

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії  
(повна назва)

Кафедра Фізичних основ електронної техніки  
(повна назва)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**Пояснювальна записка**

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

МАШИННИЙ ЗІР У ВІЙСЬКОВІЙ СПРАВІ

(тема)

Виконав:

здобувач 4 року навчання,

групи МТІОЛС-21-1

Кирило КВІТЧАТИЙ

(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма «Інженерія

оптоінформаційних та лазерних систем»

(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. каф. ФОЕТ Юрій КУРСЬКИЙ

(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри ФОЕТ

\_\_\_\_\_

(підпис)

Олександр ГНАТЕНКО

(власне ім'я, прізвище)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет \_\_\_\_\_ Електронної та біомедичної інженерії \_\_\_\_\_

Кафедра \_\_\_\_\_ Фізичних основ електронної техніки \_\_\_\_\_

Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ перший (бакалаврський) \_\_\_\_\_

Спеціальність \_\_\_\_\_ 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка \_\_\_\_\_  
(код і повна назва)

Тип програми \_\_\_\_\_ освітньо-професійна \_\_\_\_\_

Освітня програма \_\_\_\_\_ «Інженерія оптоінформаційних та лазерних систем» \_\_\_\_\_  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві \_\_\_\_\_ Квітчатому Кирилу Дмитровичу \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи \_\_\_\_\_ Машинний зір у військовій справі \_\_\_\_\_

затверджена наказом університету від « 23 » \_\_\_\_\_ травня \_\_\_\_\_ 2025 р. № 408 Ст \_\_\_\_\_

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_ 23 \_\_\_\_\_ червня \_\_\_\_\_ 2025 р. \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи: \_\_\_\_\_  
фільтри; машинний зір; алгоритми; лазерні 3D сканери; лазери. \_\_\_\_\_

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі \_\_\_\_\_

1 Види зображень у машинному зорі. 2 Фільтр Вандер Люгта. 3 Створення карти \_\_\_\_\_  
місцевості на основі лазерного 3D сканера. 4 Контурний аналіз. \_\_\_\_\_

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій

Демонстраційний матеріал – 14 слайдів

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел машинного зору	07.05.25–15.05.25	Виконано
2	Дослідження фізичних основ машинного зору	16.05.25–22.05.25	Виконано
3	Виконання чисельних розрахунків математичних основ машинного зору	23.05.25–27.05.25	Виконано
4	Аналіз розрахунків та параметрів машинного зору у військовій справі	27.05.25–29.05.25	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	31.05.25–09.06.25	Виконано
6	Оформлення демонстраційних матеріалів	10.06.25–12.06.25	Виконано
7	Проходження нормоконтролю та перевірки на академічний плагіат	13.06.25–19.06.25	Виконано
8	Отримання відгуку та рецензії	20.06.25–21.06.25	Виконано
9	Підготовка та захист кваліфікаційної роботи	22.06.25–24.06.25	Виконано

Дата видачі завдання 05 травня 2025 р.

Здобувач \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ проф. каф. ФОЕТ Юрій КУРСЬКИЙ  
(підпис) (посада, власне ім'я, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 52 с., 30 рис., 1 додаток, 12 джерел.

АЛГОРИТМИ РОЗПІЗНАВАННЯ, КАРТА ГРАФУВАННЯ, МАШИННИЙ ЗІР, ФІЛЬТР ВАНДЕР ЛЮГТА, 3D ЛАЗЕРНИЙ СКАНЕР.

Об'єкт дослідження – машинний зір у військовій справі.

Мета дослідження – вивчення фізико-математичних основ машинного зору та вивчення прикладних аспектів застосування систем машинного зору у військовій справі.

Метод дослідження – теоретичний.

Для досягнення мети роботи було поставлено та виконано такі завдання:

1. Проаналізовано фізико-математичні основи машинного зору.
2. Досліджено існуючі та перспективні приклади, напрямки, технології машинного зору військового призначення.

## ABSTRACT

Explanatory note of the qualification work: 52 p., 30 fig., 1 appendix, 12 sources.

GRAPHIC MAP, MACHINE VISION, RECOGNITION ALGORITHMS,  
VANDER LUGHT FILTER, 3D LASER SCANNER.

Object of the study – machine vision in military affairs

The purpose of the study – studying the physical and mathematical foundations of machine vision and studying the applied aspects of the use of machine vision systems in military affairs.

Research method – theoretical.

To achieve the goal of the work, the following tasks were set and completed:

1. The physical and mathematical foundations of machine vision are analyzed.
2. Existing and promising examples, directions, and technologies of military machine vision are investigated.

## ЗМІСТ

Вступ.....	8
1 Основні положення машинного зору .....	9
1.1 Аналіз наукових підходів до побудови систем машинного зору .....	9
1.2 Загальні положення теорії розпізнавання .....	11
1.3 Класифікація в теорії розпізнавання.....	12
1.4 Рівні обробки зображень у системах машинного зору .....	13
2 Фізичні основи машинного зору.....	17
2.1 Відеозображення у видимому спектрі.....	17
2.2 Структура відеозображення .....	17
2.3 Роль відеозображень у машинному зорі.....	18
2.4 Інфрачервоні зображення (тепловізійні).....	18
2.5 Закон Бугера-Ламберта-Бера.....	19
2.6 Закон Стефана-Больцмана.....	20
2.7 Види зображень у машинному зорі.....	21
2.8 Фільтер Вандер Люгта.....	26
3 Математичні основи розпізнавання.....	29
3.1 Постановка задачі класифікації зображень.....	29
3.2 Математична постановка задачі.....	30
3.3 Основні компоненти постановки задачі.....	31
3.4 Спрощений приклад класифікації.....	31
3.5 Класифікація за двома параметрами.....	32
3.6 Завдання з прихованими параметрами.....	33
3.7 Міра близькості.....	33
3.8 Кореляційна міра.....	34
3.9 Зважені міри близькості.....	35
4 Алгоритми розпізнавання у системах машинного зору .....	36
4.1 Контурний аналіз.....	36
4.1.1 Бінаризація та морфологічні алгоритми.....	36
4.1.2 Морфологічна обробка зображень.....	36

4.1.3 Виділення контурів.....	37
4.1.4 Скелетизація та карта відстаней.....	37
4.1.5 Розмітка та підрахунок об`єктів.....	38
4.2 Методи зіставлення зображень.....	38
4.3 Алгоритми розпізнавання у системах машинного зору.....	39
4.4 Передобробка зображень у системах розпізнавання.....	41
4.4.1 Корекція умов видимості.....	41
4.4.2 Геометрична корекція.....	41
4.4.3 Фільтрація шумів.....	42
5 Машинний зір у військовій справі.....	43
5.1 Створення карти місцевості на основі лазерного 3D сканера.....	43
5.2 Сучасні тенденції автономного машинного зору.....	45
5.3 Технології активного машинного зору.....	47
5.4 Автономна навігація без GPS.....	50
Висновки.....	51
Перелік джерел посилання.....	52
Додаток А Демонстраційний матеріал.....	53

## ВСТУП

Почнемо з загального поняття, що таке «Машинний зір», а саме це технологія яка забезпечує технічні системи здатністю аналізувати зображення, розпізнавати об'єкти та ухвалювати рішення на основі візуальної інформації. Сучасні системи машинного зору поєднують знання з оптики, інформатики, обробки сигналів, штучного інтелекту та теорії розпізнавання образів. Вони дозволяють не просто спостерігати навколишнє середовище, а й здійснювати його формалізований аналіз у реальному часі, що особливо важливо для автономних систем.

Системи машинного зору базуються на загальній теорії розпізнавання образів, яка ґрунтується на поняттях ознак, станів, простору, моделей, класифікації та алгоритмів. У цьому контексті зображення розглядається як результат вимірювального процесу, що містить часткову інформацію про реальний об'єкт. Завдання систем машинного зору – на основі аналізу цієї інформації відновити характеристики об'єкта: його положення, форму, розміри, швидкість, клас або функціональний стан.

На відміну від традиційних сенсорів, які фіксують окремі фізичні параметри (температуру, тиск, положення), машинний зір забезпечує багатоканальне сприйняття. Це дозволяє отримувати цілісну картину сцени: просторову структуру, взаєморозташування об'єктів, їхню форму, колір, текстуру та інші ознаки. Завдяки цьому машинний зір став основою численних високотехнологічних застосувань – від автономного транспорту до військових розвідувальних систем, медичної діагностики, безпілотних апаратів і систем контролю якості на виробництві.

Метою даної роботи є вивчення основ машинного зору – фізичних принципів, математичних моделей, алгоритмів розпізнавання – та аналіз його застосування у складних умовах, зокрема в оборонних технологіях. Це дослідження є важливим кроком до розробки інтелектуальних систем, що здатні самостійно сприймати, аналізувати та інтерпретувати навколишній світ [1, 2, 3].

## 1 ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ МАШИННОГО ЗОРУ

### 1.1 Аналіз наукових підходів до побудови систем машинного зору

Системи машинного зору базуються на фундаментальних принципах обробки та інтерпретації зображень, які вивчаються в межах загальної теорії розпізнавання образів. В основі таких систем лежить розуміння того, що зображення – це результат вимірювального процесу, що відображає лише часткову інформацію про об'єкт. Завдання полягає у відновленні характеристик об'єкта (клас, положення, форма, швидкість, стан) на основі аналізу візуального представлення.

Образ, зазвичай, представляється у вигляді прямокутної матриці яскравісних або колірних значень. Проте ці значення не дають однозначного уявлення про фізичні властивості об'єкта – вони потребують обробки та структурного перетворення. Важливою є класифікація рівнів обробки зображення:

- низький рівень охоплює піксельну обробку, корекцію, згладжування та фільтрацію;
- середній рівень відповідає за виділення структур (контурів, сегментів, ознак);
- високий рівень реалізує логіку розпізнавання, класифікації та прийняття рішень.

У літературі розглядаються різні джерела отримання зображень:

- оптичні (камери видимого спектра);
- інфрачервоні (тепловізори);
- радіолокаційні (міліметровий або сантиметровий діапазон);
- рентгенівські та ультрафіолетові системи;
- глибинні сканери, що формують тривимірні карти сцен (наприклад, TOF-камери, LIDAR).

Особливу увагу приділено попередній обробці зображень. Вона охоплює:

- нормалізацію яскравості та контрасту – шляхом лінійних та нелінійних перетворень гістограми;
- гамма-корекцію – для компенсації нелінійності передачі світла;

– баланс білого – для приведення кольорів до нейтрального освітлення;  
 – геометричну корекцію – включаючи афінні, проєктивні та інші трансформації.

Формалізоване представлення використовує формули типу:

$$I' = \frac{(I - a)(N - 1)}{b - a} \quad (1.1)$$

для нормалізації яскравості, або:

$$I' = \left( \frac{I - a}{b - a} \right) \gamma \times 255 \quad (1.2)$$

для гамма-корекції.

Методи фільтрації поділяються на просторові (розмивання, підсилення контрасту) та частотні (використання перетворення Фур'є, Вейвлет-перетворення). Важливу роль відіграють алгоритми інтерполяції, які забезпечують точність під час масштабування або корекції перспективи. Найпоширеніші методи – інтерполяція найближчого сусіда, лінійна, бікубічна.

У контексті виділення ознак розглядаються методи:

- аналізу контурів (ланцюгові коди, представлення Фур'є);
- бчислення моментів (геометричних, Ху-моментів);
- спектрального аналізу;
- опису текстури (матриці співпоявлення, гістограми градієнтів).

Виділені ознаки використовуються як вхідні дані для класифікаторів. У літературі описані такі підходи до класифікації:

- $k$ -ближчих сусідів – ефективний для невеликих вибірок і простої геометрії ознак;
- опорні вектори (SVM) – дають високу точність у задачах з лінійно роздільними класами;
- нейронні мережі – адаптивні, здатні навчатися складним шаблонам, підходять для задач із великою кількістю ознак;

– ієрархічні баєсівські моделі – використовуються для статистичного моделювання складних класів об'єктів.

Усі згадані компоненти теорії та практики розпізнавання образів становлять концептуальну та прикладну основу систем машинного зору й визначають ключові напрями подальших досліджень і розробок у цій галузі.

Машинний зір є одним із ключових компонентів сучасних автоматизованих систем керування. Його основна функція полягає у формуванні зворотного зв'язку про стан об'єктів зовнішнього середовища на основі аналізу зображень, отриманих від камер та інших сенсорних пристроїв. Така система виконує роль візуального сенсора, здатного виявляти, розпізнавати та оцінювати об'єкти в кадрі, що забезпечує підвищену точність, автономність та адаптивність у процесі керування.

Машинний зір дозволяє отримувати значно більше інформації, ніж традиційні датчики. На основі одного зображення можна одночасно визначити положення об'єкта, його форму, розміри, орієнтацію, колір, наявність дефектів, швидкість переміщення тощо. Ця багатовимірна та контекстно залежна інформація є надзвичайно цінною для складних технічних систем [2, 3].

## 1.2 Загальні положення теорії розпізнавання

Теорія розпізнавання є важливою науковою галуззю, яка базується на здатності розрізняти об'єкти за їхніми відмінними ознаками. Ці ознаки дозволяють ідентифікувати об'єкти як серед інших об'єктів того ж класу, так і серед елементів навколишнього середовища. Знання про світ навколо нас формуються переважно через сенсорні відчуття – зір, слух, дотик тощо – що сприяє кращому сприйняттю інформації та прийняттю рішень.

У процесі розпізнавання об'єктів важливу роль відіграє поняття стану та простору. Стан об'єкта, що розпізнається, описується як комбінація різних параметрів, які утворюють  $n$ -вимірний простір. Такий підхід дозволяє ефективно використовувати математичні моделі для опису, аналізу та передбачення поведінки об'єктів у системах розпізнавання.

Об'єкт можна вважати розпізнаваним тоді, коли існує чітка процедура розпізнавання, яка може бути реалізована в межах певного (кінцевого) інтервалу часу. Повна розпізнаваність передбачає можливість ідентифікувати кожен стан об'єкта на основі наявних ознак.

Моделювання є одним із ключових інструментів теорії розпізнавання. Воно передбачає опис поведінки об'єкта за допомогою змінної стану, яка охоплює всі релевантні характеристики. Залежно від складності задачі, моделі можуть бути простими – гомоморфними, що відображають базові залежності, або складнішими, які враховують взаємодію багатьох параметрів і контекстуальні чинники.

Класифікація відіграє фундаментальну роль у процесі розпізнавання. Вона передбачає поділ множини об'єктів на групи або класи на основі спільних ознак. Таксономія – це систематизація таких класифікацій, яка дозволяє створювати ієрархії ознак і груп, забезпечуючи глибше розуміння структури предметної області [1].

### 1.3 Класифікація в теорії розпізнавання

Класифікація є невід'ємною частиною теорії розпізнавання та виконує ключову функцію – структурування об'єктів на основі їх спільних ознак. Вона дозволяє встановити зв'язки між різними категоріями об'єктів і формує логічну систему понять, що спрощує процес ідентифікації, аналізу та інтерпретації.

У загальному контексті класифікація розглядається як інструмент упорядкування даних, що базується на виявленні спільних характеристик у множині об'єктів. Саме це групування дає змогу створювати ефективні алгоритми розпізнавання, оскільки кожна група (або клас) характеризується стабільними ознаками, притаманними всім її елементам.

Класифікації можуть бути поділені на природні й штучні. Природні класифікації ґрунтуються на суттєвих ознаках об'єктів, які відображають їхню глибинну природу. Наприклад, періодична таблиця хімічних елементів є прикладом природної класифікації, заснованої на фундаментальних властивостях атомів. Штучні класифікації, навпаки, будуються за умовними або формальними

ознаками, як-от алфавітні покажчики, що не мають семантичного змісту, але полегшують навігацію.

Таким чином, класифікація є не лише технічним засобом упорядкування об'єктів, а й потужним пізнавальним інструментом, який дозволяє глибше зрозуміти структуру, функції та розвиток розпізнаваних систем [1].

#### 1.4 Рівні обробки зображень у системах машинного зору

Обробка зображень у системах машинного зору здійснюється в межах трирівневої ієрархії, де кожен рівень відповідає за певний обсяг та характер трансформацій вхідної інформації. Такий підхід дозволяє поетапно виділити значущі ознаки, знизити складність розпізнавання та підвищити стійкість до шумів і зовнішніх впливів.

На нижньому рівні обробки зображення сприймається як масив піксельних значень. Саме тут виконуються базові перетворення, спрямовані на усунення спотворень, викликаних умовами знімання: поганим освітленням, зашумленням, ракурсом. До типових задач належить фільтрація шумів, нормалізація яскравості, контрастування, масштабування, вирівнювання геометрії. На цьому етапі зображення приводиться до узгодженого вигляду, що є критично важливим для подальшого аналізу. Основні операції: розрахунок гістограми яскравості, застосування медіанного або гаусового фільтрів, геометричні трансформації.

Гістограма яскравості є основним статистичним інструментом нижнього рівня обробки зображень. Вона відображає, як часто кожне значення яскравості зустрічається на зображенні. Для побудови гістограми всі пікселі зображення скануються, і значення яскравості кожної точки заноситься у відповідний лічильник. Таким чином формується функція  $H(I)$ , яка показує кількість пікселів з яскравістю  $I$  — від 0 до 255 (у випадку 8-бітного зображення).

Гістограма дозволяє виконати лінійну або нелінійну корекцію яскравості, наприклад, за допомогою гамма-корекції. Лінійна корекція полягає у додаванні константи до кожного значення яскравості, що зсуває гістограму вправо або вліво. Це дозволяє змінювати середню яскравість зображення. Контрастність

визначається як ширина ділянки гистограми, де значення частот не дорівнюють нулю (рис. 1.1).

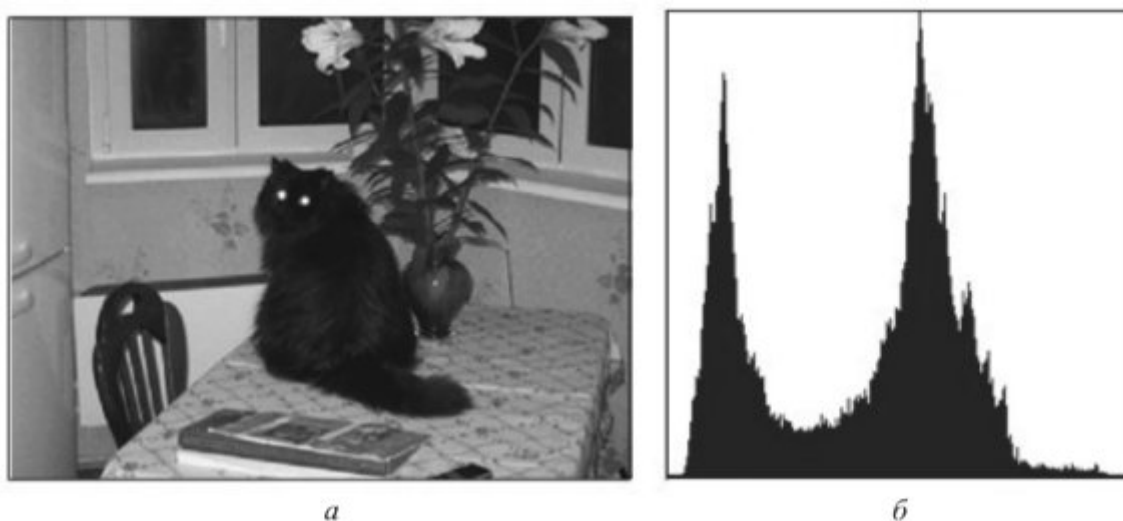


Рисунок 1.1 — Зображення (а) та його гистограма яскравості (б)

Середній рівень обробки охоплює роботу з локальними структурами – об'єктами, що мають просторову цілісність. Тут відбувається виділення контурів, детектування кутів, побудова скелетів, використання морфологічних операторів, сегментація об'єктів. Формуються первинні ознаки, які ще не мають семантичного змісту, але вже представляють об'єкт як абстрактну геометричну структуру. Важливим інструментом є бінаризація – перехід від напівтонового зображення до чорно-білого на основі порогу. Це дозволяє спростити опис об'єкта та виконати його подальшу ідентифікацію.

На середньому рівні обробки зображень основним завданням є виділення локальних структурних особливостей, таких як кути. Кут є точкою, у якій контур змінює свій напрямок, що робить його дуже важливою ознакою при аналізі форм та структур об'єктів.

Суть детектора полягає в тому, що зображення фільтрується за допомогою шаблонів, які виділяють області з характерними кутовими структурами. В результаті застосування фільтра  $S_{45}$  отримується градієнтна карта, на якій яскраві пікселі відповідають потенційним кутам (рис. 1.2).

Перевагою цього підходу є його простота та швидкодія, однак він може бути чутливим до поворотів зображення. Тому часто використовується множина поворотних масок для покриття різних орієнтацій.



Рисунок 1.2 – Детектор кутів (а) із маскою С45 (б)

Нарешті, високий рівень обробки зображень включає класифікацію, зіставлення з еталонами, ідентифікацію об'єктів, прийняття рішень. Тут формалізується задача розпізнавання у вигляді множини класів та виконується пошук відповідності між описом об'єкта та шаблоном. Використовуються класифікатори, нейронні мережі, статистичні моделі. Саме на цьому рівні система здатна сказати, що перед нею, наприклад, автомобіль, обличчя чи дефект поверхні. Високий рівень часто використовує результати попередніх етапів – контури, сегменти, кути – як вхідні ознаки.

Після виконання немаксимального подавлення формується гістограма амплітуди градієнта. Вона відображає розподіл сили контрасту у всіх точках зображення. У більшості випадків гістограма має одномодальний характер – тобто одну виражену вершину, що відповідає основному класу границь.

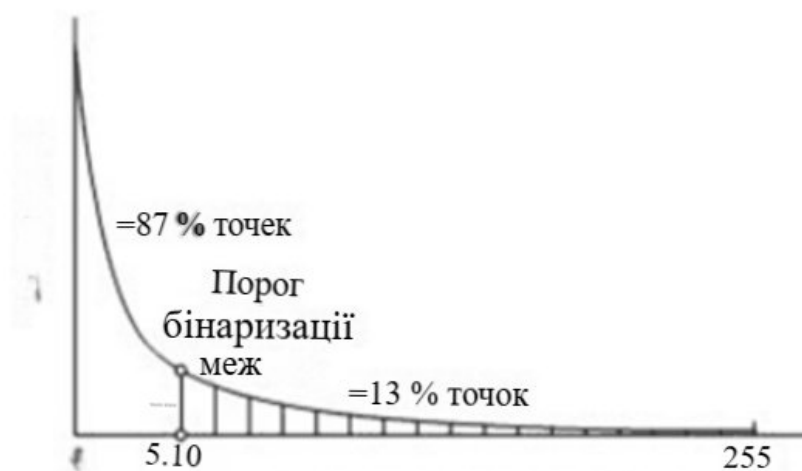
Для подальшої бінаризації границь (відділення справжніх від хибних) визначається порогове значення. Це може бути:

- фіксоване значення (наприклад, 5–10 з нормалізованої шкали 0–255);
- значення, отримане як відсоток від середньої амплітуди (наприклад, від 110 % до 120 %);

– значення, що забезпечує фіксовану кількість точок границь (напр. за правилом 13 %).

Модифікація гистограми дозволяє визначити такий поріг: моди (локальні піки) гистограми підсумовуються, починаючи з найвищих значень, до тих пір, поки кількість точок не досягне бажаної. Поріг встановлюється на останній моді, яка потрапляє в цю суму (рис. 1.3)

Рисунок 1.3  
Гістограма  
алгоритм



–  
градієнта,

немаксимального подавлення

Завдяки ієрархічній структурі система машинного зору може адаптуватися до складних умов навколишнього середовища та виконувати розпізнавання з високою точністю. Нижній рівень виконує підготовку, середній – структурує, а високий – приймає рішення [1, 3].

## 2 ФІЗИЧНІ ОСНОВИ МАШИННОГО ЗОРУ

## 2.1 Відеозображення у видимому спектрі

Найпоширенішим типом інформації, яку опрацьовують системи машинного зору, є відеозображення у видимому спектрі електромагнітного випромінювання. Цей тип зображень формується за рахунок відбитого світла в діапазоні довжин хвиль приблизно від 380 нм до 760 нм яке сприймається людським оком. В основі таких зображень лежить перетворення електромагнітної енергії у цифрову форму за допомогою оптичних сенсорів, розташованих у камерах – зокрема, CMOS або CCD-матрицях.

У системах машинного зору використовуються як статичні, так і динамічні зображення. Останні особливо актуальні в задачах реального часу, таких як розпізнавання на виробничих лініях, автономна навігація, моніторинг безпеки тощо [3].

## 2.2 Структура відеозображення

Цифрове відеозображення зазвичай представляється у вигляді масиву пікселів, де кожен піксель містить інформацію про яскравість (у випадку чорно-білого зображення) або три компоненти кольору – червоний ( $R$ ), зелений ( $G$ ) і синій ( $B$ ). Такий підхід називається RGB-моделлю і є основою для більшості камер та моніторів. Альтернативні кольорові простори, як-от YCbCr або HSV, можуть використовуватись для кращої обробки кольору в алгоритмах розпізнавання.

У чорно-білих зображеннях кожному пікселю призначається лише одне значення яскравості (градація сірого). Залежно від роздільної здатності та глибини кольору, це значення може бути представлене, наприклад, як восьмибітне (від 0 до 255), що дозволяє охопити 256 градацій яскравості (рис. 2.1) [4, 5].



Рисунок 2.1 – Постановка задачі розпізнавання

### 2.3 Роль відеозображень у машинному зорі

Відеозображення у видимому спектрі є основним джерелом даних у переважній більшості практичних застосувань:

- контроль якості продукції;
- розпізнавання облич, номерів, предметів;
- відстеження об'єктів у русі;
- візуальна навігація автономних систем;
- взаємодія з користувачем через камери (наприклад, в AVR).

Його перевага полягає в доступності, простоті реалізації, високій інформативності та адаптованості до людиноорієнтованих задач. Камери, що працюють у цьому діапазоні, є недорогими, компактними та універсальними, що робить їх стандартним елементом більшості систем машинного зору [1].

### 2.4 Інфрачервоні зображення (тепловізійні)

Інфрачервоне зображення належить до типів візуальної інформації, які формуються у спектральному діапазоні, що лежить нижче за межу чутливості людського ока. Цей діапазон охоплює довжини хвиль приблизно від 0,7 мкм до

14 мкм і відіграє важливу роль у тих випадках, коли використання звичайного видимого світла є недостатнім або неможливим. У межах інфрачервоного спектру розрізняють ближній та дальній діапазони, кожен з яких має свої особливості формування зображень та застосування.

Ближній інфрачервоний діапазон за своїми характеристиками наближений до видимого світла. Його випромінювання може сприйматися звичайними камерами, якщо ті не обладнані світлофільтрами, які блокують ІЧ-промені. Цей діапазон активно використовується у технологіях прихованого підсвічування, зокрема в системах відеоспостереження, коли камера працює в умовах недостатнього освітлення або в повній темряві. Джерела інфрачервоного світла, наприклад, світлодіодні підсвітки, створюють випромінювання, яке не видно для людини, але добре вловлюється матрицею камери, що дозволяє системі бачити без створення видимого освітлення.

Дальній інфрачервоний діапазон, відомий також як тепловий, охоплює довжини хвиль, пов'язані з тепловим випромінюванням об'єктів. Це випромінювання утворюється не за рахунок відбитого світла, а внаслідок внутрішнього теплового стану тіл. На зображенні, сформованому в цьому діапазоні, відображаються температурні контрасти, де об'єкти з вищою температурою — наприклад, люди, тварини, працююча техніка – мають яскравіші теплові сигнали порівняно з фоном [1, 5, 6].

## 2.5 Закон Бугера-Ламберта-Бера

Закон Бугера-Ламберта-Бера щодо (поглинання світла/рентгенівських променів) виглядає так:

$$I(l) = I_0 e^{-al} . \quad (2.1)$$

Використовується для визначення відстані до об'єкта за допомогою вимірювання фази відбитого радіохвильового або лазерного сигналу. Формує

основу роботи радіолокаційних систем та лазерних далекомірів у дальнометричних системах (рис. 2.2)

Таким чином, інфрачервоні зображення, як ближні, так і теплові, займають важливе місце в системах машинного зору [1, 6].

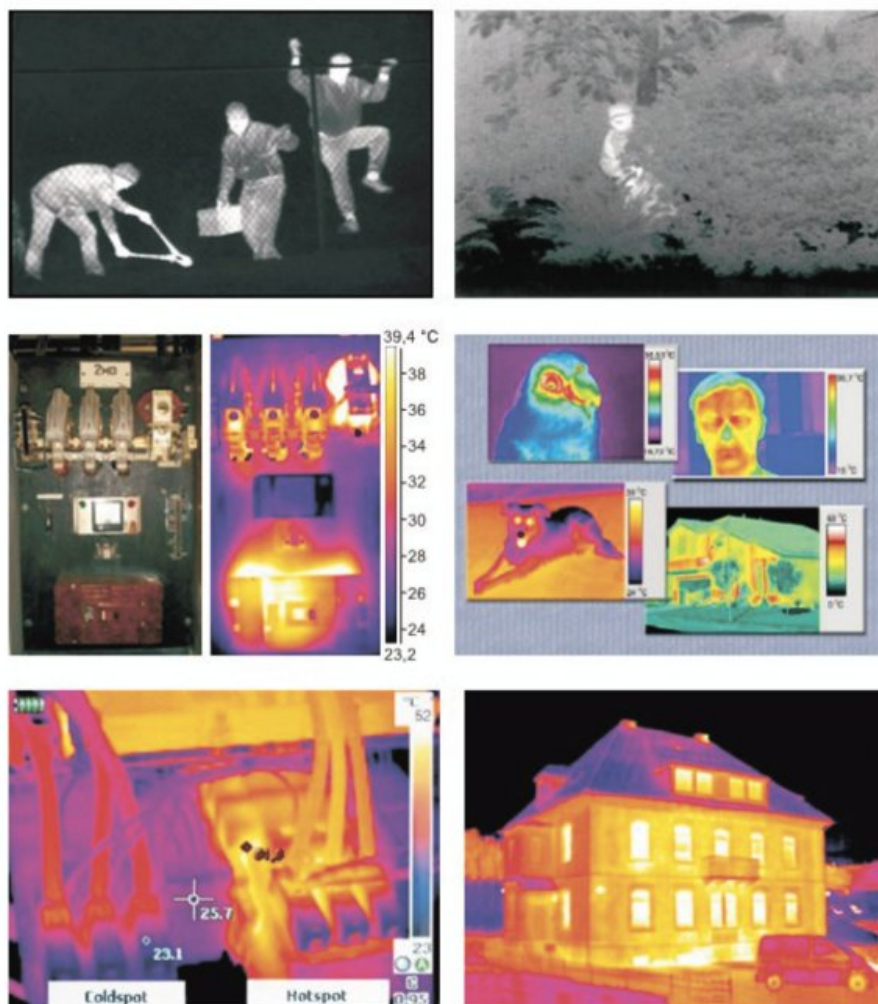


Рисунок 2.2 – Приклади теплових зображень

## 2.6 Закон Стефана-Больцмана

Закон Стефана–Больцмана (теплове випромінювання) має вигляд:

$$E = \sigma T^4. \quad (2.2)$$

Цей закон показує, яку потужність теплового випромінювання випускає об'єкт залежно від своєї температури. Використовується для побудови

тепловізійних зображень, де яскравість пікселя визначається температурою поверхні [1, 7, 8].

## 2.7 Види зображень у машинному зорі

Рентгенівське зображення дозволяє побачити внутрішню структуру об'єкта та виявити її дефекти, що неможливо зробити за допомогою видимого або інфрачервоного випромінювання. Рентгенівське випромінювання належить до високочастотної області спектра. Його фотони мають високу енергію, що дає змогу проходити крізь об'єкти, непрозорі в інших ділянках спектра.

Залежно від енергії фотонів рентгенівське випромінювання поділяють на «м'який» та «жорсткий» рентген. М'який рентген має нижчу енергію та краще поглинається неметалевими об'єктами. Він широко використовується в біомедицині, зокрема для проведення рентгенографії органів людини, а також у промисловості для контролю якості виготовлення пластикових виробів, наприклад багат шарових друкованих плат. Жорсткий рентген має вищу енергію, завдяки чому здатний проникати крізь метали. Це дозволяє застосовувати його для неруйнівного контролю якості металевих виробів, наприклад для перевірки зварних швів, корпусів або інших конструкцій.

Водночас через надзвичайно високу небезпеку для людини використання жорсткого рентгена потребує суворого дотримання заходів безпеки, включно з екрануванням, обмеженням доступу персоналу та дистанційним керуванням обладнанням. З огляду на це жорсткий рентген застосовується лише для контролю критично важливих виробів, які не можна перевірити іншими методами. У навчальному посібнику наведено приклади рентгенівських зображень, які демонструють можливість візуалізації внутрішньої структури та дефектів, недоступних для традиційних оптичних чи інфрачервоних засобів спостереження (рис. 2.3) [1, 9].

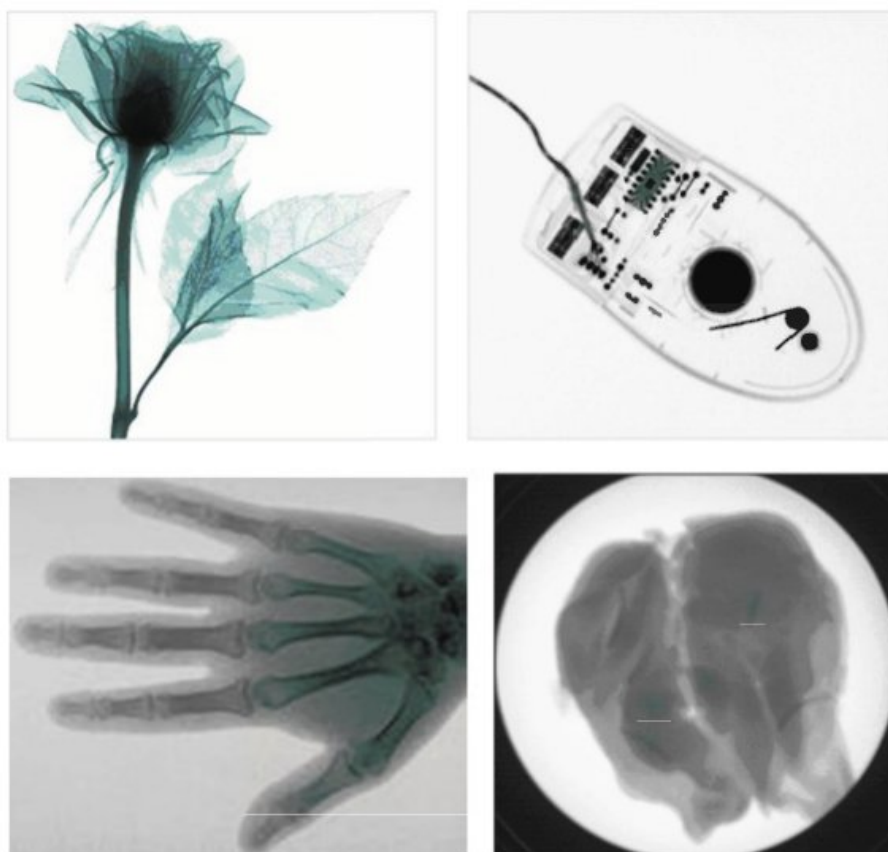


Рисунок 2.3 – Приклади рентгенівських зображень

Радіолокаційне зображення дозволяє спостерігати об'єкт за рахунок реєстрації радіохвиль, відбитих від його поверхні. У найпростішому випадку за допомогою радіолокації фіксується напрямок на об'єкт, затримка поширення радіосигналу, що дозволяє визначити відстань до об'єкта, а також інтенсивність відбитого сигналу, яка дає уявлення про матеріал та розміри об'єкта. У більш складних реалізаціях можна послідовно сканувати досліджуваний об'єкт і вимірювати характеристики кожної його точки, отримуючи таким чином радіолокаційний аналог растрового зображення. Більш того, сучасна техніка дозволяє формувати миттєвий радіолокаційний знімок об'єкта, який за виглядом значною мірою схожий на звичайне растрове зображення. На таких зображеннях можна оцінювати не лише форму та розміри об'єкта, а й розпізнавати тип матеріалу за відбиттям, структуру, а також динамічні характеристики — наприклад, напрямок і швидкість його руху (рис. 2.4).

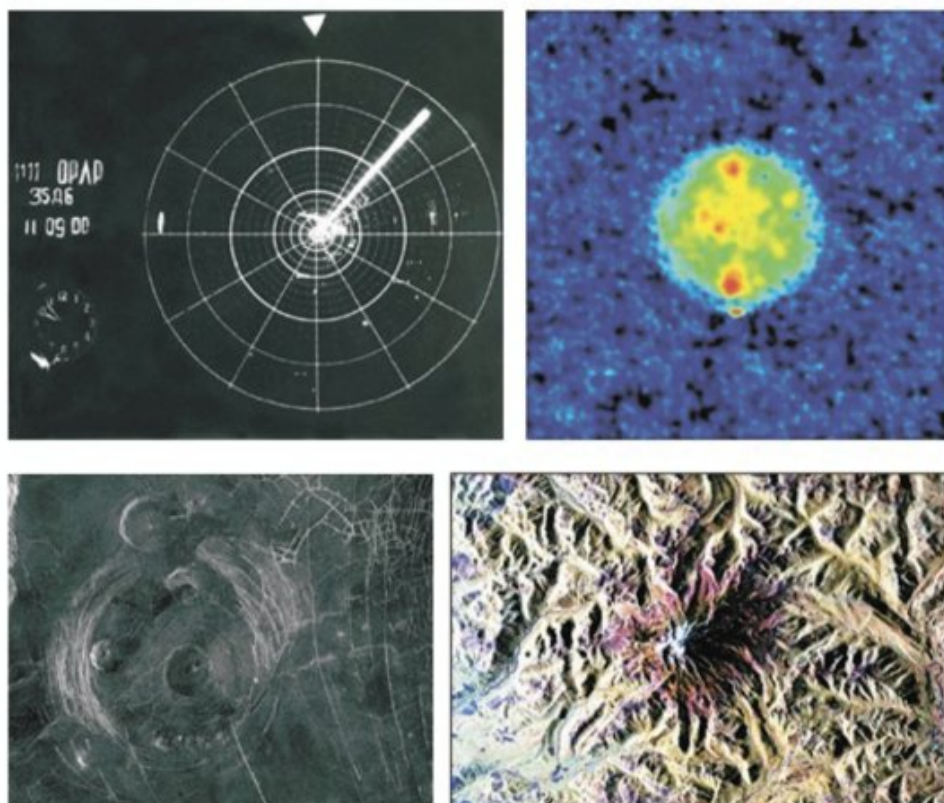


Рисунок 2.4 – Приклади радіолокаційних зображень

Дальнометричні зображення – це особливий тип зображень, де кожен піксель містить не просто інформацію про яскравість або колір, а реальні дані про відстань до конкретної точки об'єкта або сцени.

Фактично, це своєрідна цифрова тривимірна мапа, яка дозволяє відтворити просторову структуру об'єктів та ландшафтів. Основний принцип роботи таких систем полягає в тому, що вимірюється час, за який сигнал (наприклад, лазерний імпульс, ультразвукова хвиля або радіосигнал) долає відстань до об'єкта та повертається назад до приймача. Знаючи швидкість поширення сигналу в середовищі (наприклад, швидкість світла або звуку), можна точно розрахувати відстань до кожної точки.

Завдяки цій властивості дальнометричні зображення активно використовуються там, де потрібно знати не тільки, де об'єкт знаходиться на площині кадру, а й наскільки він близько чи далеко. Це вкрай корисно у військовій справі, навігації, керуванні БПЛА, робототехніці, безпілотних авто, промислових конвеєрах, а також в 3D-скануванні місцевості. Особливо це цінується при роботі

у складних погодних умовах або в повній темряві, де традиційні відеокамери стають малоефективними.

Для отримання таких зображень найчастіше використовують лазерні далекоміри (лідари), ультразвукові датчики (ехолокація), а в деяких випадках — радіолокаційні системи. Результатом є растрова карта, де замість кольору або яскравості кожного пікселя записується числове значення відстані до відповідної точки простору.

На цих зображеннях (рис. 2.5) добре видно, як формується сцена, де різні відстані закодовані різними рівнями яскравості або кольору, що дозволяє легко сприймати глибину та рельєф. Це дає змогу машинному зору не лише бачити об'єкти, а й аналізувати їх положення у просторі, будувати 3D-карти місцевості або внутрішніх приміщень і обирати оптимальні траєкторії руху.

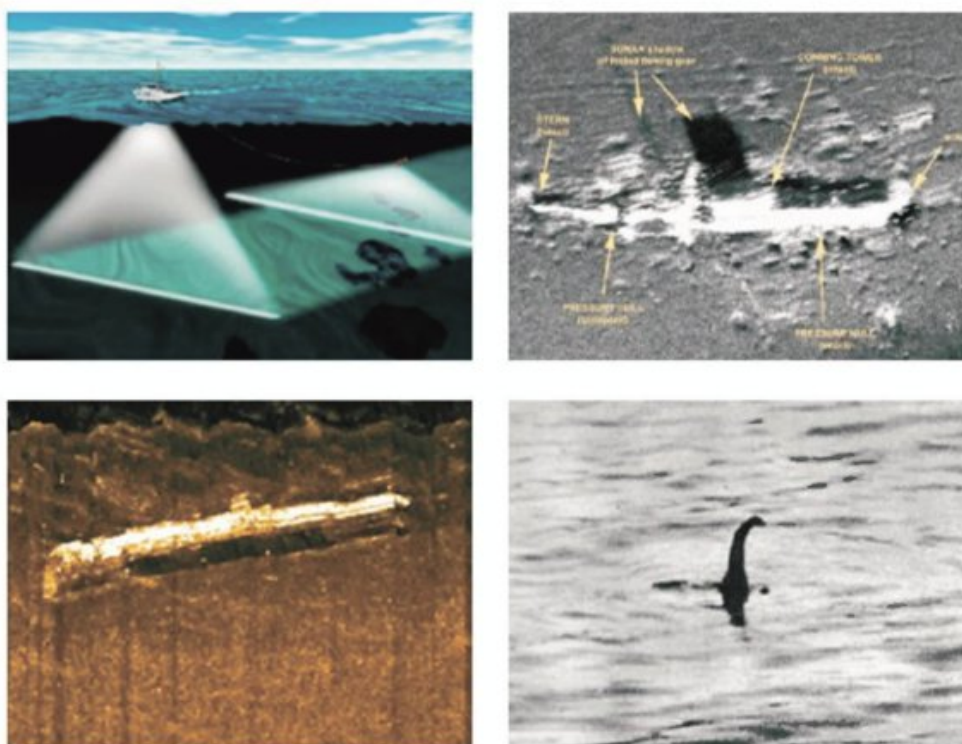


Рисунок 2.5 – Приклади далекомірних зображень

Основне рівняння фазової дальнометрії:

$$D = \left( N + \frac{\varphi}{2\pi} \right) \frac{\lambda}{2}. \quad (2.3)$$

Використовується для визначення відстані до об'єкта за допомогою вимірювання фази відбитого радіохвильового або лазерного сигналу. Формує основу роботи радіолокаційних систем та лазерних далекомірів у дальнометричних системах.

Окрім основних типів зображень, у спеціалізованих галузях використовуються також гравітаційні, ультрафіолетові та магнітні зображення. Хоча ці види мають обмежене поширення у загальних системах розпізнавання образів, вони відіграють важливу роль у спеціальних напрямках досліджень та спостережень

Гравітаційні зображення формуються на основі даних про зміни гравітаційного поля в різних точках простору. Такі зображення дозволяють виявляти аномалії, що виникають через неоднорідність щільності та маси об'єктів. Їх активно застосовують у геофізичних дослідженнях, супутниковій навігації, а також для створення гравітаційних карт місцевості (рис. 2.6).

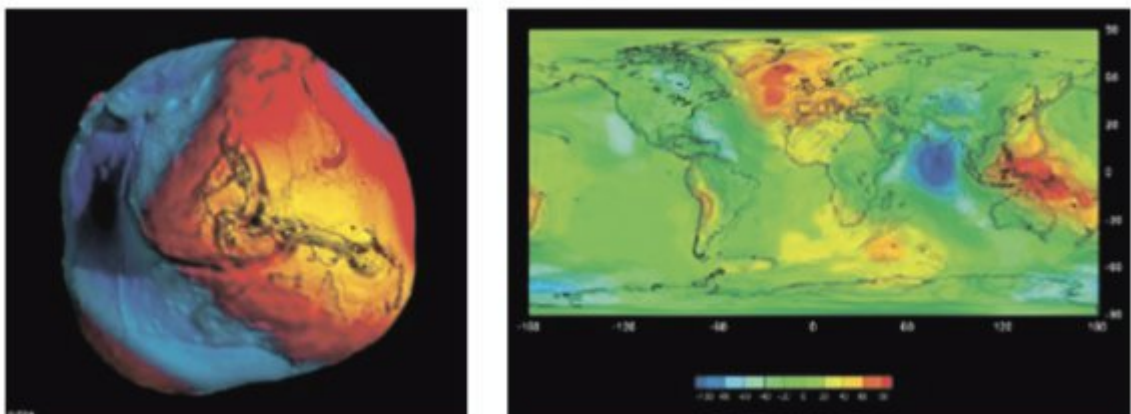


Рисунок 2.6 – Приклади гравітаційних зображень

Ультрафіолетові зображення створюються в області спектра, що лежить за межами видимого для людського ока. Вони дозволяють виявляти явища флуоресценції, коли певні речовини або матеріали випромінюють світло у відповідь на ультрафіолетове опромінення. Такі зображення використовуються в біологічних дослідженнях, криміналістиці, контролі якості покриттів, а також в астрономії — для спостереження за активними процесами на Сонці та інших зірках (рис. 2.7)

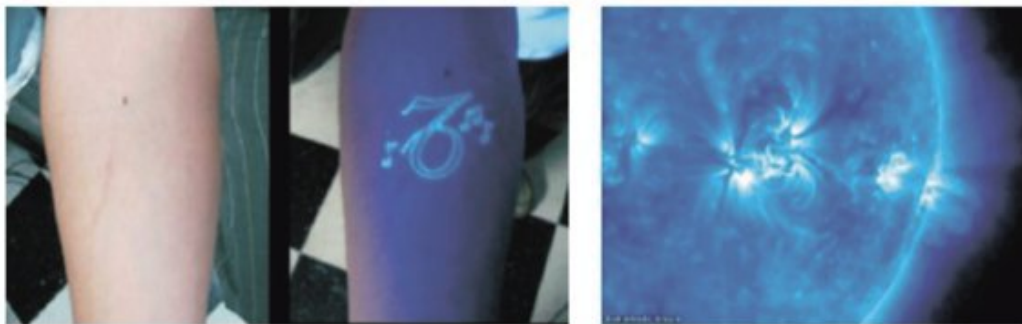


Рисунок 2.7 – Приклади ультрафіолетових зображень

Магнітні зображення побудовані на вимірюванні розподілу магнітного поля у просторі. Вони дозволяють виявляти магнітні аномалії, пов'язані з наявністю металевих об'єктів, рудних тіл або інших джерел магнітного поля. Такі зображення знаходять застосування в геології, супутникових системах моніторингу, а також у задачах пошуку прихованих об'єктів.

Ці три типи зображень займають вузькоспеціалізовану нішу та є важливими для галузей, де необхідно отримати інформацію про властивості об'єктів, недоступні для звичайного оптичного або теплового спостереження [1, 3].

## 2.8 Фільтер Вандер Люгта

Фільтри Вандер Люгта представляють собою важливий інструмент у когерентних оптичних системах розпізнавання образів. Їх основна перевага полягає у здатності точно відтворювати не тільки амплітуду, а й фазу передавальної функції оптичної системи. Це дозволяє значно підвищити ефективність узгодженої

фільтрації у порівнянні з традиційними амплітудно-фазовими пластинками, виготовленими методами вакуумного напилення або зміни товщини та густини матеріалу.

В основі методу Вандер Люгта лежить інтерференційний принцип синтезу фільтра. Для цього використовуються інтерферометри типу Релея, Маха-Цендера або інтерферометр, розроблений самим Вандер Люгтом. Під час запису фільтра у спектральній площині формується інтерференційна картина між опорним пучком та сигналом. Така картина записується на фотопластинку, внаслідок чого формується транспарант, який зберігає як амплітудну, так і фазову інформацію зображення.

Ці фільтри мають важливу перевагу: при виготовленні не потрібно виконувати складні математичні розрахунки для знаходження передавальної функції. Усі необхідні операції виконуються безпосередньо під час оптичного запису – процес стає значно простішим та точнішим. Крім того, такий підхід дозволяє створювати комплексну передавальну функцію (з одночасною амплітудною та фазовою модуляцією) тільки за допомогою амплітудного транспаранта. Це робить метод дуже практичним у застосуванні.

Синтезований фільтр Вандер Люгта розміщується у спектральній площині системи просторової фільтрації. Якщо, наприклад, виготовлений фільтр для розпізнавання прямокутної фігури, то під час обробки зображення транспарант із набором різних геометричних фігур встановлюється на вході системи. У вихідній площині зображення буде сформовано автокореляційну функцію для шуканого об'єкта (прямокутника) – у вигляді яскравої світної точки. Це забезпечує ефективне виявлення об'єкта серед фону або інших форм.

Важливо зазначити, що такий метод дозволяє створювати так звані бібліотеки узгоджених фільтрів. На одну фотопластинку можна записати кілька фільтрів для різних фігур чи зображень, що значно розширює можливості системи. Ємність таких бібліотек дуже велика, що дає змогу значно підвищити ефективність розпізнавання образів у реальному часі (рис 2.8) [4].

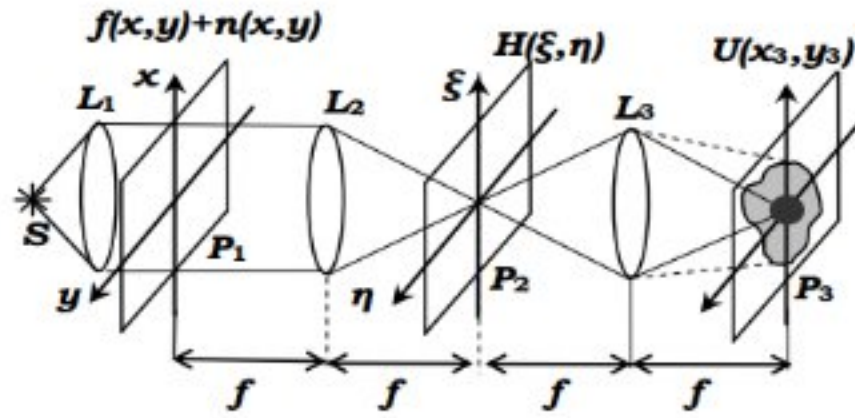


Рисунок 2.8 – Оптична система для здійснення когерентної узгодженої просторової фільтрації

### 3 МАТЕМАТИЧНІ ОСНОВИ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБРАЗІВ

#### 3.1 Постановка задачі класифікації зображень

Задача класифікації формулюється так: є деяке зображення об'єкта  $I$ , і набір можливих класів  $A$ ,  $B$ ,  $C$  тощо, до одного з яких цей об'єкт може належати. Необхідно визначити, до якого класу належить об'єкт.

У загальнішому випадку може бути ситуація, коли об'єкт не належить жодному з відомих класів. Це породжує другу задачу – ідентифікації (рис. 3.1) визначити, чи належить об'єкт до заданого класу  $A$ , чи ні. Складність такої задачі в тому, що кількість об'єктів, які не належать до класу  $A$ , практично нескінченна, що не дозволяє звести цю задачу до простої класифікації (рис. 3.2) [1, 2].



Рисунок 3.1 – Постановка задачі ідентифікації

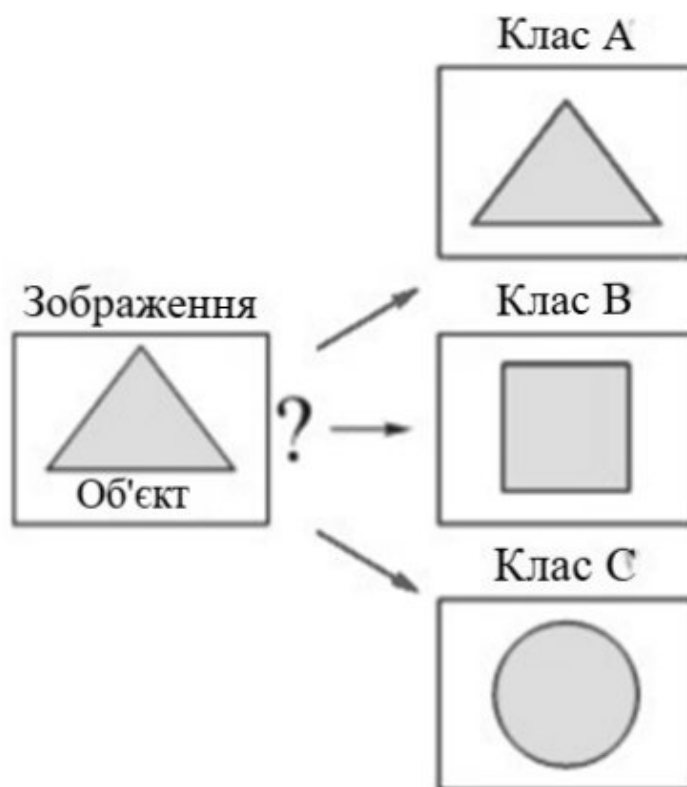


Рисунок 3.2 – Постановка задачі класифікації

### 3.2 Математична постановка задачі

Зображення об'єкта подається у вигляді вектора параметрів  $X = \langle X_1, X_2, \dots, X_n \rangle$ , наприклад, значеннями можуть бути яскравості пікселів або інші числові ознаки.

Кожен клас (А, В, С...) представляється у вигляді області в просторі параметрів  $X$ . Об'єкт  $I$  – це точка в цьому просторі. Задача класифікації зводиться до визначення того класу, до якого об'єкт  $I$  належить – тобто до області, в яку він потрапляє (рис. 3.3).

У задачі ідентифікації визначається, чи потрапляє точка в область, зайняту класом А, чи ні (рис. 3.4) [1, 2].

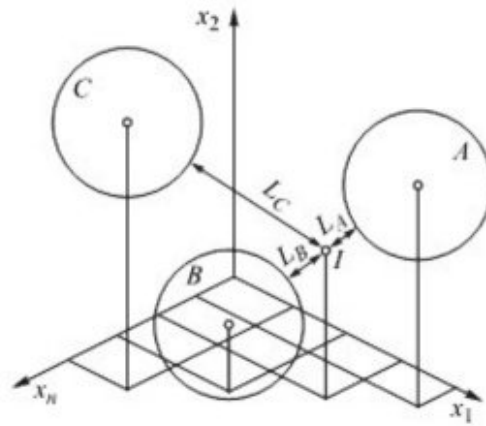


Рисунок 3.3 – Математична постановка задачі класифікації

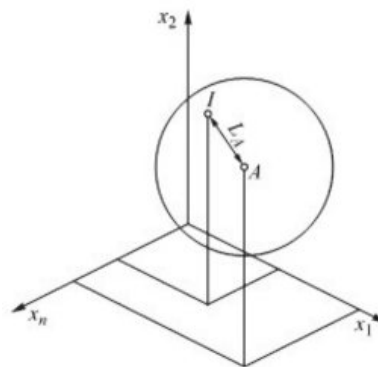


Рисунок 3.4 – Математична зупинка задачі ідентифікації

### 3.3 Основні компоненти постановки задачі

Щоб математично вирішити задачу класифікації, потрібно:

- 1) задати параметри класифікації  $X$ , за якими порівнюватимуться об'єкти;
- 2) визначити області класів у просторі параметрів;
- 3) встановити міру близькості або відстань  $L_i$  від об'єкта до кожного класу.

Об'єкт відносять до того класу, для якого ця відстань мінімальна [1, 2].

### 3.4 Спрощений приклад класифікації

Розглядається задача класифікації риби двох видів – «кілька» та «тюлька» за одним параметром  $x$  (наприклад, розміром).

Будується гістограма розподілу розмірів. Якщо параметр обрано вдало, отримаємо дві гауссові криві. Точка їх перетину — порогове значення  $L$ , що дозволяє віднести об'єкт до одного з класів (рис. 3.5) [1, 2].



Рисунок 3.5 – Принцип роботи одномірного класифікатора

### 3.5 Класифікація за двома параметрами

Якщо одного параметра недостатньо, додають другий. Наприклад, до розміру додають ширину. У просторі параметрів ( $X_1$  = довжина,  $X_2$  = ширина) об'єкти різних класів можуть розташовуватись у різних областях. Між ними будується розділяюча поверхня:

$$y = W_0 + W_1 X_1 + W_2 X_2,$$

де  $W_0, W_1, W_2$  — параметри.

Якщо  $y(X_1, X_2)$  — об'єкт належить до класу А, інакше — до В (рис. 3.6) [1, 2].

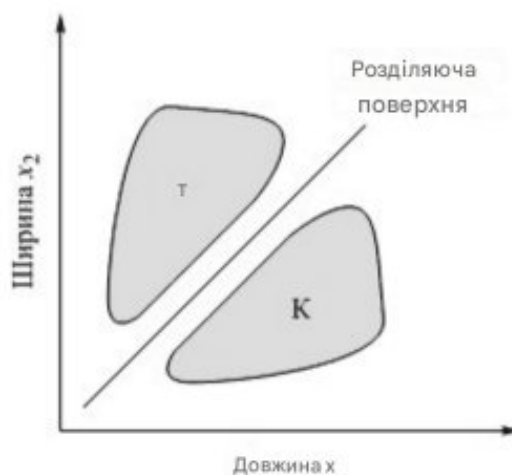


Рисунок 3.6 – Класифікація за двома параметрами

### 3.6 Завдання з прихованими параметрами

У деяких задачах істинні характеристики об'єкта недоступні для безпосереднього вимірювання. Наприклад, замість маси чи кількості лапок мухи ми вимірюємо лише координати її проєкції. У цьому випадку використовується поняття прихованих параметрів, які відновлюються опосередковано (рис. 3.7) [1, 2].

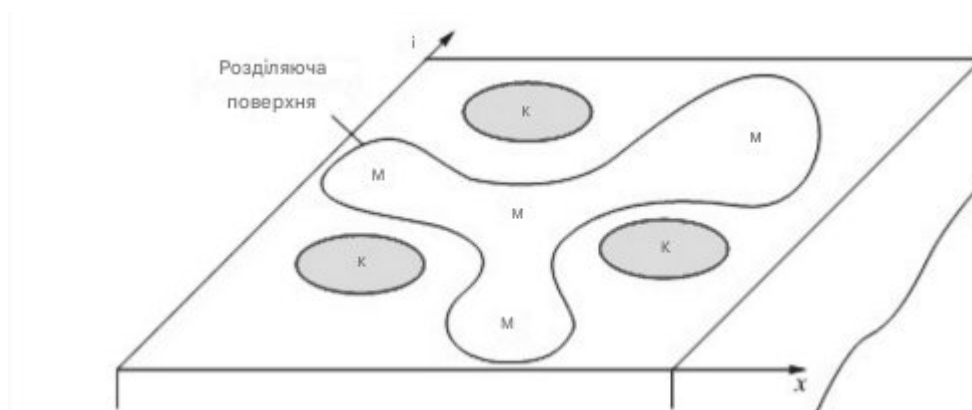


Рисунок 3.7 – Задача класифікації з прихованими параметрами

### 3.7 Міра близькості

Міра близькості – це такий числовий показник схожості двох об'єктів або фрагментів зображень. Вона визначає, наскільки близькими є об'єкт і зразок за

своїми ознаками, і є основою для ухвалення рішення в системах розпізнавання образів [1, 2].

Основні види мір близькості:

- сума модулів відхилень;
- сума квадратів відхилень;
- кореляційна функція;
- сумарна площа перекриття;
- число співпадаючих ключових точок;
- взважені та нормовані міри близькості.

### 3.8 Кореляційна міра

Кореляційна функція обчислюється за формулою:

$$R_{IS}(\Delta x, \Delta y) = \sum_{x,y} I(x + \Delta x, y + \Delta y) \cdot S(x, y). \quad (3.1)$$

Це дозволяє знайти зсув, при якому фрагмент зображення максимально подібний до зразка (рис. 3.8) [1, 4].

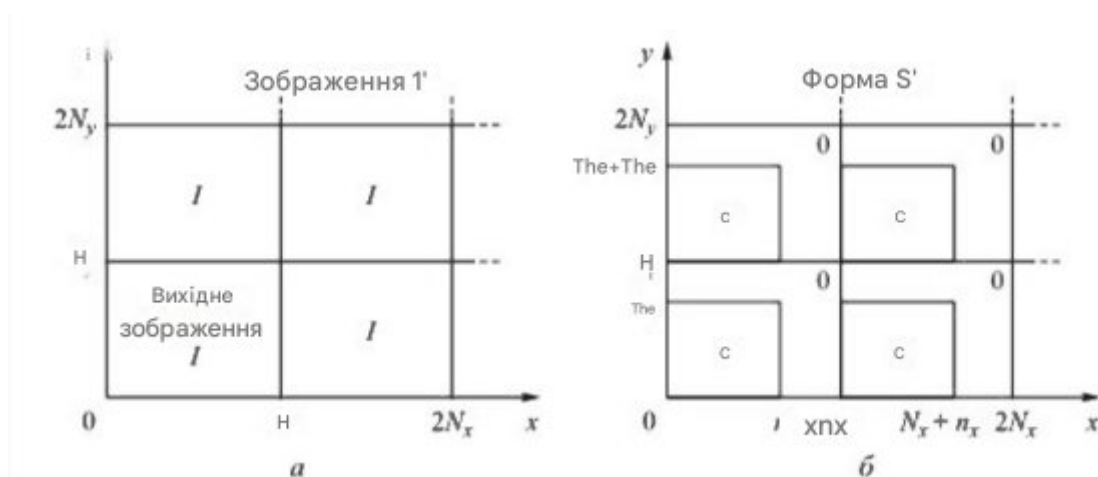


Рисунок 3.8 – Подання зображення (а) та зразка (б) у вигляді двох періодичних функцій з періодами  $N_x$  та  $N_y$

### 3.9 Зважені міри близькості

У практиці різні пікселі або ознаки можуть мати різну важливість. Тому вводять вагові коефіцієнти:

$$E'(\Delta x, \Delta y) = \sum_{x,y} W(x,y) \cdot (I(x + \Delta x, y + \Delta y) - S(x,y))^2, \quad (3.2)$$

де  $W(x,y)$  – вага конкретної точки [1, 4].

## 4 АЛГОРИТМИ РОЗПІЗНАВАННЯ У СИСТЕМАХ МАШИННОГО ЗОРУ

### 4.1 Контурний аналіз

#### 4.1.1 Бінаризація та морфологічні алгоритми

У системах розпізнавання образів надзвичайно важливо отримати чітке, структуроване зображення об'єкта, придатне до подальшої обробки. Одним із початкових кроків на цьому шляху є бінаризація зображення, яка полягає в перетворенні багатотонального або кольорового зображення у двійковий формат. Тобто кожному пікселю зображення призначається значення «1» (об'єкт) або «0» (фон).

Перейдемо до Бінаризації, вона базується на розмежуванні пікселів за певною характеристикою – найчастіше за яскравістю або кольором. У простому випадку всі точки, яскравість яких перевищує заданий поріг, вважаються точками об'єкта, а інші – точками фону. Поріг може бути статичним або динамічним. Прикладом динамічної бінаризації є методи, що використовують середню яскравість або гістограму значень.

Крім яскравості, у задачах бінаризації також може використовуватись колір – наприклад, застосування ключового фону (зелений чи синій) дозволяє легко виділити об'єкт за допомогою маски [6].

#### 4.1.2 Морфологічна обробка зображень

Після бінаризації виникає потреба у фільтрації шумів та уточненні структури об'єкта. Для цього використовують морфологічні операції, які працюють над формою об'єкта на зображенні. Основні серед них – ерозія, дилатація, відкриття, закриття, а також виділення контурів.

Морфологічні фільтри виконуються шляхом аналізу околу кожного пікселя (як правило, вісім сусідніх точок) і прийняття рішення на основі кількості «сусідів» тієї ж розмітки.

Фільтрація шуму типу «сіль і перець». Типовим шумом у бінаризованих зображеннях є поодинокі пікселі, що відрізняються від навколишніх. Якщо піксель

має розмітку «1» і всі його сусіди – «0», його можна вважати помилковим. Аналогічно визначаються точки шуму типу «перець» (рис. 4.1) [1, 6].

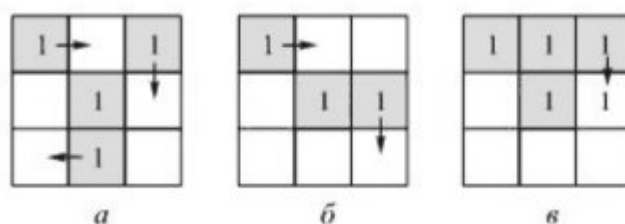


Рисунок 4.1 – Виділення точок зв'язності об'єкта

#### 4.1.3 Виділення контурів

У рамках морфології поняття границі й контури мають чітке визначення. Границя – це набір точок об'єкта, що межують з фоном. Контур – це зв'язна крива, яка поєднує ці точки. Виділення границь реалізується шляхом обчислення суми значень у 8-околі кожної точки. Якщо точка має розмітку «1» і оточена менше ніж 8 сусідами тієї ж розмітки – вона вважається контурною.

Такі фільтри дозволяють будувати замкнені контури без розривів. У вдосконаленому варіанті алгоритм потребує наявності щонайменше двох сусідів протилежного класу, що робить його менш чутливим до шуму та забезпечує більш згладжений контур [6].

#### 4.1.4 Скелетизація та карта відстаней

Однією з форм морфологічної обробки є скелетизація – зведення об'єкта до лінії, яка проходить по його «осі симетрії». Це досягається за допомогою алгоритму видалення краєвих точок, що не є точками зв'язності, тобто їх видалення не розділяє об'єкт на частини. Для виконання скелетизації використовуються карти відстаней – спеціальні матриці, де значення кожної точки вказує на відстань до найближчої границі. Такі карти дозволяють виконувати дилатацію, ерозію, побудову зон, а також оцінку внутрішньої структури об'єкта.

#### 4.1.5 Розмітка та підрахунок об'єктів

Ще одним важливим завданням є розмітка об'єктів – процес, у ході якого кожному об'єкту на зображенні присвоюється унікальний індекс. Це дозволяє здійснювати ідентифікацію, підрахунок, вимірювання площі, периметра, компактності тощо. Для цього застосовуються алгоритми, схожі на заливку — по всій області об'єкта поширюється маркер (ідентифікатор).

Також можлива розмітка отворів усередині об'єктів: спочатку виконується інверсія зображення, а потім повторно запускається алгоритм розмітки вже по інверсованій структурі. [1, 6].

#### 4.2 Методи зіставлення зображень

Зіставлення зображень – одна з ключових задач у системах розпізнавання, що забезпечує виявлення відповідностей між об'єктом, присутнім у сцені, і еталонним зображенням або зразком. У загальному випадку йдеться про необхідність знайти таке положення фрагмента зображення, яке найбільш точно відповідає заданому зразку – як за формою, так і за розташуванням, яскравістю, масштабом та іншими ознаками.

Цей процес починається з формалізації функціональної залежності, що описує відхилення між зразком і ділянкою зображення. Таку відмінність можна подати у вигляді функції якості – наприклад, норми різниці яскравостей відповідних точок. Найбільш популярним критерієм є середньоквадратична помилка, що відображає сумарне відхилення пікселів фрагмента зображення від відповідних пікселів зразка. Якщо функція якості досягає мінімуму – значить, співпадіння вважається найкращим.

Одним із способів підвищення точності є застосування мір близькості, які враховують вагу кожного пікселя зразка. Це особливо актуально, якщо деякі області є більш інформативними, ніж інші. У такому випадку використовують взважені функції, які збільшують внесок значущих точок і зменшують вплив

шумових. Для пришвидшення обчислень функції близькості часто реалізуються у частотній області з використанням перетворень Фур'є.

Для скорочення обчислювальних витрат використовуються різні стратегії оптимізації. Однією з найпростіших, але малоефективних є повний перебір усіх можливих положень зразка на зображенні. Більш ефективні стратегії базуються на зменшенні простору пошуку шляхом використання інформації про градієнт, напрямок або інші попередні знання про сцену. Наприклад, заздалегідь відомо, що певні типи об'єктів з'являються в заданих регіонах сцени, що дозволяє обмежити область зіставлення.

### 4.3 Алгоритми розпізнавання у системах машинного зору

У теорії розпізнавання алгоритми відіграють вирішальну роль – саме вони реалізують логіку обробки зображень і прийняття рішень щодо класифікації об'єктів. Основна мета алгоритму – зіставити вхідні дані з певною множиною еталонів або правил і на основі аналізу прийняти рішення про належність об'єкта до певного класу. Різноманіття задач, що виникають у процесі обробки візуальної інформації, зумовлює велику кількість підходів та алгоритмічних стратегій.

У загальному випадку розв'язання задачі розпізнавання зображень складається з кількох послідовних етапів: отримання зображення, його попередньої обробки, фільтрації, виділення ознак, аналізу та ухвалення рішення. Ці етапи можуть виконуватися як лінійно, так і в адаптивному порядку, залежно від отриманих даних. Наприклад, результати розпізнавання можуть впливати на попередню обробку зображення, ініціюючи повторну корекцію або уточнення.

Простий приклад алгоритму – це метод повного перебору. Він реалізується шляхом прикладання зразка до зображення у всіх можливих положеннях і підрахунку кількості співпадінь. Якщо співпали всі точки зразка з відповідними точками зображення, робиться висновок, що об'єкт знайдено. Хоч такий підхід і є обчислювально затратним, він показує фундаментальні принципи побудови алгоритмів розпізнавання: необхідність визначення критерію співпадіння, локалізації зразка і порогових значень.

Серед поширених алгоритмів класифікації виділяються:

- лінійні класифікатори, що розділяють простір ознак гіперплощиною;
- кусочно-лінійні класифікатори, які поєднують кілька простих правил (умов) за логікою «І» або «АБО»;
- каскадні класифікатори, що послідовно фільтрують негативні приклади на ранніх етапах, знижуючи навантаження на наступні;
- мережі персептронів – багаторівневі штучні нейронні мережі, які дозволяють будувати складні нелінійні розділення;
- методи кластеризації, наприклад метод k-середніх, які використовуються для розбиття складного класу на простіші підкласи.

У частині алгоритмів часто застосовується перехід у нову базу ознак, наприклад, метод головних компонент (РСА). Тут вихідні вектори проєктуються у нову систему координат, побудовану на власних векторах коваріаційної матриці. Це дозволяє зменшити розмірність задачі і зосередитися на найбільш інформативних ознаках.

Таким чином, побудова ефективного алгоритму розпізнавання – це завжди компроміс між точністю, швидкістю, стійкістю до шумів і узагальнювальною здатністю. Вибір конкретного підходу визначається особливостями об'єктів, умовами отримання зображень та вимогами до системи загалом (рис. 4.2) [1, 7].

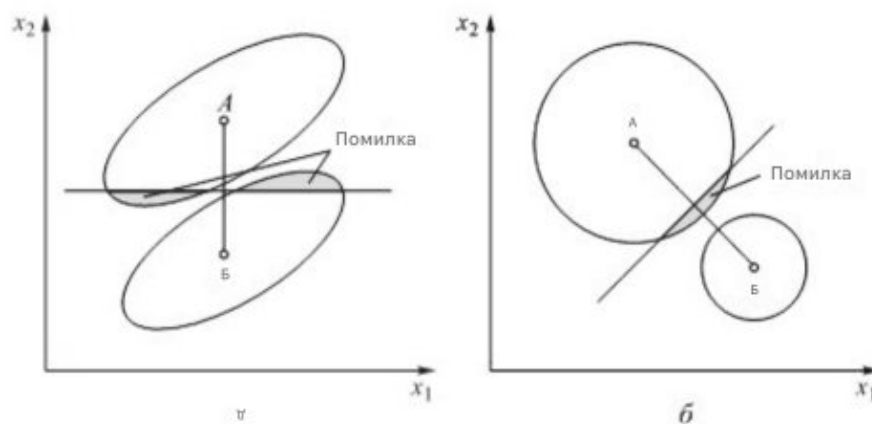


Рисунок 4.2 – Випадки, для яких найпростіший класифікатор працює некоректно

#### 4.4 Передобробка зображень у системах розпізнавання

Передобробка зображення є критично важливим етапом у побудові систем машинного зору та розпізнавання образів. У більшості випадків зображення, отримане від камери або сенсора, не є достатньо якісним або зручним для прямого аналізу. Тому перед початком основної обробки необхідно привести його до стандартного вигляду, зменшити вплив шумів, компенсувати зовнішні впливи (ракурс, освітлення, зашумлення), а також підвищити контрастність і яскравість [1, 7].

##### 4.4.1 Корекція умов видимості

Зображення можуть бути зроблені в різних умовах освітлення – при природному чи штучному світлі, у тіні, при зустрічному світлі, з відблисками тощо. Якщо ці умови відомі заздалегідь або контролюються, то можна коригувати результат через автоматичну нормалізацію яскравості та контрастності. Наприклад, виконується зсув гістограми яскравості або її розтягнення, щоб рівномірно розподілити яскравості по всьому діапазону – від найтемніших до найяскравіших [7].

##### 4.4.2 Геометрична корекція

У багатьох випадках камера або об'єктив спотворюють геометрію сцени. Це можуть бути викривлення ракурсу, нахили, обертання, масштабування або перспективні деформації. Для корекції викривлень застосовуються методи геометричних перетворень, зокрема:

- обертання координатної сітки;
- масштабування та зміна положення (трансляція);
- вирівнювання за ключовими точками або маркерами.

Коли через геометричні перетворення деякі пікселі втрачають значення (випадають з координатної сітки), вони можуть бути або відкинуті, або апроксимовані за сусідніми точками [7].

#### 4.4.3 Фільтрація шумів

Зображення часто містить різні типи шумів: стохастичний (випадковий) шум, структурні спотворення, відблиски, пил, артефакти компресії тощо. Для їх усунення застосовують медіанні та сверточні фільтри.

Медіанний фільтр працює за принципом порівняння яскравості точки з її сусідами. Якщо значення точки суттєво відрізняється – вона вважається шумовою і замінюється на медіану значень сусідніх точок. Такий фільтр ефективний проти імпульсного шуму типу «сіль-перець», але має обмеження при обробці кутів або дрібних деталей.

Окремо розглядається детектор кутів на основі медіанного фільтра. Використання різниці між оригінальним і відфільтрованим зображенням дозволяє знайти точки з різкою зміною напрямку контуру — кути. Це особливо корисно для побудови структурних описів об'єктів [6, 7].

## 5 МАШИННИЙ ЗІР У ВІЙСЬКОВІЙ СПРАВІ

### 5.1 Створення карти місцевості на основі лазерного 3D скана

Принцип роботи лазерного 3D скана полягає у випромінюванні мільйонів імпульсів світла, кожен з яких спрямовується на поверхню місцевості або об'єкта. Коли цей лазерний імпульс досягає цілі, частина енергії повертається до сенсора. Оскільки швидкість світла стала, за часом, що пройшов між випромінюванням і прийняттям сигналу, можна дуже точно обчислити відстань до об'єкта за формулою: відстань дорівнює половині добутку часу та швидкості світла. Такі обчислення відбуваються тисячі разів за секунду, формуючи мільйони тривимірних точок у просторі, що називається «хмарою точок». Це хмара відображає рельєф місцевості та форму будь-яких об'єктів з високою точністю, аж до кількох сантиметрів.

Додатково для точної просторової прив'язки використовується комбінація GPS/ GNSS-навігації та інерційних датчиків (IMU). Вони дозволяють не лише знати абсолютні координати кожної точки, а й коректно визначати нахил та орієнтацію платформи (літак, дрон або автомобіль), що забезпечує узгодженість усіх даних у тривимірному просторі. Це дає змогу отримувати 3D-моделі, які реалістично відображають не тільки форму рельєфу, а й будівлі, мости, лісові масиви та інші об'єкти.

Завдяки цим властивостям лазерний 3D скан має низку переваг: виняткову точність (похибка вимірювання часто складає лише кілька сантиметрів), здатність швидко покривати великі площі та незалежність від погодних умов чи освітлення. Технологія також здатна розрізняти різні матеріали поверхні – завдяки аналізу відбитого сигналу можна відрізняти, наприклад, рослинність від твердих конструкцій.

У підсумку лазерний 3D скан є основою для створення детальних тривимірних карт, які знаходять застосування в різних сферах: від топографії та будівництва до військової навігації та розвідки.

Тепер перейдемо до суті, як ми всі знаємо, лазерне 3D-сканування це технологія, заснована на вимірюванні часу, необхідного лазерному імпульсу, щоб

подолати шлях до об'єкта та назад. Лідар випромінює короткий лазерний імпульс у напрямку поверхні. Коли цей імпульс відбивається від об'єктів (землі, будівель, рослинності), сенсор приймає його назад. Оскільки швидкість світла відома і фіксована, час затримки між відправкою та отриманням імпульсу дозволяє точно обчислити відстань до об'єкта.

Кожен такий вимірний імпульс дає одну тривимірну точку у просторі. Лідар виконує тисячі або навіть мільйони таких вимірювань за секунду, охоплюючи всю видиму територію. У результаті формується так зване хмарне скупчення точок – цифровий набір координат  $(x, y, z)$ , що відповідають формі та рельєфу місцевості.

Ці точки потім обробляються за допомогою програмного забезпечення: точки, що знаходяться поруч і відповідають одним і тим самим об'єктам (наприклад, даху будинку чи схилу пагорба), об'єднуються. Створюється цифрова модель місцевості (Digital Terrain Model) – 3D-представлення реального світу, яке точно відображає всі форми рельєфу: підвищення, зниження, будівлі, мости, дороги та навіть рослинність.

Далі такі цифрові 3D-карти можуть доповнюватися фотографічними або супутниковими даними (наприклад, від супутників Махаг). Це дозволяє створити інформативну картографічну основу, у якій поєднуються не тільки геометрія місцевості (рельєф), а й її візуальний вигляд (фототекстури).

Таким чином, процес створення карти місцевості на основі лазерного 3D-сканування – це багатоступенева процедура (рис. 5.1) [9, 10]:

- 1) лазер сканує місцевість лазерними імпульсами;
- 2) відбиті сигнали вимірюються та перетворюються на мільйони 3D-точок;
- 3) хмара точок обробляється та класифікується, формуючи цифрову модель;
- 4) цифрова 3D-карта використовується для навігації, аналізу та автономних операцій.

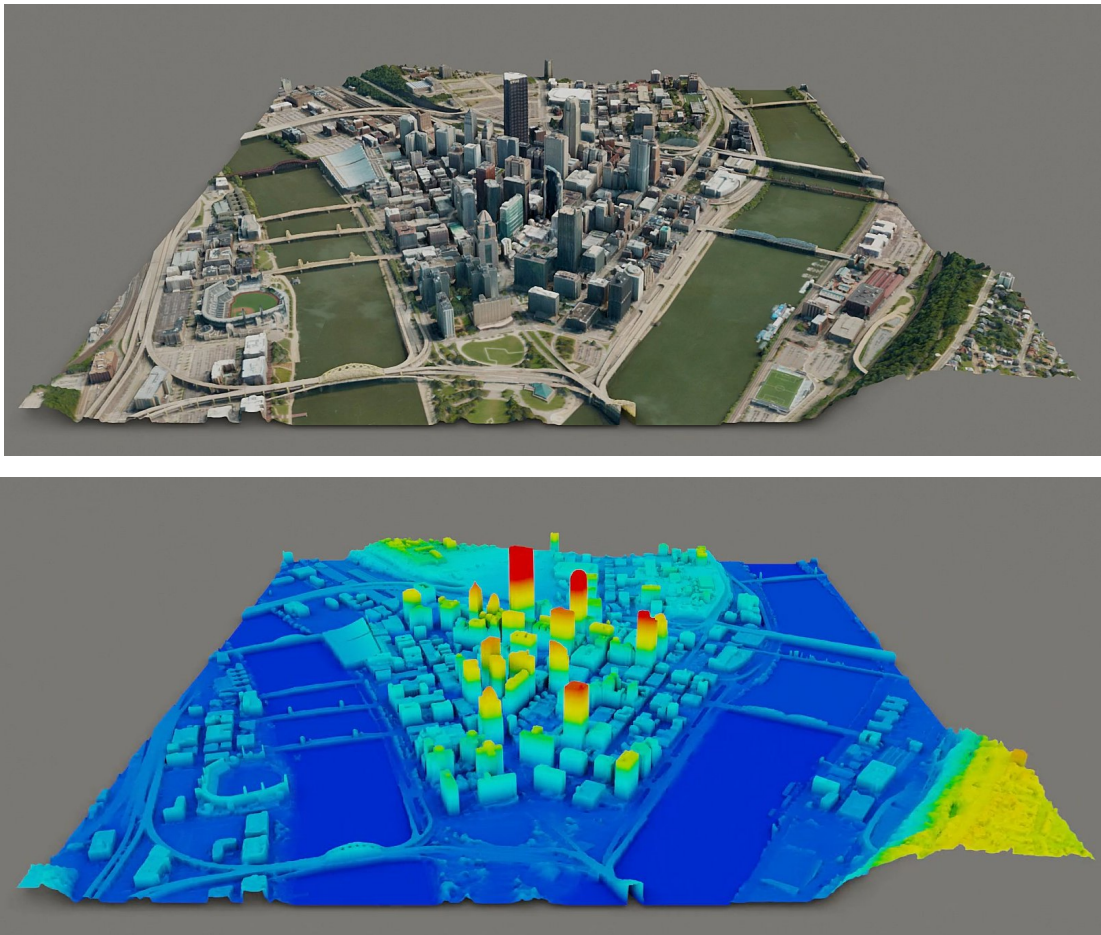


Рисунок 5.1 – Карта місцевості на основі лазерного 3D скана

## 5.2 Сучасні тенденції автономного машинного зору

Компанія Махаг займає провідне місце серед світових постачальників геопросторових рішень і високоточних супутникових знімків. Однією з ключових компетенцій компанії є створення тривимірних карт місцевості з використанням технологій лазерного 3D-сканування (лідара) та супутникових даних. Махаг об'єднує різноманітні джерела даних, щоб отримати комплексні цифрові карти, які значно перевершують за інформативністю традиційні зображення.

У процесі формування карти місцевості Махаг використовує власні супутникові дані та дані, отримані з лідарів – сенсорів, встановлених на безпілотних літальних апаратах або наземних платформах. Завдяки цьому компанія створює детальні 3D-моделі рельєфу, що включають не лише геометрію, а й текстуровані зображення з високою роздільною здатністю.

Особливість підходу Махаг полягає у тому, що вона інтегрує лазерні дані з потужною супутниковою аналітикою. Це дозволяє отримати карти з неймовірною точністю та деталізацією: рельєф, будівлі, лісові масиви та інші об'єкти відображаються з мінімальними похибками. Такі карти є надзвичайно корисними для розв'язання складних завдань у сфері військової справи, управління надзвичайними ситуаціями, міського планування та інших критичних галузей.

У військовій сфері, зокрема, ці карти стають основою для автономної навігації безпілотних літальних апаратів і наземної техніки. Завдяки використанню 3D-карт Махаг, автономні платформи отримують можливість «бачити» навколишню місцевість у реалістичному вигляді – з точними вимірами висот, об'ємів та інших параметрів. Це важливо для точного прокладання маршрутів, виявлення перешкод та планування бойових операцій.

Ще однією важливою перевагою рішень Махаг є те, що для роботи з такими 3D-картами не потрібен GPS. Лідарні скани та супутникові дані дозволяють отримати точне просторове уявлення навіть у випадках, коли сигнали GPS заглушуються або відсутні. Це робить такі технології ключовими для забезпечення незалежної навігації та автономності у бойових умовах або під час виконання інших відповідальних місій.

Махаг відіграє ключову роль у створенні детальних тривимірних карт місцевості для різних секторальних застосувань, включно з військовими операціями. Компанія є головним підрядником програми One World Terrain (OWT) для армії США, в рамках якої вона постачає високоточні 3D-моделі Землі з роздільною здатністю до 3 м по всіх осях. Такі карти використовуються для тренувань військових, відпрацювання сценаріїв і реального планування операцій.

Махаг також розробляє Precision3D Data Suite – набір продуктів, включаючи цифрові моделі поверхні й рельєфу з фототекстурами. Точність таких моделей досягає півметра і не потребує наземних опорних точок – що значно спрощує процес збору даних. Ці карти особливо цінні для військових, оскільки дозволяють автономним системам аналізувати й використовувати рельєф у місцях у реальному часі.

У співпраці з Saab та іншими оборонними партнерами Махаг представляє Raptor – програмне забезпечення, що дозволяє автономним дронам визначати своє положення на основі порівняння відеопотоку з 3D-картами місцевості. Воно забезпечує точність до 3 м навіть без GPS. Співпраця зі Saab спрямована на створення автономних систем керування, стійких до GPS-приглушення

Махаг активно підтримує оборонні потреби, надаючи дані та інструменти для глобальних військових програм. Зокрема, її продукція охоплює – від супутникових знімків високої роздільності, що створюють візуальні базисні карти, до LiDAR-даних, що формують геометричні моделі з високою точністю; від націлюваних карт для управління безпілотниками до аналітичних платформ для командних центрів.

Таким чином, Махаг забезпечує військові сили критично важливою картографічною і навігаційною підтримкою. Її рішення дозволяють дронам і наземній техніці діяти автономно, навіть у умовах, де GPS недоступний або під прицілом глушіння, що підвищує ефективність, безпеку та тактичну гнучкість сучасних збройних систем [9].

### 5.3 Технології активного машинного зору

Для оцінки максимальної дистанції, на якій лазерний далекомір (лідар) може точно фіксувати об'єкт, використовують базову формулу дальності, основу якої складає так звана „лідарна формула” (Lidar Range Equation). Вона описує, як різні параметри впливають на силу прийнятого сигналу. У спрощеному вигляді вона записується так:

$$P(R) = \frac{P_t \cdot A_r \cdot \beta \cdot T^2(R)}{R^2} \quad (5.1)$$

де  $P(R)$  – потужність сигналу, що надходить на сенсор з дистанції  $R$ ;

$P_t$  – потужність випромінювання лазера;

$A_r$  – площа приймальної апертури;

$\beta$  – коефіцієнт зворотного розсіювання об'єкта;

$T(R) = \exp(-\alpha R)$  – коефіцієнт затухання у атмосфері, де  $\alpha$  – коефіцієнт екстинкції, що залежить від умов погоди .

Дальність ефективної роботи лазерного далекоміра істотно залежить не лише від потужності випромінювання, а й від стану атмосфери. Погодні умови, такі як туман, дощ, імла або пил, викликають поглинання та розсіювання лазерних імпульсів у повітрі, що призводить до зменшення енергії відбитого сигналу. Основний фізичний процес описується законом Бера-Ламберта, який визначає, що інтенсивність світлового променя зменшується експоненційно із збільшенням відстані. Це виражається формулою :

$$I(l) = I_0 e^{-\alpha l} . \quad (5.2)$$

Коефіцієнт  $\sigma$  суттєво залежить від типу погодних умов. Наприклад, у сухому повітрі він становить близько  $0,01 \text{ км}^{-1}$ , тоді як у тумані або дощі може досягати від  $10 \text{ км}^{-1}$  до  $60 \text{ км}^{-1}$  і більше. Згідно з дослідженнями NASA, при помірному тумані значення коефіцієнта загасання досягає  $6,2 \text{ км}^{-1}$ , а у випадку сильного туману, за умов видимості менш ніж 50 м, коефіцієнт загасання сягає  $62,6 \text{ км}^{-1}$ , що практично виключає ефективну роботу лідара на великих відстанях

Практично це означає, що при високому значенні  $\sigma$  сигнал, що відбивається від об'єкта, дуже швидко згасає, і приймач не може його розпізнати. Наприклад, якщо у суху погоду літар може вимірювати об'єкти на відстані до 1 км, то в умовах щільного туману цей показник може зменшитися до кількох десятків метрів. У дощових умовах вплив не настільки драматичний, однак у випадках зливи (10 мм/год) дальність може знизитись на від 5 % до 10 % на перших 100–200 метрах.

Отже, вплив погодних факторів на дальність роботи лазерного далекоміра не можна ігнорувати. Особливо важливо враховувати ці параметри при плануванні військових або інженерних операцій, де точність та надійність системи відіграють ключову роль. Зменшення дальності можна частково компенсувати збільшенням потужності лазера або площі апертури приймача, однак такі рішення мають свої

технічні та енергетичні обмеження. Тому під час використання лазерних систем важливо адаптувати параметри до реального середовища, враховуючи погодні умови на місці застосування (рис. (5.2, 5.3)) [8, 11].

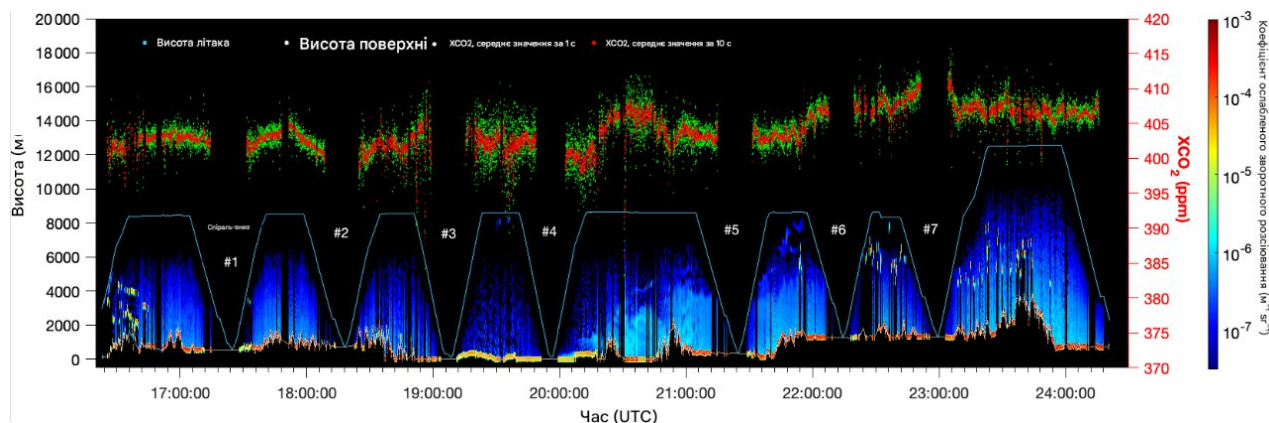


Рисунок 5.2 –Залежність затухання лазерного променя від довжини хвилі в умовах дощу та туману

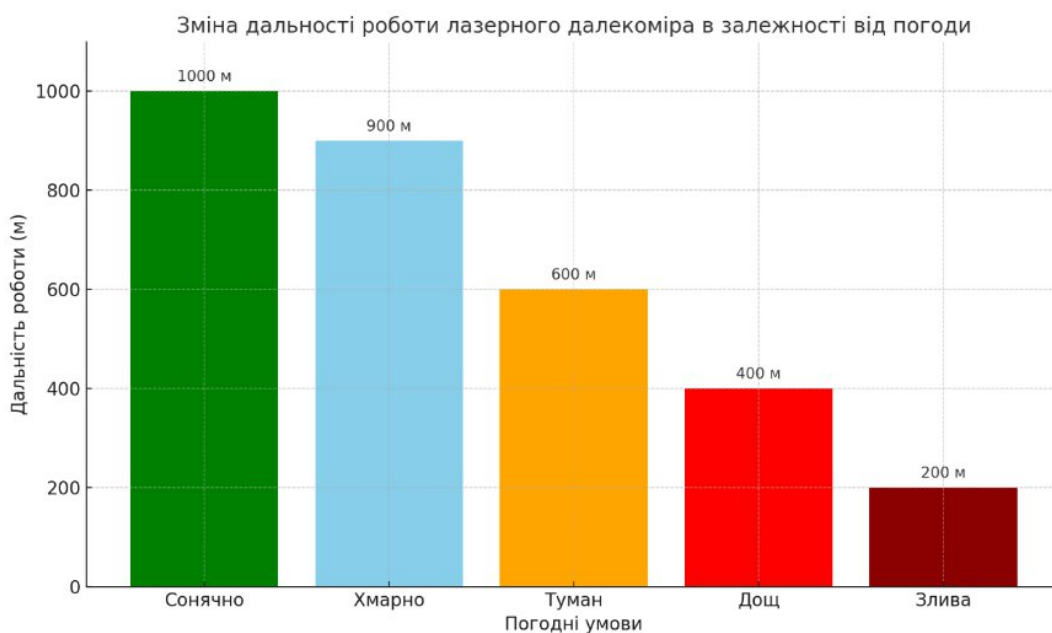


Рисунок 5.3 – Графік зміни дальності роботи лазерного далекоміра в залежності від погодних умов

## 5.4 Автономна навігація без GPS

У сучасних бойових умовах застосування автономних безпілотних систем суттєво ускладнюється через наявність засобів радіоелектронної боротьби, які глушать або спотворюють сигнали супутникової навігації (GPS/GNSS). У відповідь на ці виклики компанія Maxar Intelligence розробила унікальну технологію Raptor – програмне забезпечення, що забезпечує автономну навігацію без використання GPS, використовуючи виключно відеозображення з камери дрона та високоточну тривимірну карту місцевості.

Система Raptor поєднує візуальні дані з камери безпілотного літального апарата з глобальними 3D-топографічними моделями Maxar, які охоплюють понад 90 мільйонів квадратних кілометрів поверхні Землі. Завдяки цьому безпілотник може точно визначати своє місцезнаходження, навіть у повній відсутності GPS-сигналу. Технологія дозволяє орієнтуватися за особливостями рельєфу – горами, будівлями, ландшафтами, шляхом зіставлення відеопотоку з цифровою картою.

Важливо, що система Raptor не потребує додаткових апаратних засобів. Вона працює з уже встановленою камерою дрона, у тому числі з бічними або фронтальними оптичними сенсорами. Це зменшує навантаження на платформу та робить її застосування гнучким для різних типів безпілотників.

Raptor складається з трьох модулів:

1. Raptor Guide – візуальна навігація, яка визначає точне положення дрона в реальному часі з точністю до 10 метрів навіть без GPS.
2. Raptor Sync – реєструє відеопотік на місцевість у реальному масштабі часу, синхронізуючи його з 3D-картою та дозволяючи аналітикам виявляти об'єкти з точністю до 3 метрів.
3. Raptor Ace – забезпечує інтерактивну роботу оператора з відео: на підставі відео з дрона оператор може вручну позначати об'єкти та отримувати їхні координати з високою точністю [12].

## ВИСНОВКИ

В результаті виконаної кваліфікаційної роботи було проведено ґрунтовне дослідження теоретичних та прикладних аспектів застосування систем машинного зору у військовій сфері. Розглянуто фундаментальні фізичні та математичні основи, що лежать в основі побудови таких систем, включаючи джерела формування зображень у різних спектральних діапазонах, методи обробки візуальної інформації та ключові алгоритми розпізнавання образів.

Показано, що ефективність машинного зору значною мірою визначається багаторівневою структурою обробки зображень, де кожен рівень – від попередньої обробки до логічного розпізнавання – виконує критично важливі функції. Особливу увагу приділено контурному аналізу, бінаризації, морфологічній обробці, а також методам зіставлення зразків, що дозволяють забезпечити високу точність і надійність розпізнавання в реальних умовах.

Практична частина дослідження зосереджувалась на огляді технологій, таких як платформа Махар Raptor, що забезпечує автономну навігацію без GPS за допомогою лазерного 3D-сканування та високоточної візуальної локалізації. Ці інноваційні рішення відкривають нові можливості для бойових систем, дозволяючи здійснювати навігацію та аналіз місцевості з високою просторовою точністю навіть у складних умовах

Таким чином, системи машинного зору становлять один із ключових напрямів у розвитку сучасних автономних технологій. Їх впровадження у військову галузь сприяє підвищенню ситуаційної обізнаності, автономності техніки, безпеки військовослужбовців та ефективності бойових операцій. Отримані результати можуть слугувати базою для подальших досліджень і практичної реалізації інтелектуальних систем розпізнавання в умовах нестабільного інформаційного середовища.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Szeliski R. Computer vision: algorithm and applications. 2nd ed // The University Washington. 2022.
2. Кононюк А.Є. Загальна теорія розпізнавання. Київ, 2012. 585 с.
3. Davies E.R. Computer vision: principles, algorithms, applications, earning. 5th ed. URL: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128092842/computer-vision> (дата звернення 03.06.2025).
4. Krig S. Computer Vision Metrics: Survey, Taxonomy, and Analysis // Springer Nature. 2014.
5. FLIR Systems. Thermal Imaging Guidebook for Industrial Applications. FLIR, 2020. URL: <https://www.flir.com/discover/instruments/thermal-imaging-guidebook-for-industrial-applications/> (дата звернення 01.06.2025).
6. Nixon M., Aguado A. Feature Extraction & Image Processing for Computer Vision. 7nd ed. Academic Press is an imprint of Elsevier, 2008. 406 p.
7. Chan T., Shen J. Image Processing and Analysis: Variational, PDE, Wavelet, and Stochastic Methods // BioMedical Engineering OnLine . 2006. Vol. 5 No 1. P. 1–3.
8. Koluzanov J., Kurskoy Y., Levchenko O. Hyperspectral imaging with Fourier transform. Optics & its Applications: 12th International Symposium. Armenia, October 15-19, 2024.
9. Teledyne Optech. Lidar Performance Considerations, Tech Docs, 2021.
10. С.В. Павлов, О.І. Третьяк. Системи оптичного розпізнавання. ХНУРЕ, 2012. С. 262–264.
11. LIDAR Accuracy and Performance Factors. — Velodyne, Teledyne та інші.
12. Maxar Technologies. Офіційний сайт та пресреліз про Raptor. URL: <https://www.maxar.com/maxar-intelligence/products/raptor> (дата звернення 03.06.2025).