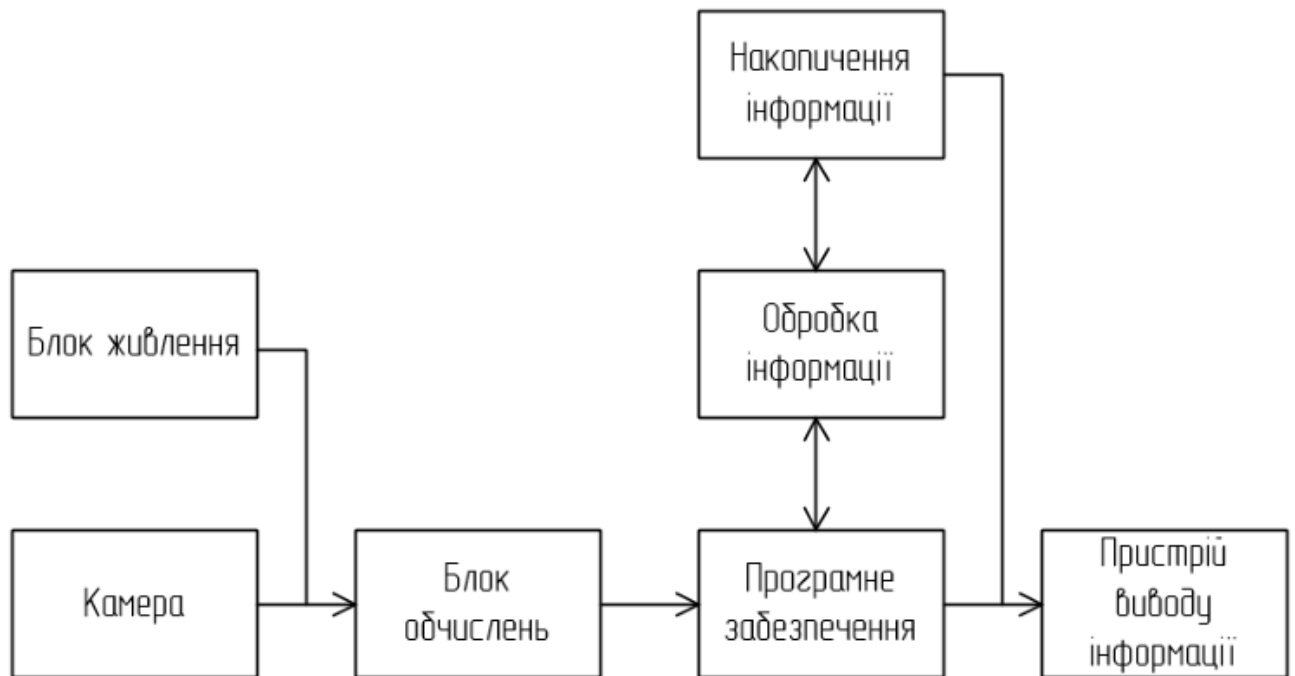


Рисунок 3.1 Структурна схема KIBC

Камера з CMOS-матрицею – повинна забезпечувати вивід фото-відео зображення з високою роздільною здатністю, 640x480 і вище. Чим більша роздільна здатність камери, тим більше деталей на кінцевому зображенні можна буде опрацювати. Камера повинна підключатись стандартними роз'ємами USB та/або HDMI та/або BNC. Ідеальним варіантом камери буде пристрій з 20-мегапіксельною монохромною CMOS-матрицею та телецентричною оптичною системою аналогічною до таких, що використовуються в пристроях промислового рівня, але для перевірки працездатності системи підійде будь-яка побутова веб-камера зі своєю штатною пластиковою оптикою, або камера смартфона. Модуль обчислень та відображення – має являти собою комп'ютерну систему, що має забезпечувати можливість приймати стабільно відеопоток з вимірювальною інформацією,

оброблювати її та виводити результати роботи в веб-інтерфейс. Пристрій має мати операційну систему для зручності використання. Для таких цілей підійдуть одноплатні комп'ютери, також це забезпечить компактність системи. Модуль має мати USB-роз'єм та Ethernet, опціонально бездротові Wi-fi та/або Bluetooth.

Монітор – в якості пристрою виводу інформації підійде будь-який пристрій що має функціонал монітора, і може бути підключений до системи.

В якості модуля обчислення та відображення було обрано готовий одноплатний комп'ютер Orange Pi Zero LTS (рис 3.2). Дане рішення було обрано через компактні розміри, наявність декількох способів підключення до мережі та потужність якої вистачить для задачі вимірювання геометричних параметрів деталей. Технічні характеристики представлено в таблиці нижче:

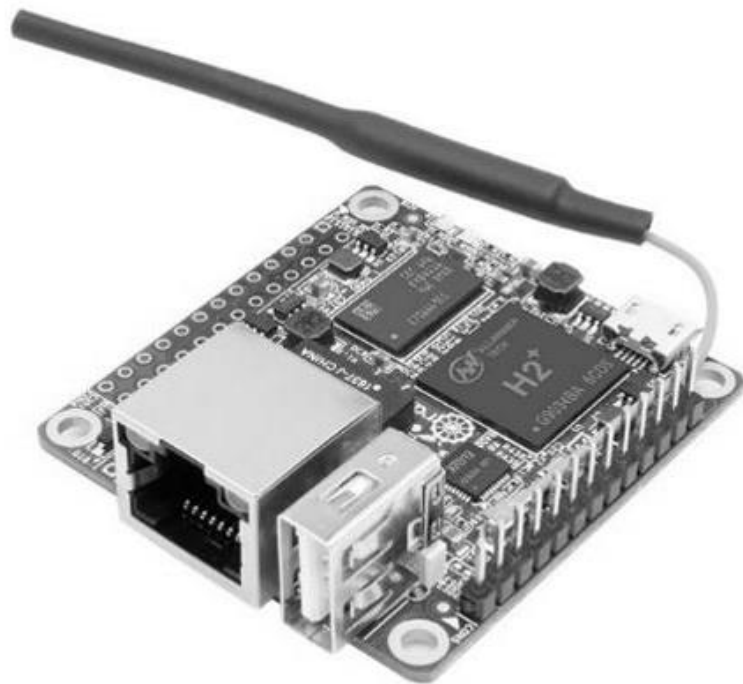


Рисунок 3.2 Одноплатний комп'ютер

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики одноплатного комп'ютера Orange Pi Zero LTS

Характеристика	Значення
Центральний процесор	Alwinner H2+ 4 ядра ARM Cortex-A7 H.265/HEVC 1080P.
Відеосистема	Mali400MP2 GPU 600МГц
Оперативна пам'ять	256 Mb SDRAM
Внутрішня пам'ять	SD-карта
Мережа	10/100M Ethernet RJ45
Бездротова мережа	IEEE 802.11 b/g/n

Джерело живлення	5 В, 3А
Габаритні розміри	48х46 мм

В якості центрального процесора в системі використовується система на чіпі Alwinner H2+. Виробником заявляється, що це високоефективний процесор з низькою ціною. Основне призначення це обчислення, функціональна інтеграція та домашні розваги. Можна виділити основні особливості процесора для використання в комп'ютеризованій системі вимірювання геометричних параметрів на основі відеозображень: Відео підсистема: Забезпечує декодування мультимедійного відео. Забезпечує кодування відео в наступних кодах: H.264:1080p/30fps. Також система може кодувати зображення розміром до 4800х4800 пікселів, підтримує альфа-змішування. Підтримує 8-бітні CMOS сенсори до 5 мегапікселів, може захоплювати відео до 1080p/30fps. Схема процесора представлена на рисунку 3.3. Функціональна схема представлена на рисунку 3.4.



Рисунок 3.3 Інтерфейсна схема ЦП

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики Alwinner H2+

Характеристика	Значення
Архітектура	ARM
Мікроархітектура	Cortex A7
Дата виробництва	03.2019
Техпроцес	40 нм
Кількість ядер	4

Кількість потоків	4
Частота	0.9...1.5 ГГц
Кеш	512 Кб
Максимально підтримувана пам'ять	2 Гб
Кількість ліній PCI	4
Тепловиділення	4 Вт
Відеоадаптер	Mali 400
Кількість виконуючих блоків ГА	2
Кількість тіньових блоків ГА	32
Частота ГА	600 МГц
Кількість операцій з плаваючою точкою	10.9 ГФлопс
Сокет	BGA
Криптографія	AES, DES, TDES, SHA-1/SHA-224, SHA384, SHA512, MD5, HMAC SHA1, PRNG, TRNG
Максимальна роздільна здатність дисплею	1080p/60fps
Відеокодер	H.264 1080p@30fps
Відеодекодер	H.265:1080p/60fps, H.264:1080p/60fps, MPEG 1/2/4:1080p/60fps, VP8:1080p/60fps, VC1:1080p/30fps, AVS:1080p/60fps, MJPEG:1080p/30fps.
Максимальна камера	5 Мп
Модем	10M/100M Ethernet + PHY
Інтерфейси	HDMI 2.0, USB 2.0
Бездротові мережі	XR819, IEEE 802.11 b/g/n, 2.4G Wi-Fi

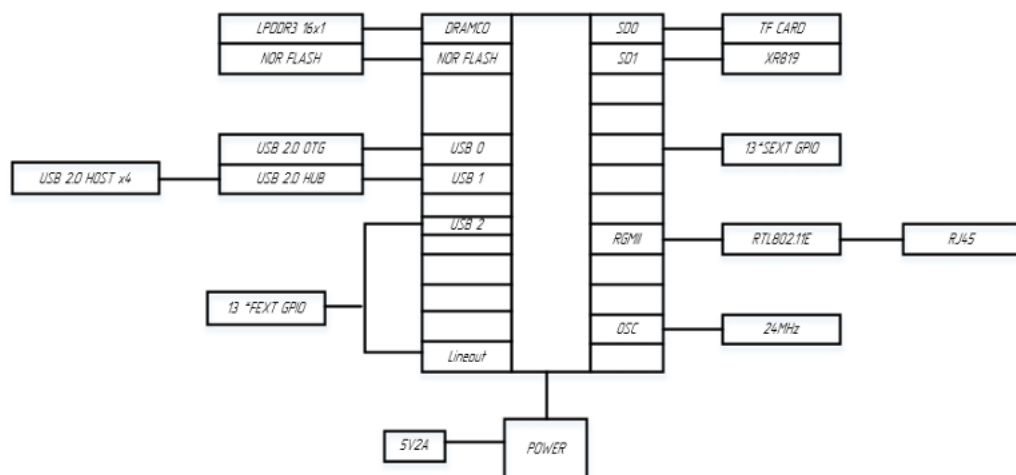


Рисунок 3.3 Функціональна схема ЦП

В якості камери було обрано модуль Sony IMX 400. Це 19 мегапіксельний CMOS модуль, що застосовується в складі носимої електроніки на кшталт

смартфонів, або в промисловості, як ото системи відеоспостереження, так і в задачах комп’ютерного зору. Характеристики представлені в табл. 3.3.

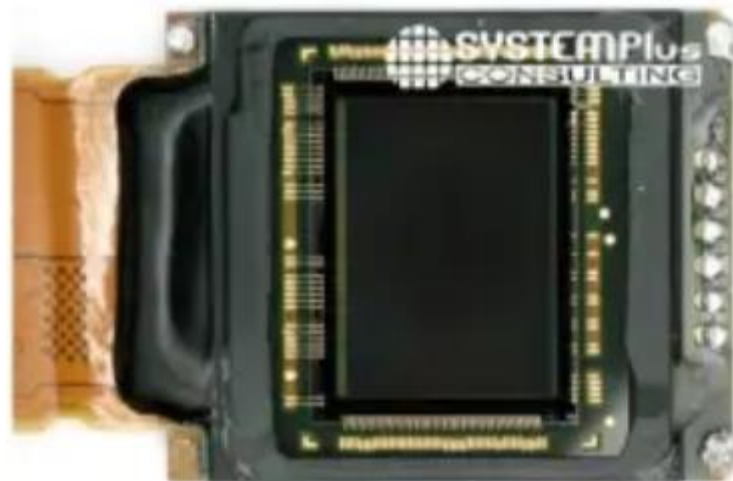


Рисунок 3.4 Sony IMX 400

Таблиця 3.3 – технічні характеристики Sony IMX 400

Характеристика	Значення
Модель сенсора	Sony Exmor RS IMX400
Роздільна здатність	19 Мп
Розмір сенсора	1/2,3"
Розмір пікселя	1,22 мкм
Діафрагма	f/2.0
Фокусна відстань	25 мм (екв.)



Рисунок 3.5 Блок живлення

Усі модулі системи живляться від джерела живлення з наступними характеристиками:

Таблиця 3.4 – технічні характеристики БЖ

Характеристика	Значення
Вхідна напруга	100...250 В
Частота вхідної напруги	50/60 Гц
Сила струму вхідної напруги	250 мА
Вихідна напруга	5 В
Частота вихідної напруги	50/60 Гц
Сила струму вихідної напруги	3А

Висновки до третього розділу

В даному розділі було обрано та обґрунтовано вибір апаратного забезпечення для КІВС.

У процесі розробки було обрано однопланий комп'ютер Orange Pi Zero з процесором Allwinner H2+, що забезпечує необхідні обчислювальні потужності для роботи з відеопотоком в реальному часі з прийнятною продуктивністю.

В якості камери було обрано якісний 19 піксельний модуль, який можна налаштувати під максимальну кількість задач комп'ютерного зору. Для виводу інформації буде застосовано звичайний монітор, так як система заснована на веб технологіях, то в якості терміналу для взаємодії, буде використовуватись будь-який настільний пристрій, що має на борту браузер.

Підсумовуючи вище написане, обрані компоненти, мають забезпечити достатню точність вимірювань, і баланс між ціною і якістю.

4. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

4.1 Вибір технологій для розробки

При виборі технологій для розробки потрібно брати до уваги, хто буде користуватись кінцевим продуктом і при яких умовах. Враховуючи те, що система яка розроблюється призначена для поточного контролю геометричних параметрів, тобто не буде використовуватись на конвеєрі, нам не потрібна висока швидкодія програмного забезпечення, але потрібна простота, і можливість модифікувати програмне забезпечення людям без відповідного досвіду. Враховуючи це, програмне забезпечення було написано з використанням мови Javascript. Цей вибір зумовлено тим, що код є читабельним і зрозумілим, а також через популярність мови в середовищі обробки даних, в подальшому отриману вимірювальну інформацію буде легко зв'язати з бібліотеками обробки даних, тим самим розширивши функціональність системи. Також хорошим вибором міг стати програмний комплекс MATLAB, але в нього є низка недоліків, основним з яких є висока вартість, і дороговизна інтеграції в процеси. На даний момент існує дві великі бібліотеки для роботи з зображеннями і машинним зором, це OpenCV та Image Processing Toolbox. Вони мають багато спільного, а також переваги та недоліки. Розглянемо переваги OpenCV [19-20, 34-36]:

- відкритий код: OpenCV є відкритою бібліотекою, що означає, що її можна вільно та безкоштовно використовувати в академічних та комерційних цілях.
- багатомовність OpenCV має біндинги для різних мов програмування, таких як Python, Java, Ruby, Matlab, Lua та інші.
- багатofункціональність OpenCV надає засоби для обробки і аналізу вмісту зображень, включаючи розпізнавання об'єктів, відстежування руху, перетворення зображень та застосування методів машинного навчання.

До недоліків OpenCV можна віднести відносну складність користування бібліотекою з деякими мовами програмування та відсутності готових рішень «все в одному» для спрощення розробки людям які з тих чи інших причин не володіють навичками програмування. Натомість Image Processing Toolbox має усі ті самі

переваги, що і OpenCV, а також забезпечує просту взаємодію людини з цим інструментом, при бажанні можна навіть не писати код, а робити все в інтерактивному режимі через Simulink. Недоліком цього інструменту є висока ціна, велика кількість ресурсів які потрібні для роботи самого середовища, і ліцензія котра забороняє використання продукції Mathworks для деяких цілей, і обмежує доступ до програмного забезпечення в деяких країнах. Зваживши всі за і проти була обрана бібліотека OpenCV, через те що вона більш лояльна до систем з обмеженими ресурсами і наявністю біндингів під раніше обрану мову програмування Javascript [38].

Так як система яка розробляється використовує комп'ютер в якості блоку обчислень, потрібно обрати операційну систему. В данному випадку було обрано операційну систему на базі ядра Linux. Вона має низку переваг для розробки промислових приладів, а саме:

- Модульність;
- Багатозадачність;
- Мережевий стек;
- Доступність;
- Стабільність та передбачувана поведінка.

В якості операційної системи було обрано Armbian, а також для тестування програмного забезпечення на звичайному ПК було застосовано Ubuntu 25.10.

Нижче буде описано ключові аспекти роботи програмного забезпечення, усі методи, які будуть згадані нижче посилаються на додатки до кваліфікаційної роботи.

4.2 Алгоритм роботи програми

Алгоритм роботи програмного забезпечення представлено на рисунку 4.1. Розглянемо цей алгоритм детальніше. На вході потрібно проініціалізувати камеру. Далі потрібно завантажити калібровочний файл calibration.json, який можна або створити вручну за допомогою тієї ж бібліотеки OpenCV, або використати для цього

стороннє програмне забезпечення, наприклад Camera Calibrator з пакету Image Acquisition в комплексі Matlab. Далі потрібно почати захоплення відеозображення обравши камеру зі списку який був знайдений в процесі ініціалізації камери/камер. Потім відбувається попередня цифрова обробка зображення по перетворенню зображення в градації сірого та видаленню шумів та тіней.

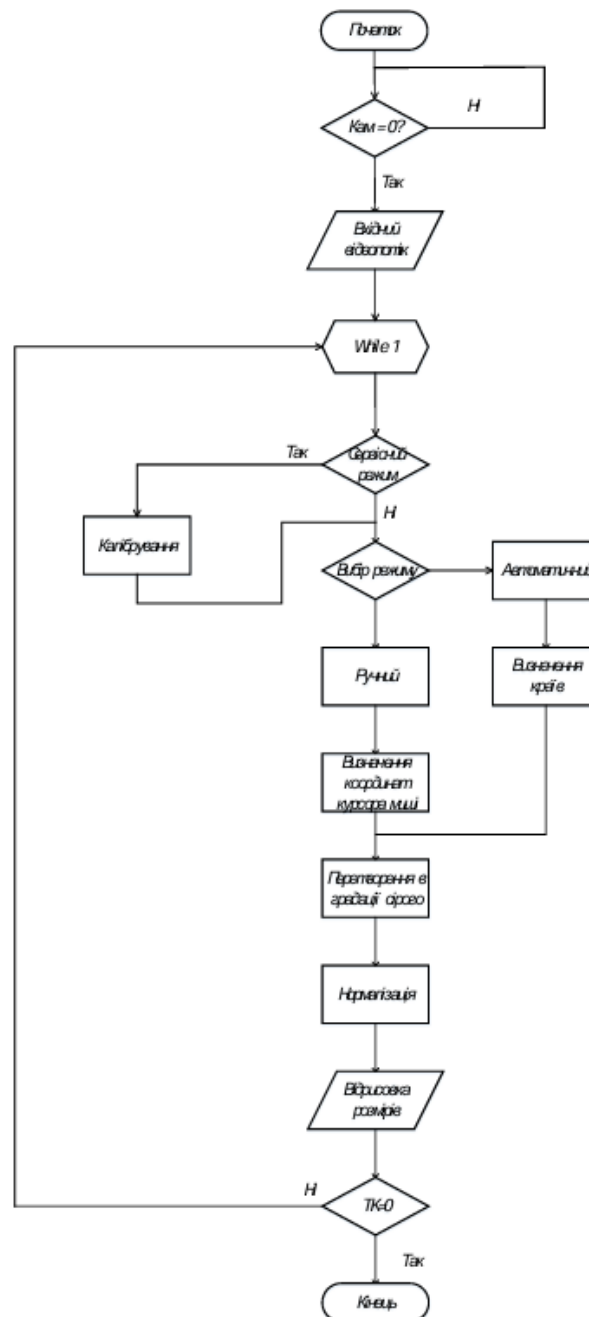


Рисунок 4.1 Основний алгоритм роботи програми

Наступним етапом іде бінаризація зображення та пошук контурів. Після цього етапу відбувається наступне, або об'єкт буде знайдено і тоді відбуваються вимірювання об'єкту, або продовжується захоплення відеопотоку в очікуванні коли

об'єкт таки з'явиться. Потім результати зберігаються в текстовий файл, також усі події, що відбуваються з програмою, також логуються.

4.3 Ініціалізація камери

У даному проєкті процес ініціалізації камери реалізовано послідовність дій, що забезпечують підключення відеопотоку з камери до елементів інтерфейсу та підготовку до подальшої обробки зображень. Формально цей процес складається з таких етапів:

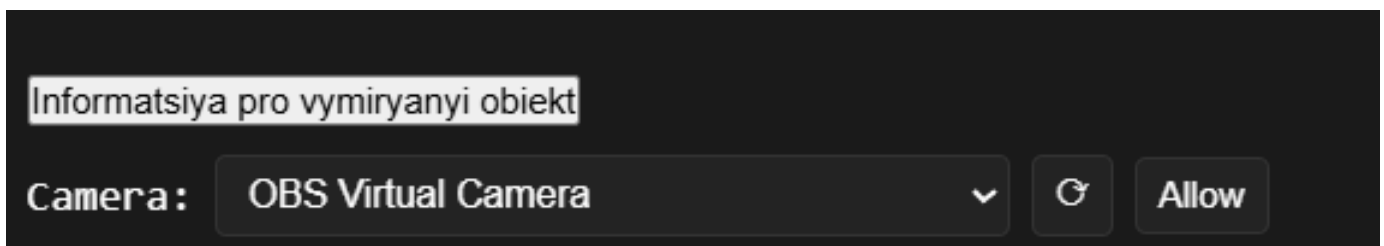


Рисунок 4.2 Вибір камери зі списку

Спочатку відбувається отримання DOM-елементів для відео та canvas, а також встановлення початкових параметрів ширини та висоти відеопотоку згідно з конфігурацією. Далі система викликає метод `populateCameraList`, який за допомогою `navigator.mediaDevices.enumerateDevices()` отримує список доступних відеопристроїв. Після цього користувач може обрати потрібну камеру, або за замовчуванням використовується перша доступна.

```
setupCameraControls() {  
  const startBtn = this.getElement(ELEMENT_IDS.START_BTN);  
  if (startBtn) {  
    startBtn.addEventListener('click', () => {  
      if (typeof cvReady !== 'undefined' && cvReady) {  
        this.startCamera();  
      } else {  
        alert('OpenCV.js ще завантажується. Будь ласка, зачекайте...');  
      }  
    });  
  }  
  // ...отримання інших елементів та підписка на події...  
  this.populateCameraList();  
}
```

Рисунок 4.3 Код що відповідає за ініціалізацію камери

Після вибору камери система ініціює запит дозволу на доступ до відео через метод `navigator.mediaDevices.getUserMedia`. У разі успіху отриманий відеопотік призначається елементу `<video>`, а подія `onloadedmetadata` використовується для запуску подальшої ініціалізації: встановлення розмірів `canvas`, створення матриць для обробки зображень (OpenCV), визначення центру кадру та запуску основного циклу обробки кадрів (`animate()`).

Цей процес реалізовано у класі `CamRuler` через такі методи: `setupCameraControls`, `startCamera`, `onVideoReady`, `populateCameraList`.

4.4 Калібрування

Процес калібрування реалізовано як послідовність дій, що забезпечують визначення масштабу для переведення пікселів у міліметри. Калібрування може виконуватись як через завантаження готового файлу, так і вручну.



```
// calibration.js
class CalibrationManager {
  constructor() {
    this.calibrationData = null;
    this.pixelsPerMm = null;
    // ...
  }

  async loadFromFile(file) {
    // ...зчитування файлу...
    this.parseCalibrationData(data);
    // ...
  }

  parseCalibrationData(data) {
    this.calibrationData = data;
    if (data.estimated_pixels_per_mm) {
      this.pixelsPerMm = data.estimated_pixels_per_mm;
    }
    // ...
  }
}
```

Рисунок 4.4 Код що відповідає за калібровку

На початковому етапі користувач або завантажує файл калібрування (наприклад, `calibration.json`), або вводить еталонне значення вручну. Після цього система зчитує або розраховує значення `pixelsPerMm` - кількість пікселів, що відповідає одному міліметру на зображенні. Далі обчислюється масштабний

коефіцієнт $scale = 1 / pixelsPerMm$, який використовується для всіх подальших вимірювань.

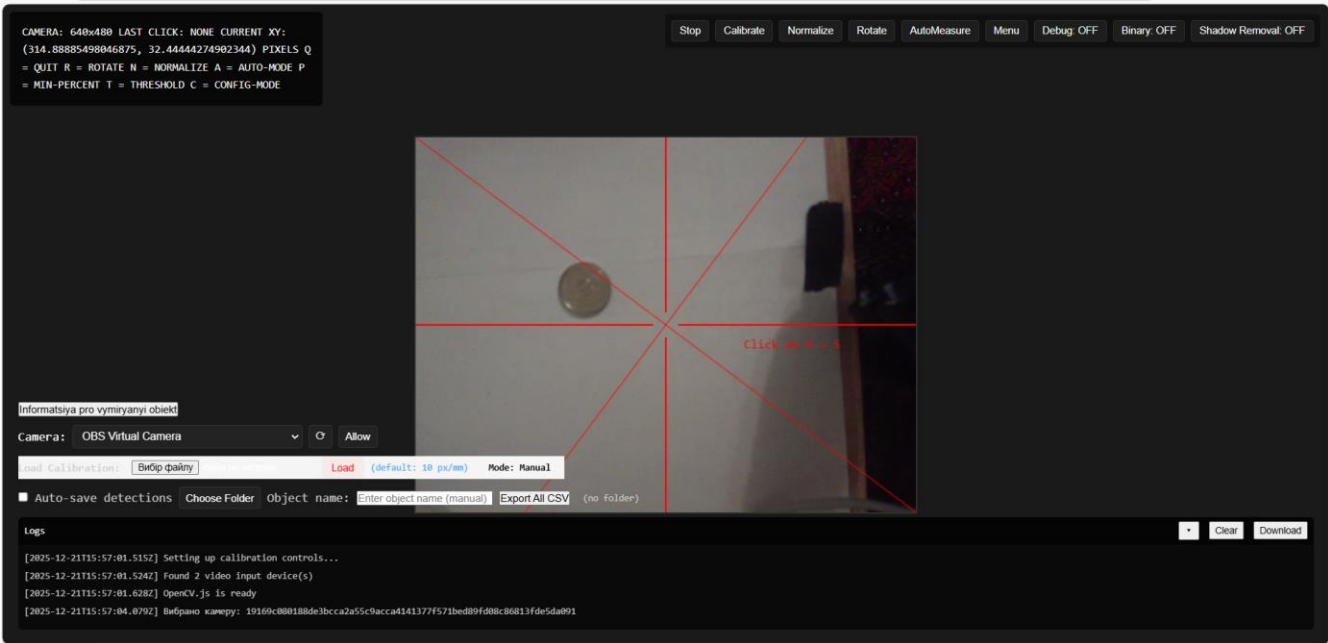


Рисунок 4.4 Меню ручної калібровки

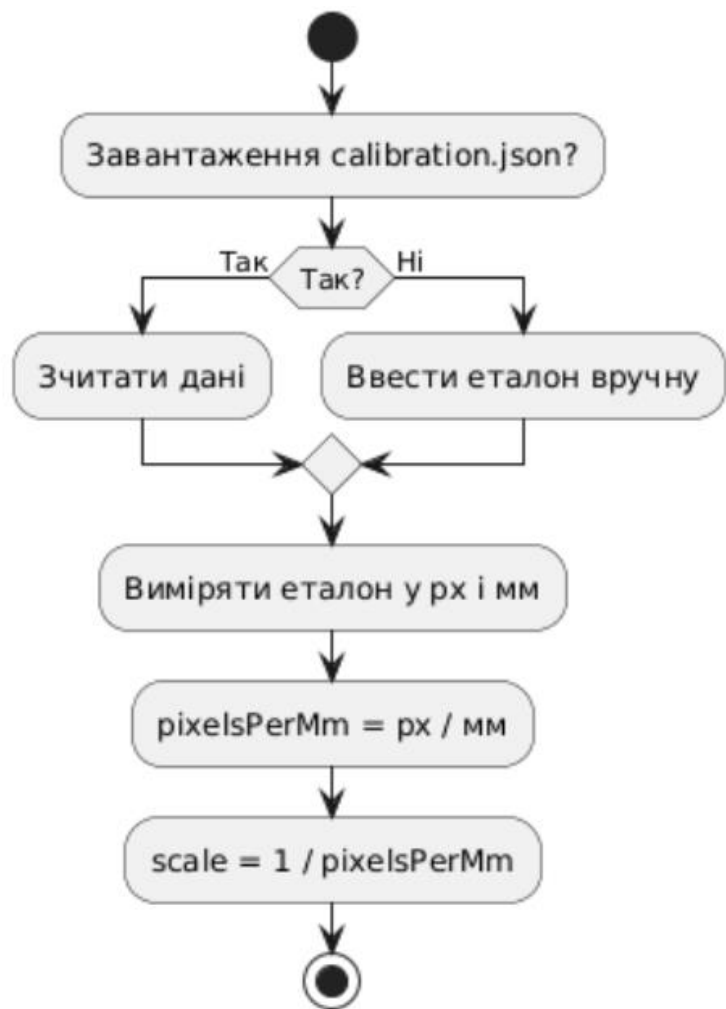


Рисунок 4.6 UML діаграма роботи калібровки

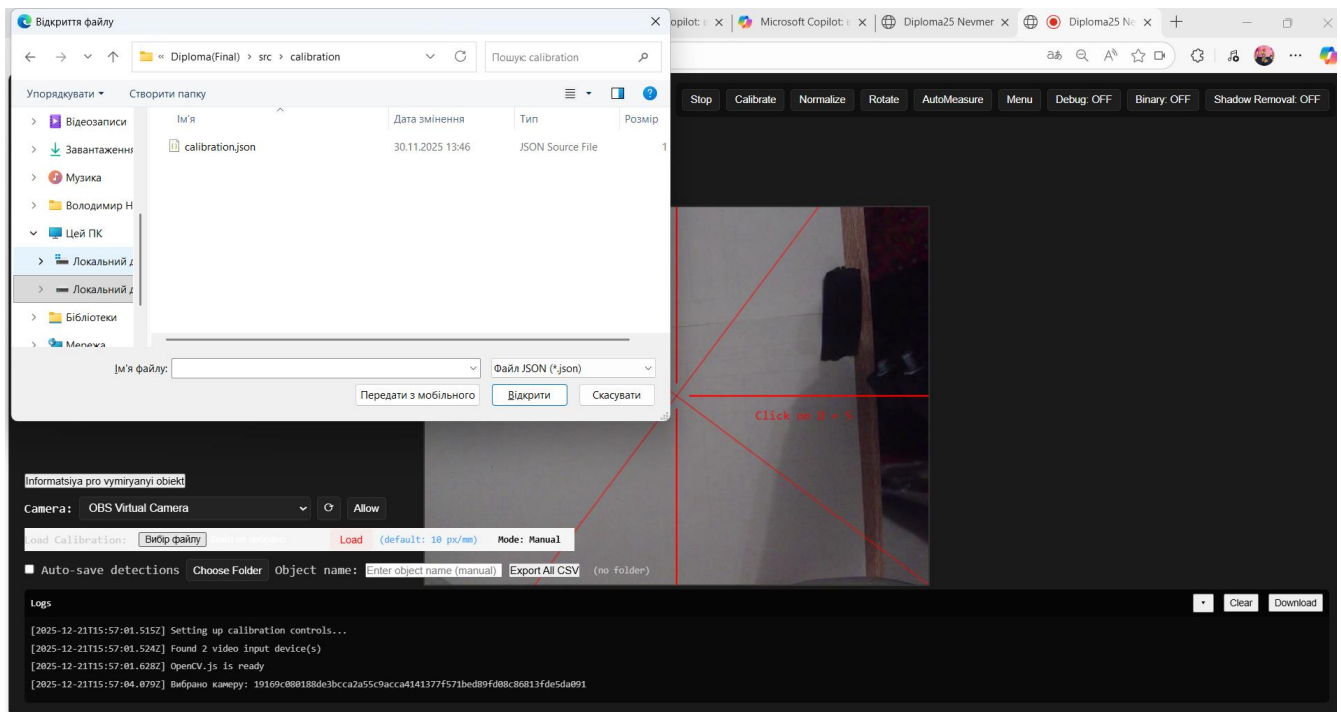


Рисунок 4.7 Меню вибору готового калібровочного файлу

У коді цей процес реалізовано через взаємодію класу CalibrationManager (файл calibration.js) та методів класу CamRuler (файл camruler.js). Завантаження та застосування калібрування відбувається через методи loadFromFile, parseCalibrationData, updateCalibrationFromManager, а також через UI-контролери.

4.5 Видалення шумів/тіней та бінаризація зображення

Після отримання кадру з камери зображення спочатку перетворюється у відтінки сірого (grayscale), що спрощує подальшу обробку. Далі система перевіряє, чи доступний алгоритм CLAHE (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization). Якщо так - застосовується CLAHE для покращення контрасту та видалення тіней.

Якщо CLAHE недоступний, використовується гомоморфна фільтрація, яка також спрямована на пригнічення тіней та вирівнювання освітлення.

Після цього до зображення застосовується гаусове розмивання (GaussianBlur), що дозволяє зменшити високочастотний шум. На завершальному етапі виконується бінаризація - застосування порогової фільтрації для виділення об'єктів на зображенні та подальшого пошуку контурів.

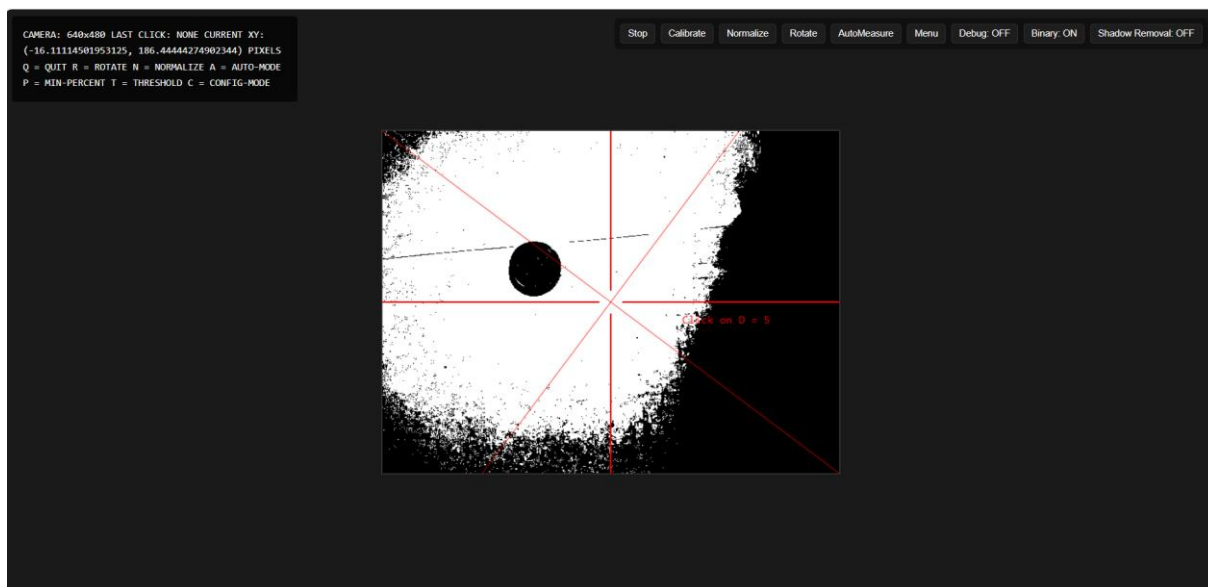


Рисунок 4.8 Бінарний фільтр зображення

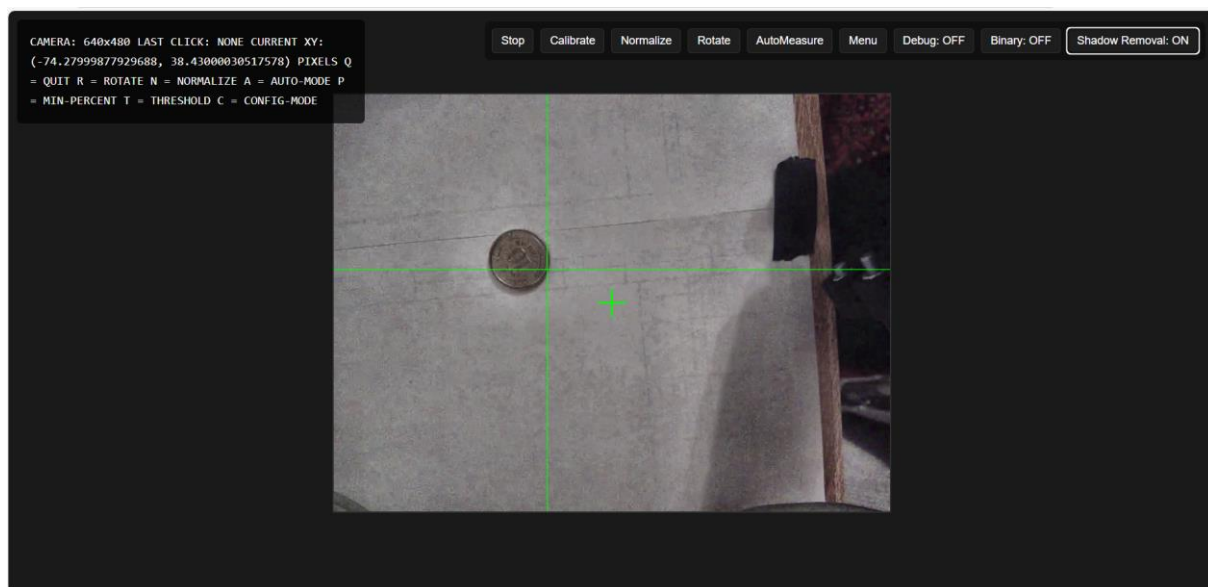


Рисунок 4.9 Режим видалення тіней за технологією CLAHE

```
// shadowremoval.js
removeShadows(src, dst) {
  if (!this.enabled || !src || !dst) {
    if (src && dst && src !== dst) {
      src.copyTo(dst);
    }
    return;
  }
  const useCLAHE = typeof cv.CLAHE !== 'undefined';
  if (useCLAHE) {
    this.removeShadowsCLAHE(src, dst);
  } else {
    this.removeShadowsHomomorphic(src, dst);
  }
}
```

Рисунок 4.10 Код що відповідає за видалення тіней

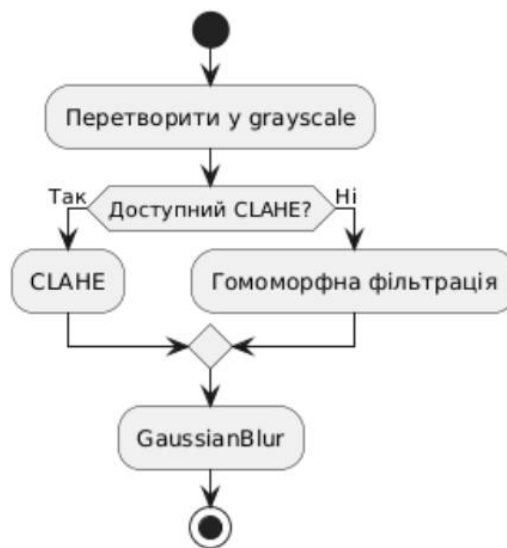


Рисунок 4.11 UML діаграма фільтрації

```

// camruler.js
processAutoMode(infoText) {
  // ...
  cv.cvtColor(this.src, this.gray, cv.COLOR_RGBA2GRAY);
  const ksize = new cv.Size(this.autoBlur, this.autoBlur);
  cv.GaussianBlur(this.gray, this.blurred, ksize, 0, 0, cv.BORDER_DEFAULT);
  cv.threshold(this.blurred, this.thresh, this.autoThreshold, 255, cv.THRESH_BINARY);
  cv.bitwise_not(this.thresh, this.thresh);
  // ...
  cv.findContours(this.thresh, contours, hierarchy, cv.RETR_TREE, cv.CHAIN_APPROX_SIMPLE);
  // ...
}

// camruler.js
applyBinaryFilter() {
  // ...
  cv.cvtColor(this.src, this.gray, cv.COLOR_RGBA2GRAY);
  const t = typeof this.autoThreshold === 'number' ? this.autoThreshold : 127;
  cv.threshold(this.gray, this.thresh, t, 255, cv.THRESH_BINARY);
  // ...
}
  
```

Рисунок 4.12 Код, що відповідає за бінаризацію

Ці етапи реалізовані у класі ShadowRemoval (файл shadowremoval.js) та у відповідних методах класу CamRuler (наприклад, processAutoMode, applyBinaryFilter).

4.6 Вимірювання розмірів об'єктів

Для вимірювання лінійних розмірів користувач обирає дві точки на зображенні. Система обчислює відстань між цими точками у пікселях за допомогою евклідової метрики: $d_{px} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$.

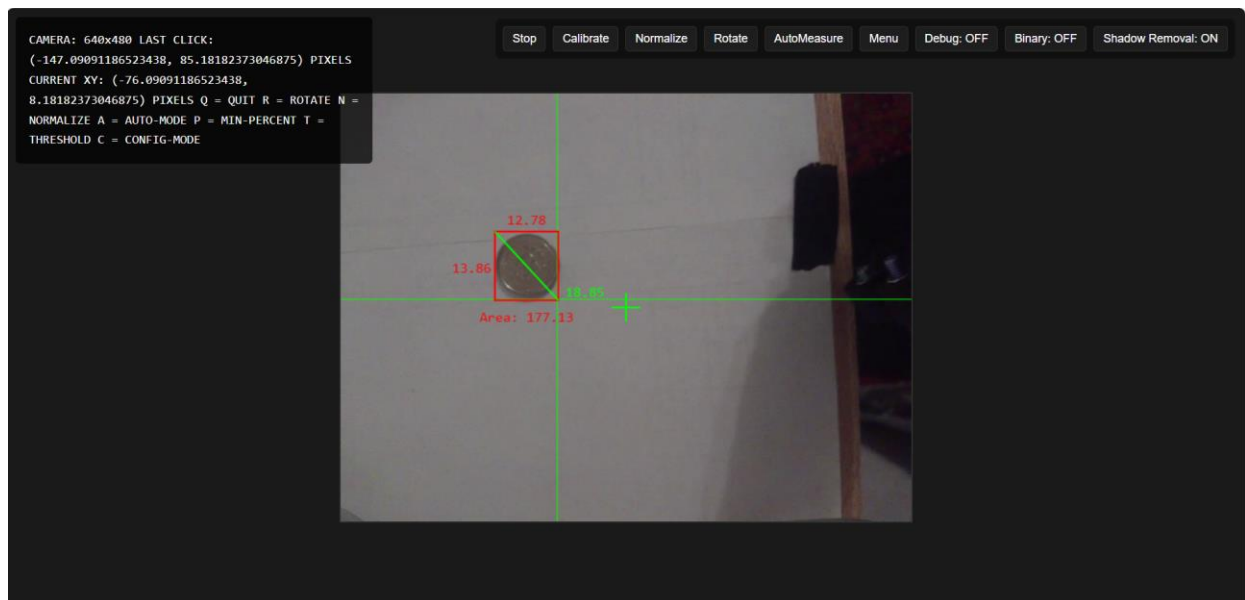


Рисунок 4.13 Ручне вимірювання

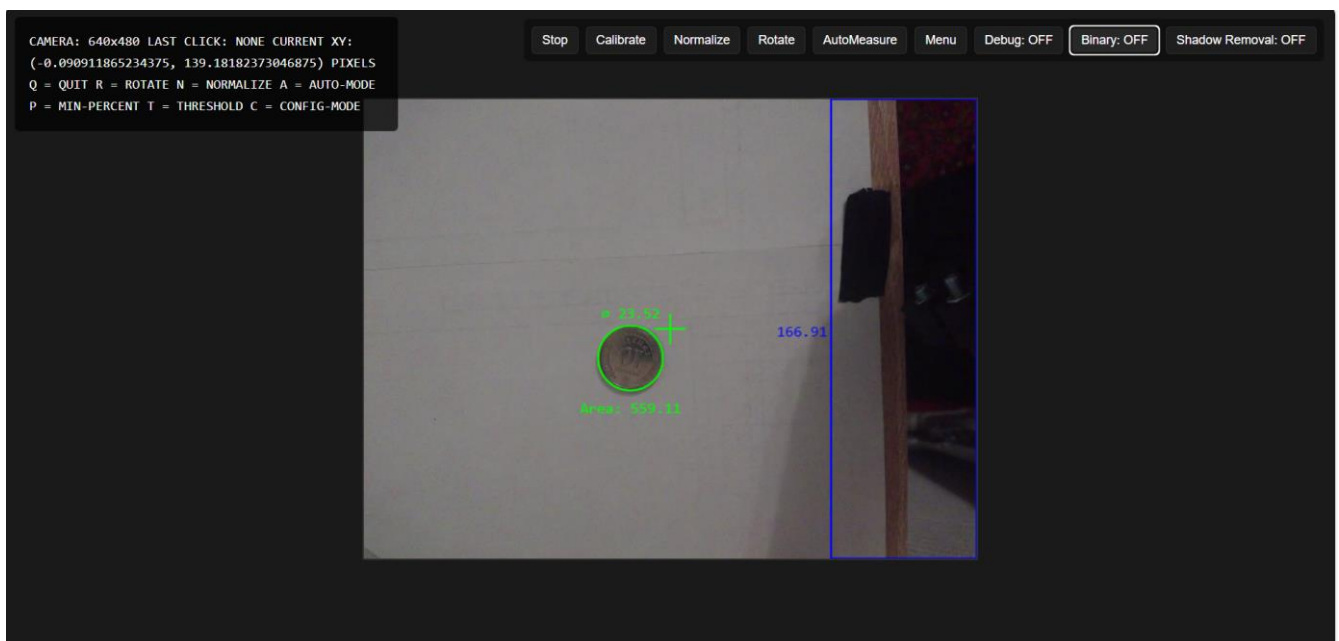


Рисунок 4.14 Вимірювання в авторежимі

Далі ця відстань переводиться у міліметри за допомогою масштабного коефіцієнта, отриманого під час калібрування: $d_{mm} = d_{px} * scale$, де $scale = 1 / pixelsPerMm$.

```
// camruler.js
distance(x1, y1, x2, y2) {
  return Math.hypot(x1 - x2, y1 - y2);
}

conv(x, y) {
  const d = this.distance(0, 0, x, y);
  let scale = ...; // визначається з калібрування
  return { x: x * scale, y: y * scale };
}

// camruler.js (приклад для радіуса)
const circle = cv.minEnclosingCircle(contour);
const radius_px = circle.radius;
const radius_mm = radius_px * scale;
```

Рисунок 4.15 Код, що відповідає, за вимірювання параметрів

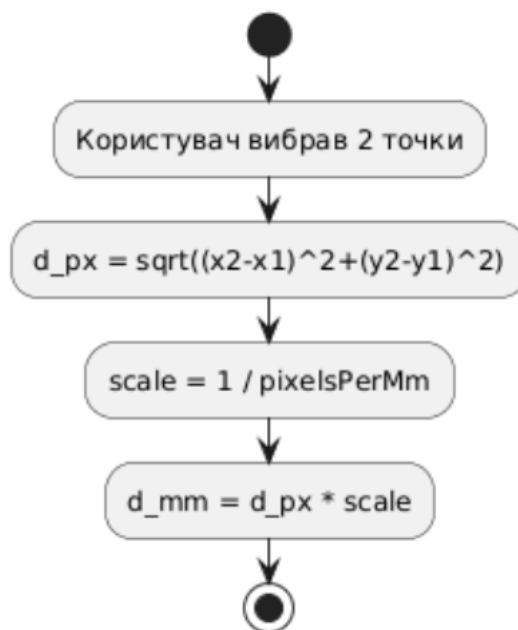


Рисунок 4.16 UML діаграма лінійних розмірів

Для вимірювання радіусів система знаходить контур кола (або об'єкта, близького до кола) на зображенні, після чого визначає мінімальне описане коло (minEnclosingCircle), отримуючи координати центру та радіус у пікселях (radius_px). Далі радіус у пікселях також переводиться у міліметри: $\text{radius_mm} = \text{radius_px} * \text{scale}$.

```
// csvstore.js
async exportAll() {
  // ...формування структури даних...
  if (this.saveDirHandle?.getFileHandle) {
    // Збереження у вибрану папку
  } else {
    // Завантаження файлу користувачу
  }
}
```

Рисунок 4.17 Код, що організовує збереження даних

Ці операції реалізовані у класі CamRuler через відповідні методи, наприклад, для лінійних розмірів - через обробку подій вибору точок, для радіусів - через аналіз контурів та використання функцій OpenCV.

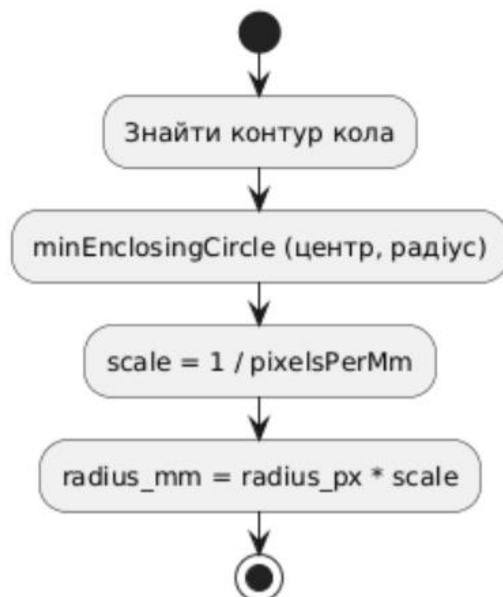


Рисунок 4.18 UML діаграма вимірювання радіусів

4.7 Зберігання даних та логування

Процес зберігання даних та логування реалізовано як окремі підсистеми, що забезпечують збереження результатів вимірювань і фіксацію подій для контролю та аналізу роботи системи.



Рисунок 4.19 UML діаграма зберігання даних

Після виконання вимірювань система формує структуру даних (у форматі JSON або CSV), яка містить усі необхідні параметри: імена об'єктів, розміри, площі, відсотки тощо. Далі перевіряється, чи вибрана папка для збереження. Якщо так - файл зберігається у вибрану директорію за допомогою File System Access API. Якщо папку не вибрано, користувачу пропонується завантажити файл на комп'ютер. У разі відсутності даних для збереження система повідомляє про це користувача.



Рисунок 4.20 UML діаграма логування даних.

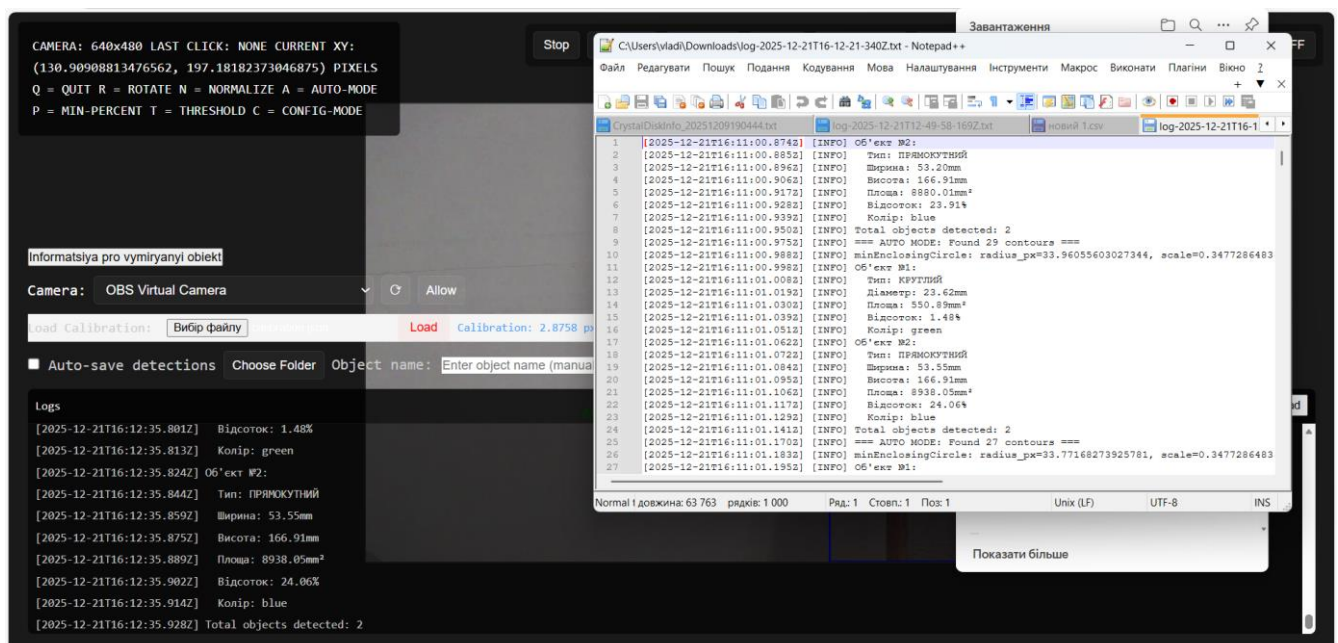


Рисунок 4.21 Логування роботи програми

Кожна подія або помилка, що виникає під час роботи системи, фіксується у буфері логів (logBuffer). Для кожного запису зберігається час, тип події та опис. Якщо логування увімкнено, записи відображаються у UI. Користувач може очистити лог або завантажити його у файл для подальшого аналізу. Логування допомагає відслідковувати дії користувача, помилки та інші важливі події.

```
// logger.js
add(message, type = 'info') {
  const entry = { time: new Date(), type, message };
  this.logBuffer.push(entry);
  if (this.logVisible) {
    this.renderLogs();
  }
}
clear() {
  this.logBuffer = [];
  this.renderLogs();
}
download() {
  // Збереження logBuffer у файл
}
```

Рисунок 4.22 Код, що відповідає за логування

Також реалізовано зберігання зображення кожного об'єкту під час вимірювання в окрему папку та виведення його гістограми.

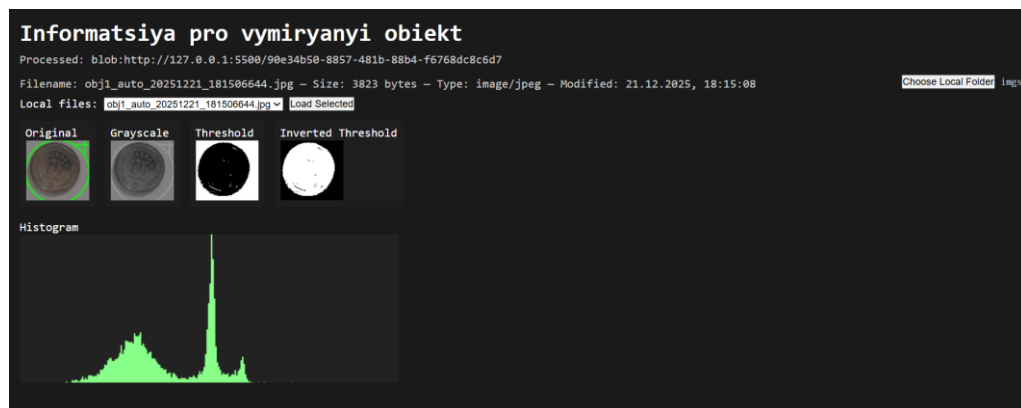


Рисунок 4.23 Вивід інформації про виміряний об'єкт



Рисунок 4.24 UML діаграма збереження зображень об'єкту вимірювання

Висновки до четвертого розділу

У даному розділі було обґрунтовано вибір технологій для розробки програмного забезпечення KIBC, було обрано мову програмування JavaScript та бібліотеку OpenCV. В якості середовища виконання використано дистрибути на базі ядра Linux, що забезпечує стабільність, модульність та передбачувану поведінку системи в умовах експлуатації.

Алгоритм роботи програмного забезпечення реалізовано у вигляді послідовності етапів: ініціалізація камери, виконання калібрування, попередня цифрова обробка зображень, бінаризація та пошук контурів, вимірювання лінійних і обробки кіл, обчислення площі, збереження результатів та логування подій.

Реалізовано механізми автоматичного визначення масштабу для переведення пікселів у метричні одиниці, що забезпечує коректність та точність вимірювань.

Для підвищення якості обробки зображень застосовано сучасні методи фільтрації та нормалізації освітлення (CLAHE, гомоморфна фільтрація, GaussianBlur), що дозволяють мінімізувати вплив шумів і тіней.

Було передбачено формування результатів у форматі JSON, а також ведення журналу подій, що забезпечує можливість подальшого аналізу та підвищує надійність роботи. Додатково реалізовано збереження зображень об'єктів та їхніх гістограм.

5. РОЗРОБКА МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

5.1 Законодавча база метрологічного забезпечення

Розроблювана в кваліфікаційній роботі система, з законодавчої точки зору входить в категорію координатно-вимірювальних машин. Тож на неї розповсюджуюється дія стандарту ДСТУ ISO 10360 і має базуватися на адаптації принципів цього документу: це означає використання еталонів для калібрування, регулярну перевірку точності та документовану валідацію результатів для забезпечення відтворюваності та відповідності вимогам точності.

Адаптація положень ISO 10360 до систем комп'ютерного зору починається з розуміння, що стандарт задає методики приймально-перевірочних і періодичних випробувань для координатно-вимірювальних машин, які за своєю суттю визначають критерії для оцінки похибок при вимірюванні лінійних і геометричних параметрів. Для візуальних систем це означає, що необхідно мати калібровані еталонні зразки з відомими розмірами і формами, на яких проводяться серії вимірювань для визначення систематичної та випадкової складових похибки, а також для встановлення граничних значень допустимої похибки, що відповідають вимогам виробничої або лабораторної практики [28].

Практична реалізація калібрування включає не лише геометричну калібровку оптики і матриці камери (усунення радіальної та тангенціальної дисторсії, визначення внутрішніх параметрів камери), але й калібрування зовнішньої геометрії системи відносно робочої площини та еталонів. Важливо документувати процедури калібрування, частоту їх проведення та методи оцінки результатів; промислові виробники метрологічного обладнання описують набір тестів і методик, які дозволяють зіставляти показники візуальної системи з очікуваними характеристиками за стандартом ISO 10360, зокрема для перевірки лінійних вимірювань і режимів сканування [29].

Оцінка точності повинна базуватися на статистичному аналізі серій вимірювань: визначення середньоквадратичної похибки, зміщення (bias) і довірчих інтервалів для ключових параметрів.

Валідація результатів передбачає порівняння вимірювань комп'ютерного зору з незалежними еталонними методами, наприклад даними координатно-вимірювальної машини або високоточних 3D-сканерів, і оформлення протоколів, які підтверджують відповідність встановленим допускам. Для промислового застосування доцільно формалізувати процедуру приймання системи в експлуатацію та періодичної перевірки відповідно до частин ISO 10360, адаптованих під специфіку оптичних і скануючих режимів вимірювань.

Серед ключових ризиків і обмежень слід виділити залежність від умов освітлення, температурні впливи на оптику і механіку, а також алгоритмічні джерела похибок (наприклад, неточності сегментації або субпіксельного інтерполювання). Щоб мінімізувати ці ризики, потрібно впровадити контрольовані умови вимірювань, регулярну перевірку калібрування, моніторинг стабільності системи та документовані процедури корекції результатів. Такий підхід забезпечить відтворюваність, простежуваність і відповідність метрологічним вимогам, що є критично важливим для інтеграції систем комп'ютерного зору у виробничий контроль якості.

5.2 Визначення невизначеності

Під невизначеністю розуміють числову характеристику розсіяння значень, які можуть бути розумно приписані вимірюваній величині при заданих умовах вимірювання. Вона не є «похибкою» в сенсі зсуву, а описує діапазон можливих значень з певним рівнем довіри; оформлення і термінологія узгоджені з міжнародними та національними документами, що полегшує взаємне визнання результатів у метрології та промислового контролю якості [30-32].

Її визначення і подання регламентуються настановами GUM і національними стандартами для забезпечення відповідності результатів.

GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) пропонує системний підхід: спочатку чітко формулюють measurand (що саме вимірюється) і умови, потім ідентифікують усі впливові величини, оцінюють для кожної

стандартну невизначеність (Type A - статистично з повторів; Type B - на основі сертифікатів, технічних даних або експертних оцінок), визначають коефіцієнти чутливості (похідні функції вимірювання) і поширюють невизначеності на кінцеву величину методом лінійної апроксимації або чисельними методами, якщо модель нелінійна. Після цього комбінована стандартна невизначеність u_c множиться на коефіцієнт покриття k для отримання розширеної невизначеності (2.23), що дає інтервал покриття з обраним рівнем довіри.

$$U = k * u_c \quad (2.23)$$

Для KIBC геометричних параметрів промислових виробів на машинобудівному підприємстві було виведено оцінки стандартних невизначеностей (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 – Оцінки невизначеностей

Оцінка	Значення (мм)
Калібрування масштабу u_1	1.630
Залишкова дисторсія u_2	0.009
Повторюваність u_3	0.012
Субпіксельна інтерполяція u_4	0.003
Температурна похибка u_5	0.008
Алгоритмічна похибка u_6	0.008

Коефіцієнт масштабу можна визначити за формулою 2.24.

$$U_{scale} = u_1 = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (2.23)$$

Де $a = 2.83$ пікс/мм, значення визначено експериментально під час калі бровки установки. Отже:

$$U_{scale} = u_1 = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{2.83}{\sqrt{3}} = 1.63 \text{ мм} \quad (2.24)$$

Коефіцієнт залишкової дисторсії було обраховано наступним чином. Маючи значення RMS у пікселях $reprojection_error = 0.024754791642212375$, після процесу калібровки (файл калібровки буде доступний у додатках) ми обраховуємо RMS в мм. Також є $estimated_pixels_per_mm$ $p = 2.875805616378784$.

$$1px = \frac{1}{p}; p_i = \frac{p_i}{p}; RMS_{mm} = \frac{RMS_{px}}{p} \quad (2.25)$$

$$1px = 0.347700 \text{ мм}$$

$$RMS_{mm} = 0.008606 \text{ мм}$$

$$U_{dist} = u_2 = 0.008606 \text{ мм}$$

Було обчислено повторюваність вимірів. Для цього зроблено серію з десяти вимірів, одного і того самого зразка, за сталих умов. Для зразка взято монету номіналом 10 гривень, діаметром 23.2 мм.

Таблиця 5.2 - Серія вимірів для оцінки повторюваності

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
23.20	23.20	23.25	23.20	23.19	23.17	23.12	23.17	23.15	23.14

Оцінюємо середнє значення:

$$\bar{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = 23.18 \text{ мм} \quad (2.26)$$

Оцінюємо вибіркове стандартне відхилення S:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2} = 0.03726 \text{ мм} \quad (2.27)$$

Стандартна невизначеність середнього:

$$U_A = \frac{S}{\sqrt{n}} = 0.01179 \text{ мм} \quad (2.28)$$

Порог повторюваності:

$$r = 2.8 * S = 0.1043 \text{ мм} \quad (2.29)$$

Субпіксельна інтерполяція, температурний вплив та алгоритмічна похибка була взята з досліджень виконаних на аналогічних модулях камери.

Отже маючи розраховані значення невизначеностей, можна оцінити загальну невизначеність використовуючи таблицю 5.2.

Таблиця 5.2 – Таблиця внесків

Оцінка	Значення (мм)	Відсоток внеску	Тип
--------	---------------	-----------------	-----

Калібрування масштабу u_1	1.630	99.99%	B
Залишкова дисторсія u_2	0.009	0.003%	A
Повторюваність u_3	0.012	0.005%	A
Субпіксельна інтерполяція u_4	0.003	0.003%	B
Температурна похибка u_5	0.008	0.002%	B
Алгоритмічна похибка u_6	0.008	0.002%	B
Комбінована u_c	1.630	100%	-
Розширена U	3.260	-	-

При припущенні незалежності компонент (GUM) комбінована стандартна невизначеність:

$$U_c = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2} = 1.630 \quad (2.30)$$

З розрахунків можна зробити такий висновок, з усіх компонент з яких складається вимірювання, калібрування масштабу має найбільше значення, і відповідно саме цей параметр найбільше впливає на точність вимірювання усієї системи. А так, як масштаб являється складною компонентою, що включає в себе положення камери в просторі, кут нахилу відносно робочої поверхні і відстань до цієї поверхні, то для забезпечення точності потрібно звернути особливу увагу на жорсткість конструкції і її встановлення.

5.3 Обчислення похибки вимірювання для автоматичного режиму вимірювань.

В кваліфікаційній роботі бакалавра експериментально було встановлено, що точність вимірювання складає ± 5.4 мм. Після проведення модернізації установки, а також удосконалення алгоритму обробки зображення точність мала б кратно вирости. Апаратно установка зазнала змін в модулі камери, на місце веб-камери

було взято модуль промислового рівня. В програмній частині удосконалився процес попередньої обробки зображення, додався механізм видалення тіней, а також завдяки кращій камері, розширився поріг. Змінився також процес калібровки, і тепер виміри майже не залежать від відстані до центру екрана.

Для оцінки похибки було взято, той самий зразок, що і для визначення невизначеності, тобто монета номіналом 10 гривень, діаметром 23.2 мм. Проведено серію вимірів $n = 20$, і на основі цих вимірів розраховано похибку вимірювань.

Таблиця 5.3 – Експериментальні дані

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-	23.20	23.20	23.20	23.25	23.17	23.21	23.19	23.12	23.19	23.17
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
-	23.15	23.15	23.18	23.17	23.17	23.21	23.22	23.21	23.16	23.22

Було обчислено середнє значення:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.31)$$

$$\bar{x} = 23.19 \text{ мм}$$

Було обчислено вибіркє стандартне відхилення:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.32)$$

$$S = 0.034 \text{ мм}$$

Було обчислено стандартну похибку середнього:

$$U_{\bar{x}} = s/\sqrt{n} \quad (2.33)$$

$$U_{\bar{x}} = 0.0076 \text{ мм}$$

Було обчислено t – критерій Стюдента:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{U_{\bar{x}}} \quad (2.34)$$

$$t = 1.84$$

Було обчислено критичне значення при 95% і 19 ступенях свободи:

$$t_{кр} = 2.093 \quad (2.34)$$

Отримуємо довірчий інтервал:

$$\Delta = t_{кр} * U_{\bar{x}} = 0.016 \text{ мм} \quad (2.34)$$

Розрахувавши довірчий інтервал для автоматичного режиму бачимо, що похибка з 5.4 мм впала до значення 0.016 мм. А отже дії з модернізації установки були успішними, також можемо констатувати наступне, що точність нашої KIBS, вища за цифровий штангенциркуль, яким був виміряний наш зразок $0.016 \text{ мм} < 0.2 \text{ мм}$, при виконанні деяких правил користування установкою.

Висновки до п'ятого розділу

Розроблена комп'ютеризована інформаційно-вимірювальна система відповідає деяким вимогам ДСТУ ISO 10360, що дозволяє їй при певних умовах пройти початкову сертифікацію, і отримати допуск до виробництва.

Оцінка невизначеності виконана відповідно до рекомендацій GUM: ідентифіковано впливові величини, розраховано стандартні невизначеності типів A і B, визначено комбіновану стандартну невизначеність та розширений інтервал покриття. Аналіз внесків показав, що домінуючий внесок у загальну невизначеність забезпечує калібрування масштабу, отже зниження загальної невизначеності вимагає пріоритетної уваги до точності визначення масштабу, жорсткості конструкції та стабільності положення камери.

Експериментальні виміри на контрольному зразку продемонстрували суттєве зменшення похибки після модернізації апаратної частини та удосконалення алгоритмів обробки зображення порівняно з версією системи бакалаврської роботи

2024 року: початкова похибка порядку ± 5.4 мм зменшилась до довірчого інтервалу ± 0.016 мм при рівні довіри 95 %. Отримані результати свідчать про ефективність проведених заходів і про придатність системи для вимірювань з точністю, що перевищує точність цифрового штангенциркуля за умови дотримання умов експлуатації.

Основними джерелами залишкових похибок залишаються впливи освітлення, температурні деформації оптики і механіки, а також алгоритмічні помилки сегментації і субпіксельної інтерполяції. Для мінімізації цих впливів необхідно впровадити контрольовані умови освітлення, температурний моніторинг, регулярні перевірки калібрування та документовані процедури корекції результатів, а також розширити валідацію системи шляхом порівняння з незалежними еталонними методами.

ВИСНОВОК

У ході виконання кваліфікаційної роботи була створена комп'ютеризована система для вимірювання геометричних параметрів виробів машинобудівного підприємства за їх відеозображеннями. Розроблений пристрій фактично є відеовимірювальною машиною, що складається з готових компонентів. У процесі дослідження було проаналізовано існуючі рішення, представлені на українському та світовому ринку, та враховано їх конструктивні особливості.

Система забезпечує можливість безконтактного визначення лінійних розмірів за допомогою камери з високою точністю у ручному режимі, а також дозволяє отримати інформацію про загальні габарити об'єкта при використанні автоматичного режиму.

Підвищено точність вимірювань системою, у порівнянні з системою зразка кваліфікаційної роботи бакалавра точність виросла в 320 разів, і взагалом точність системи стала аналогічною по точності вимірювальним приладам інших конструкцій.

Перероблено програмне забезпечення, додано підсистеми видалення тіней, переведено ПЗ на веб-технології, забезпечена робота в браузері. Додано систему логування.

Проведено аналіз невизначеності системи, а також систему було наближено до стандартів ДСТУ ISO 10360.

Усі поставлені завдання, що були згадані у вступі, було виконано.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Baker S., I. Matthews - Lucas-Kanade 20 Years On: A Unifying Framework, *Int. J. Comput. Vis.*, 56, 221–255 (2004).
2. Besl P. J., N. D. McKay - A Method for Registration of 3 D Shapes, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 14(2), 239–256 (1992).
3. Brown M., D. G. Lowe - Automatic panoramic image stitching using invariant features. *Int. J. Comput. Vis.* 74, 59–73 (2007).
4. Elad M., A. Feuer - Superresolution restoration of an image sequence: Adaptive filtering approach. *IEEE Trans. Image Process.*, 8, 387–395 (1999).
5. Fang Y., I. Masaki, B. Horn - Depth-based target segmentation for intelligent vehicles: Fusion of radar and binocular stereo. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, 3, 196–202 (2002).
6. Juneja M., R. Mohan - An improved adaptive median filtering method for impulse noise detection. *Int J Recent Trends Eng*, 1, 274–278 (2013).
7. Kierkegaard P. - A method for detection of circular arcs based on the Hough transform. *Mach Vis Appl*, 5, 249–263 (1992).
8. Lee J. H., Y. S. Kim, S. R. Kim, et al. - Real-time application of critical dimension measurement of TFT-LCD pattern using a newly proposed 2D image-processing algorithm, *Opt Lasers Eng*, 46, 558–569 (2008).
9. Lu R. S., Y. F. Li, Q. Yu - On-line measurement of the straightness of seamless steel pipes using machine vision technique. *Sens Actuators A*, 94, 95–101 (2001).
10. Malamas E. N., E. G. M. Petrakis, M. Zervakis, et al. - A survey on industrial vision systems, applications and tools. *Image Vis. Comput.*, 21, 171–188 (2003).
11. Meng Q., R. Zhou - Research on restoration of composite-frame images degraded by motion. *Comput. Eng.*, 32, 187–189 (2006).
12. Min Y. - Method of Straight Line Edge Subpixel Localization for Mechanical Part Image. *Journal of SouthChina University of Technology*, 31, 30–33 (2003).
13. Triggs B. - Empirical filter estimation for subpixel interpolation and matching, *Proc. ICCV 2001*, p. 550 (2001).

14. Yuen H. K., J. Princen, J. Illingworth, et al. - Comparative study of Hough transform methods for circle finding. *Image Vis. Comput.*, 8, 71–77 (1989).
15. Z. Zhang - A Flexible New Technique for Camera Calibration, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 22(11), 1330–1334 (2000).
16. R. I. Hartley - In Defense of the Eight-Point Algorithm, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 19(6), 580–593 (1997).
17. J. Zheng, Y. Bai, B. Wang, et al. - High-speed dynamic spectrum data acquisition system based on linear CCD. *Chinese Optics Letters*, 9(s1), s10308 (2011).
18. S. Xiaojun, Z. Xiaohui, Z. Hu, et al. - Inspection of surface finish of flat grinding based on machine vision. *Chin J Lasers*, 35(s2), 320–323 (2008).
19. Bradski G., A. Kaehler - *Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library*, O'Reilly Media, 2008.
20. Gonzalez R. C., R. E. Woods, S. L. Eddins - *Digital Image Processing using MATLAB*, 2004.
21. Klette R. - *Robot Vision* (Hunan Literature and Art Publishing House, Changsha, 2001).
22. Ma S. D., Z. Y. Zhang - *Computer vision - theory and algorithm* (Science Press, Beijing, 1998).
23. Podchashynskyi Yu. O. - *Стиснення та перетворення цифрових відеозображень з вимірювальною інформацією про геометричні параметри об'єктів: Монографія, ЖДТУ, Житомир, 2019.*
24. Hartley R., Zisserman A. - *Multiple View Geometry in Computer Vision*, 2nd ed., Cambridge University Press, 2003.
25. Szeliski R. - *Computer Vision: Algorithms and Applications*, Springer, 2010.
26. Brown L. G. - A survey of image registration techniques. *ACM*, 24(4), 325–376 (1992).
27. R. Keys - Cubic convolution interpolation for digital image processing. *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.*, 29, 1153–1160 (2003).
28. ДСТУ 2470-94 - Надійність техніки. Системи технологічні. Терміни та визначення, Держстандарт України, 1995.

29. ДСТУ ISO 10360-2:2006 - Технічні вимоги до геометрії виробів. Частина 2. Координатно-вимірювальні машини для вимірювання розмірів (62876).
30. ISO 5725-1:1994 - Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results - Part 1: General principles and definitions.
31. Журахівський А. В., Кінаш Б. М., Пастух О. Р. - Надійність електричних систем і мереж: навчальний посібник, Видавництво Львівської політехніки, 2012.
32. Методичні вказівки - До виконання кваліфікаційної роботи для здобувачів спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка», Подчашинський Ю. О., Л. О. Чепюк, Р. В. Петросян, ДУ «Житомирська політехніка», 2022.
33. Бібліотека Numpy [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://numpy.org/doc/stable>.
34. Бібліотека OpenCV [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://docs.opencv.org/5.x>.
35. J.-Y. Bouguet - Camera Calibration Toolbox for Matlab (documentation and toolbox), Caltech/vision website (2004–2008). [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://www.caltech.edu/>
36. Мова програмування Python -. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://wiki.python.org/moin/BeginnersGuide>
37. Z. Zhang - A Flexible New Technique for Camera Calibration, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., 22(11), 1330–1334 (2000) (електронний доступ через IEEE Xplore). Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>
38. MDN - [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://developer.mozilla.org/en-US/>