

РЕФЕРАТ

Дипломна робота: 67 ст. , 25 рис., 6 табл., 10 джерел та 2 додатки.

Метою даної роботи є реалізація методів по локалізації людської руки у відеопотоці. У роботі реалізовані такі методи як: віднімання фону, кольоровий фільтр на основі байесовського класифікатора та обробка відеопотоку з камери глибини.

Результати роботи:

- реалізовані три підходи по локалізації людської руки на відео;
- проведений аналіз умов для надійної роботи алгоритмів;
- запропоновано і реалізовано ефективний метод навчання байесовського класифікатора;
- проведено порівняння алгоритмів.

Результати даної роботи рекомендовано використовувати у системах взаємодії людини та комп'ютера. При подальших дослідженнях у цій області доцільно створити систему по взаємодії з комп'ютером на основі реалізованого методу детекції руки на відео.

РОЗПІЗНАВАННЯ ОБ'ЄКТІВ, ВЗАЄМОДІЯ КОМП'ЮТЕРА ТА ЛЮДИНИ, КАМЕРА ГЛИБИНИ, БАЙЕСОВСЬКИЙ КЛАСИФІКАТОР, КОЛІРНИЙ ПРОСТІР.

ABSTRACT

The thesis: 67 p. , 25 fig., 6 tabl., 10 sources and 2 appendices.

The theme of this thesis is “Human hand detection on video”.

The purpose of this thesis is to implement and analyze 3 approaches of human hand localization in video stream. In the thesis were realized the following methods: background subtraction, color filter based on Bayes classifier and processing the video stream from depth camera.

Thesis results:

- 3 methods of human hand localization in video stream were implemented;
- for each method were analyzed the optimal working conditions;
- proposed a convenient way for Bayes classifier training;
- made a comparison of methods.

Current thesis results are proposed for using in computer-human interaction systems. In further researches it is reasonable to create a computer-human interaction system based on realized approaches and gesture recognition with support vector machine or neural networks.

OBJECT RECOGNITION, COMPUTER-HUMAN INTERACTION, DEPTH CAMERA, BAYES CLASSIFIER, COLOR SPACE.

ЗМІСТ

	Ст.
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
 РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ЗАДАЧІ РОЗПІЗНАВАННЯ ЛЮДСЬКОЇ РУ-	
КИ НА ВІДЕО	13
1.1 Актуальність поставленої задачі	13
1.2 Аналіз існуючих підходів до вирішення задачі	14
1.2.1 Виділення об'єктів за допомоги віднімання фону	14
1.2.2 Відслідковування руки за допомоги контролерів	15
1.2.3 Колірні фільтри для детекції шкіри на зображенні	16
1.2.4 Ознаки Хаара та метод Віюлі-Джонса	18
1.3 Формалізація постановки задачі дослідження	19
1.3.1 Робочі позначення	19
1.3.2 Формальний опис задачі	19
1.3.3 Основні цілі	19
1.4 Висновки за розділом	19
 РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА	20
2.1 Загальний підхід до задачі розпізнавання людської руки на відео	20
2.2 Колірні моделі та простори	21
2.2.1 RGB	23
2.2.2 HSV	26
2.2.3 Lab	28
2.2.4 YCrCb	28
2.3 Попередня обробка зображень	30
2.3.1 Морфологічні перетворення зображень	30
2.3.2 Видалення шумів шляхом згладжування	34
2.4 Основні алгоритми	35
2.4.1 Віднімання фону	35
2.4.2 Байесовський класифікатор	38
2.4.3 Обробка відеопотоку камери глибини	40
2.5 Критерії оцінки якості роботи системи	41
2.6 Висновки за розділом	41
 РОЗДІЛ 3 ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА	42

3.1	Результати роботи та аналіз оптимальних умов роботи алгоритмів	42
3.1.1	Віднімання фону	42
3.1.2	Байесовський класифікатор	43
3.1.3	Камера глибини	46
3.2	Порівняння алгоритмів	46
3.3	Обґрунтування вибору платформи та мови програмування	46
3.4	Висновки до розділу	46

РОЗДІЛ 4	ФУНКЦІОНАЛЬНО-ВАРТІСНИЙ АНАЛІЗ ПРО-	
	ГРАМНОГО ПРОДУКТУ	47
4.1	Постановка задачі техніко-економічного аналізу	48
4.1.1	Обґрунтування функцій програмного продукту	48
4.1.2	Варіанти реалізації основних функцій	49
4.2	Обґрунтування системи параметрів ПП	51
4.2.1	Опис параметрів	51
4.2.2	Кількісна оцінка параметрів	52
4.2.3	Аналіз експертного оцінювання параметрів	54
4.3	Аналіз рівня якості варіантів реалізації функцій	58
4.4	Економічний аналіз варіантів розробки ПП	59
4.5	Вибір кращого варіанта ПП техніко-економічного рівня ..	63
4.6	Висновки до розділу	64
	ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ	
	ДОСЛІДЖЕНЬ	65
	СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	66
	ДОДАТОК А ІЛЮСТРАТИВНІ МАТЕРІАЛИ ДОПОВІДІ	68
	ДОДАТОК Б ЛІСТИНГ КОДУ	73

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

BC — Bayes classifier

ПК — портативний комп'ютер

BLOB — Binary Large Object

ВСТУП

В наші часи складно уявити своє життя без комп'ютера. Він стоїть удома, на роботі, в школі чи університеті. Основний спосіб комунікації з цим складним девайсом є усім відомі пристрої вводу такі як: клавіатура, мишка чи в більш продвинутому випадку графічний планшет, який є просто незамінний для малювання на ПК.

Права рука людини, що працює за комп'ютером, більше 90% часу знаходиться на мишці, оскільки основна частина користувачів ПК використовує операційні системи з графічними оболонками де більша частина простих керуючих операцій здійснюється за допомоги курсора, який контролюється саме мишою. Варто подумати про те, що робить у цей час ліва рука користувача. Вона дуже часто бездіє чи нажимає прості гарячі комбінації з двох-трьох кнопок на клавіатурі, хоча це малоймовірний випадок оскільки мізерний відсоток людей знає більше 5 гарячих комбінацій. Тобто перша очевидна проблема взаємодії з ПК – мала ефективність основних способів комунікації.

Взагалі перехід операційних систем на графічну оболонку можна вважати дуже великим кроком уперед. Більшість користувачів ПК сприйняли цей крок позитивно адже для запуску програми треба лише навести на її іконку курсор та натиснути один-два рази на ліву кнопку миші. Перша комп'ютерна миша, що була відносно доступною для простих людей, мала лише одну функціональну кнопку та коштувала приблизно 25\$. Вона була випущена разом із операційною системою Apple Macintosh в якій якраз з'явилась підтримка віконного інтерфейсу. Це значно пришвидшило роботу з файлами та інші рутинні операції оскільки пару кліків мишкою заміняли доволі таки складні команди в терміналі. Проте розвиток технологій та потреб користувачів призводить до того, що миша вже не може повністю покривати множину найчастіших команд користувача лише трьома кнопками та сенсором руху. Заміна середньої кнопки на колесо якраз є прикладом додавання нової функціональності миші для покриття більшої кількості команд. Саме розвиток інтернету та браузерів призвів до того, що дуже часто потрібно листати достатньо довгі сторінки і колесо прокрутки для цього підходить набагато краще. Також дуже часто до мишки додають допоміжні функціональні

кнопки, які можна запрограмувати на якусь дію чи навіть послідовність дій. Це також вимушений крок розробників мишок, проте площа поверхні мишки обмежена і місце для кнопок з часом закінчиться.

В останні пару років комп'ютерна миша еволюціонувала на багатьох пристроях у сенсорну панель. Завдяки тому, що сенсорна панель може розпізнавати до десяти пальців, з'являється можливість обробки комплексних жестів для масштабування зображення, прокрутки тексту або інтернет сторінки чи навіть створення власних жестів та програмування виконання певних дій при фіксуванні цього жесту. На даний момент це один із самих ефективних мишкоподібних засобів вводу оскільки покриває дуже велику множину команд з можливістю її розширення.

Проте останній рік був дуже насиченим в плані дослідження проблеми взаємодії людини та ПК. Не так давно була випущена камера Microsoft Kinect для приставки Xbox One. Завдяки поєднанню потоків з двох серсорів RGB та depth з'явилась реальна можливість відслідковування об'єктів у просторі. Звісно це було можливо і раніше за допомоги декількох RGB сенсорів чи навіть спеціальних рухових сенсорів, проте великим недоліком цих методів можна вважати достатньо масштабні обчислення або велику кількість проводів. Поєднавши у камері кольоровий сенсор та сенсор відстані виходить людина не повинна взагалі нічого на себе чіпляти, не потрібно одягати спеціальний одяг з різноманітними сенсорами та передавачами. Комп'ютер може бачити людину у просторі самотійно. Також минулого року компанія Intel анонсувала технологію Realsense та лінійку камер F200, R200, SR300. Відрізняються вони лише призначенням, але головна ідея в тому, щоб дати можливість ПК та мобільним пристроям бачити у просторі. Одною із основних частин Realsense SDK є модуль по відслідковуванню руки та аналізу статичних і динамічних жестів.

Для того щоб зрозуміти важливість цієї проблеми потрібно порівняти функціональність комп'ютерної миші та людської руки. Миша має в основному сенсор положення у 2d просторі, 3 кнопки та колесо прокрутки. Людська рука може знаходитись у 3d просторі та приймати достатньо складні форми (статичні жести) чи робити деякий комплекс рухів у 3d просторі (динамічні жести). Очевидно, що множина станів людської руки більш різнома-

нітна ніж множина станів миші. Саме тому багато дослідників нових способів взаємодії людини та комп'ютера прийшли до того, що можна керувати ПК без тримання в руках яких-небудь пристроїв лише за допомоги жестів. На даний момент спілкування людини та комп'ютера дуже схоже на спілкування людини і сліпої та глухої людини, що виступає в ролі комп'ютера. Дійсно, ПК людину не бачить та не чує взагалі.

Система по локалізації людських рук на відео має бути достатньо простою в плані обчислень так як вона повинна працювати в режимі реального часу та обробляти від 30 до 60 фреймів на секунду. Це зразу відсіює достатньо велику частину підходів які використовуються для локалізації людських рук на фото і обробляють одне зображення довше ніж за одну секунду.

Таким чином, метою цієї роботи є дослідження методів локалізації людської руки на відео.

Для досягнення цих цілей вирішені наступні задачі:

- Проведений аналіз існуючих підходів по локалізації руки на відео та обробки цифрових зображень.
- Реалізовані три методи та проведені дослідження їх роботи.
- Реалізований зручний спосіб навчання Байєсовського класифікатора

Об'єктом дослідження є системи по локалізації людської руки у відеопотоці.

Предметом дослідження є методи та алгоритми формування системи детекції людської руки за допомоги веб камери чи камери глибини.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що проведений достатньо обширний аналіз існуючих методів та порівняння.

Практичними результатами роботи є реалізація трьох підходів, що працюють достатньо точно в певних специфічних умовах, та порівняльний їх аналіз.

Робота складається з чотирьох розділів. У першому розділі розглядається постановка задачі дослідження та актуальність проблеми. Другий розділ присвячений критеріям якості рішення задачі та опису алгоритмів локалізації людської руки на відео. У третьому розділі здійснено огляд технологій та алгоритмів, що використовуються в роботі, проведений порівняльний аналіз та

наведено схеми програм. У четвертому розділі розглядається функціонально-вартісний аналіз програмного продукту.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ЗАДАЧІ РОЗПІЗНАВАННЯ ЛЮДСЬКОЇ РУКИ НА ВІДЕО

1.1 Актуальність поставленої задачі

Розпізнавання людської руки на відео - задача актуальна саме зараз оскільки це основа для більш складного процесу розпізнавання статичних та динамічних жестів.

Розпізнавання жестів насамперед це лише ідея по роботі з жестами і базується на абсолютно різних технологіях: переносимі пристрої (рукавиці чи інші контролери), зафіксовані камери (RGB камери, depth камери чи комбінація RGB камер для отримання стереоскопічного зображення) чи навіть радари (працюють по принципу сканування магнітного фону та його зміни у часі).

Застосування можуть мати найрізноманітніші форми:

- Керування ПК - у 2016 році вийшли перші ноутбуки з вбудованою камерою Intel Realsense F200 (замість звичної RGB камери). На даний момент на її базі створюються програмні продукти по керуванню ПК без миші.
- Навчання мові німих - аналізуючи жести можна повністю оцифрувати мові німих та створити програму-вчителя, що буде показувати жести і перевіряти наскільки правильно користувач їх повторює
- Керування віртуальними середовищами - в кінці 2015 року компанія Microsoft презентувала прототип Hololens, що створений саме для реалізації доповненої реальності та за допомоги камер Kinect аналізувати жести користувача для більш звичної взаємодії з віртуальним середовищем оскільки майже 90% фізичної взаємодії з середовищем людина виконує за допомоги рук, а тому слід вважати, що це основний спосіб взаємодії.

Причини складності задачі:

- Нестабільні умови освітленості - освітленість дуже сильно впливає на алгоритми, що базуються на обробці RGB відеопотоку;

- Поява сторонніх об'єктів у полі зору камери - дуже сильно впливає оскільки збільшує ймовірність розпізнати цей об'єкт як той, що потребує подальшого аналізу;
- Недостатня якість камер призводить до того, що в зображенні присутні шуми;
- Прості RGB камери мають неякісні матриці і через це реєструють кольори спотворено ускладнює роботу з колірними ознаками шкіри людини;
- Колір шкіри людей різниться і тому навчання класифікаторів потрібно проводити на достатньо великих вибірках.

1.2 Аналіз існуючих підходів до вирішення задачі

1.2.1 Виділення об'єктів за допомоги віднімання фону

Віднімання фону - процедура, що за умов нерухомості камери, оцінює зміну кожного пікселя зображення відносно фону, зображення якого було отримане раніше, та отримати в результаті бінарне зображення відмінності поточного зображення від зображення фону.

Алгоритм дійсний як для кольорових зображень, так і для зображень у відтінках сірого.

Переваги цього алгоритму у тому, що його достатньо просто реалізувати та він не потребує складних обчислень (більшість операцій можна векторизувати та паралелізувати що значно прискорює швидкість обробки). Проте його найбільшим недоліком можна вважати те, що за його допомоги неможливо виділити об'єкт на динамічному фоні, він зпродукує велику кількість областей для подальшого аналізу, який може бути вже не таким тривіальним і система на його базі не зможе працювати в режимі on-line на достатньому рівні.

Незважаючи на його недоліки у 2006 році була представлена система по розпізнаванню японської мови жестів [1].

1.2.2 Відслідковування руки за допомоги контролерів

У минулих століттях саме цей підхід для роботи з відслідковуванням руки та аналізу жестів був популярним через достатньо прозору та просту програмну реалізацію. За допомоги приблизно 16 сенсорів та вбудованого в рукавицю гіроскопа можна достатньо точно відслідковувати навіть мікроруки руки.

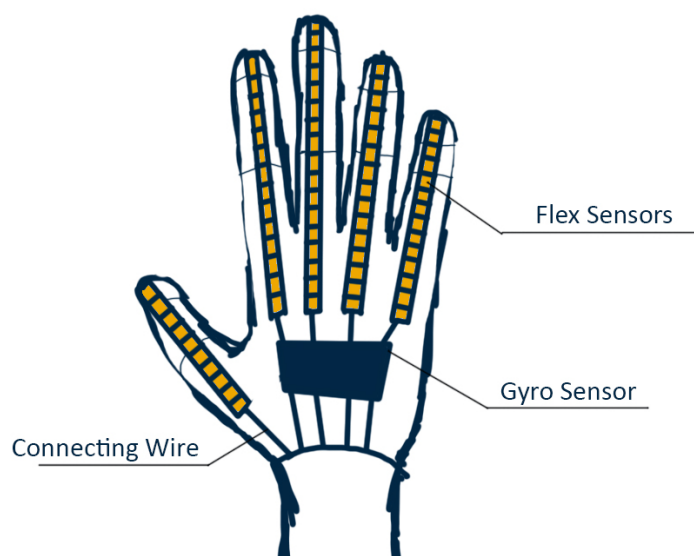


Рисунок 1.1 – Схема рукавиці з сенсорами

З точки зору розробників ПЗ простота була у тому, що на вхід вони вже мали позиції усіх ключових точок руки відносно центру (найчастіше це була ладоня), та положення центру у просторі. Для аналізу статичних жестів достатньо мати лише відносне положення усіх ключових точок відносно центру. Для аналізу динамічних жестів вже потрібні дані зміни положення руки у просторі.

Також були прототипи контролерів, що містили лише гіроскоп, проте відслідковування позиції у просторі руки як одного об'єкта без даних про позиції ключових точок на пальцях виявився нікому непотрібним і контролери швидко вийшли з виробництва.

Переваги цього підходу до відслідковування руки у просторі в тому, що він дає дуже точні результати та з мінімальною затримкою, проте він має

дуже серйозний недоліки - потреба в носінні на собі додаткових незручних приладів та складність підтримки і ремонту таких девайсів.

1.2.3 Колірні фільтри для детекції шкіри на зображенні

Оскільки будь-яке цифрове зображення можливо представити у вигляді:

$$M = \text{matrix } W \times H \times D, d = \dim D \quad (1.1)$$

де M - цифрове зображення, W - ширина зображення, D - розмір кольорового простору. Наприклад для типових кольорових просторів RGB, HSV, YCrCb $d = 3$. Для кольорового простору градацій сірого $d = 1$.

Колірний простір можна представити так:

$$(x = (x_1, \dots, x_d) \in D) \Leftrightarrow (0 \leq x_1 \leq d_1, \dots, 0 \leq x_d \leq d_d) \quad (1.2)$$

де D - кольоровий простір, d_1, \dots, d_d - обмеження координат кольорового простору.

Найчастіше зустрічається випадок коли $x_i \in \mathbb{N} \cup \{0\}$, $d_i = 2^8, i = 1..d$ оскільки це списується в принцип збереження даних у пам'яті ПК.

1.2.3.1 Прості кольорові фільтри

Основний принцип роботи простих кольорових фільтрів полягає у тому, що емпіричними методами виділяється гіперкуб, що повністю містить у собі всі можливі значення пікселів, що характеризували певний об'єкт.

Формальний вигляд простого фільтра:

$$H = \{x \in D \mid a_i \leq x_i \leq b_i, i = 1..d\} \quad (1.3)$$

де a_i, b_i - грані гіперкуба.

Прості колірні фільтри хороші тим, що дуже прості в реалізації, швидко працюють та є можливість паралелізації обчислень оскільки фільтр обробляє кожен піксель незалежно.

Результатом роботи колірного фільтра H зображення M є бінарна матриця Q :

$$Q = [q_{ij}], \quad q_{ij} = (M[i, j] \in H), \quad i = 1..dimW, \quad j = 1..dimH \quad (1.4)$$

Тобто матриця $q_{ij} \in \{0, 1\} \forall i, j$ і тому можна достатньо просто записати композицію простих фільтрів як поелементні бінарні операції над матрицями. Звісно за допомоги кубів можливо апроксимувати достатньо точно найскладніші фігури, проте це має свої слабкі сторони:

- а) апроксимація певного тіла кубами в просторі розмірності d достатньо нетривіальна задача з точки зору математики
- б) зі збільшенням точності буде рости кількість простих колірних фільтрів у ланцюгу композицій і це призведе до падіння швидкості роботи

У роботі [2] було проведене дослідження колірних характеристик шкіри людини та експериментальним шляхом отримані певні фільтри, за допомоги яких можна провести первинну обробку зображення щоб вилучити із зображення деякі області, що майже напевно не містять кольори близькі до кольору шкіри людини. Також у цій роботі запропоновані фільтри для найбільш поширених колірних просторів - RGB, HSV та YCbCr.

1.2.3.2 Гаусівська модель

Одним з більш складних підходів є припущення, що ймовірність належності кольору пікселя до множини кольорів певного об'єкта є деяка випадкова величина, що розподілена за гаусівським законом розподілу [3].

Також цей підхід враховує змінні умови освітлення шляхом поєднання двох гаусівських моделей. Перша гаусівська модель будується у спеціальних умовах звичайного освітлення, друга - при черезмірному освітленні.

Алгоритм навчання такої моделі - метод вибору математичного сподівання та кореляційної матриці.

Класифікація проводиться згідно з вибраною довірчою ймовірністю. У конкретному випадку колірному простору розміності 2 це буде еліпс.

Основним недоліком цього підходу є те, що на практиці достатньо важко правильно підібрати математичне сподівання та кореляційну матрицю і тому точність методу недостатня.

1.2.3.3 Байесовська модель

Байесовський класифікатор дуже поширений у задачі локалізації людської руки на відео. Його використовують для пошуку об'єктів з певними колірними характеристиками.

За основу береться теорема Байеса про апостеріорні ймовірності. Байесовська модель дозволяє обрахувати ймовірності того, що піксель з певним кольором належить шуканому об'єкту.

Навчання такої моделі можна розбити на 2 етапи:

- а) Обробка зображення для навчання - на зображеннях призначених для навчання замальовуються усі сторонні елементи окрім шкіри і таким чином формується маска зображення.
- б) Навчання - підраховується кількість кожного пікселя що потрапляє у область шкіри на зображенні та в кінці навчання ділиться на загальну кількість пікселів, що належали шкірі.

Проте для хорошої точності класифікатора потрібна чимала вибірка. Виділення руки на зображенні за допомоги графічних редакторів є нескладною задачею, проте дуже повільною. Тому окрім реалізації Байесовського класифікатора слід ще подумати над можливістю обробки ймовірностей після навчання та розробки більш зручного та швидкого методу навчання класифікатора.

1.2.4 Ознаки Хаара та метод Віоли-Джонса

Метод Віоли-Джонса дуже популярний та використовується в багатьох сферах. Добре себе показує в задачі розпізнавання облич та навіть пішоходів на вулиці.

Цей алгоритм можливо використати і для задачі локалізації людської руки на відео [4] [5], проте в цьому випадку потрібно враховувати деякі особливості.

Використовуючи ознаки Хаара потрібно розуміти, що конкретний класифікатор буде розпізнавати лише певний, а головне один, жест, причому допускаються повороти відносно центра кратні 45 градусів, що не дуже підходить для роботи з відео на якому рука може приймати різноманітні форми та повертатися.

1.3 Формалізація постановки задачі дослідження

1.3.1 Робочі позначення

1.3.2 Формальний опис задачі

1.3.3 Основні цілі

1.4 Висновки за розділом

РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

2.1 Загальний підхід до задачі розпізнавання людської руки на відео

Загальний підхід до розв'язання поставленої задачі можна розбити на окремі етапи:

- а) Отримання поточного зображення з камери - у випадку простої RGB камери це лише отримання поточного зображення, проте у випадку Intel Realsense камери цей етап може потребувати деяких простих обчислень. Оскільки камера від компанії Intel має окрім звичайного RGB сенсору ще й інфрачервоний для отримання карти глибини може виникнути проблема синхронізації двох відеопотоків оскільки фізично ці два сенсори знаходяться на деякій відстані один від одного. Методи для синхронізації це звичайні алгоритми синхронізації відеопотоків 2 чи більше камер зі стереоскопії. Саме такий і реалізований у драйвері librealsense.
- б) Попередня обробка зображення - використовується для стабілізації будь-якого цифрового зображення припускаючи що сенсори не ідеальні та можуть вносити деяку похибку, яку можливо зменшити використавши фільтри згладжування: box фільтр, гаусівський фільтр чи фільтр медіаною.
- в) Застосування вибраного алгоритму до зображення - цей етап також можна узагальнити для трьох вибраних підходів оскільки в усіх випадках вхідні дані алгоритму складаються лише з зображення, а вихідні з бінарного зображення з виділеними областями в яких рймовірно локалізована людська рука.
- г) Заключна обробка вихідного результату вибраного алгоритму - отримавши бінарне зображення з виділеними областями потрібно обробити усі області та відфільтрувати ті, що по певним параметрам немає сенсу розглядати. Наприклад, вважаючи, що рука на зображенні повинна мати розмір більший ніж деяка фіксована величина можливо відсіяти велику кількість малих за площею областей. Те саме стосується і занад-

то великих областей, які за деяких причин були помічені алгоритмом як рука, проте вони завеликі для обробки і їх також немає сенсу розглядати.

На виході буде отримано бінарне зображення з областями, в яких ймовірно знаходиться людська. На цьому задача локалізації людської руки завершується і цей результат може подаватися на вхід алгоритмів по аналізу жестів. Які працюють з кожною областю окремо та можуть проводити свою спеціальну перевірку на те, чи знаходиться у цій області людська рука.

2.2 Колірні моделі та простори

Оскільки цифрова електроніка оперує лише дискретною математикою, то над вченими 20 століття постала проблема представлення кольорів у ЕОМ. Основна ідея представлення кольорів прийшла з науки біології та експериментальним шляхом було доведено, що людина є трихроматом [6]. Сітчатка ока трихроматів має 3 види рецепторів, що називаються ковбочками, які відповідають за колірний зір. Кожна з цих ковбочок має як параметр деяку довжину хвилі, на яку вона дає максимальний зворотній сигнал.

За історичних обставин склалося так, що еталонним колірним простором є XYZ. Ця колірна модель була запропонована та прийнята організацією CIE (International Commission on Illumination) у 1931 році. Саме ця модель є базовою для практично усіх інших колірних моделей.

Експерименти, що були проведені Девідом Райтом та Джоном Гілдом у 1930х роках послужили основою для визначення функції колірної відповідності.

Колір у моделі XYZ задається таким чином:

$$\begin{aligned} X &= \int_{380}^{780} I(\lambda) * x(\lambda) d\lambda \\ Y &= \int_{380}^{780} I(\lambda) * y(\lambda) d\lambda \\ Z &= \int_{380}^{780} I(\lambda) * z(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (2.1)$$

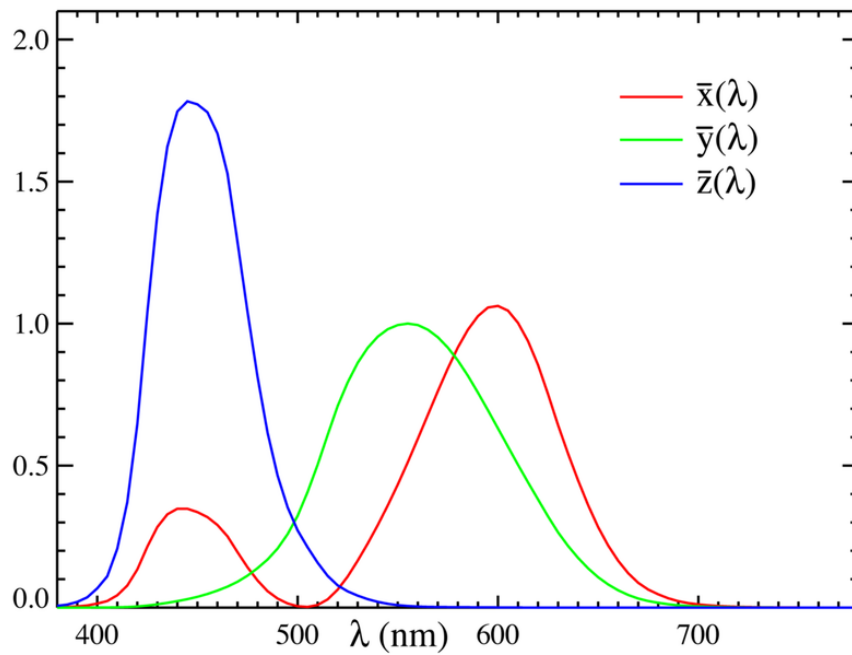


Рисунок 2.1 – Функції колірної відповідності

Саме ця модель задає правила змішування кольорів та задає обмеження що накладаються на спектральні складові, які мають один колір.

Якщо формально побудувати переріз простору XYZ площиною $X + Y + Z = \text{const}$, то 2 з 3 координат будуть лінійно незалежні і їх можна записати так:

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{X + Y + Z} \\ y &= \frac{Y}{X + Y + Z} \\ z &= \frac{Z}{X + Y + Z} \end{aligned} \tag{2.2}$$

Такий переріз називається хроматичною діаграмою.

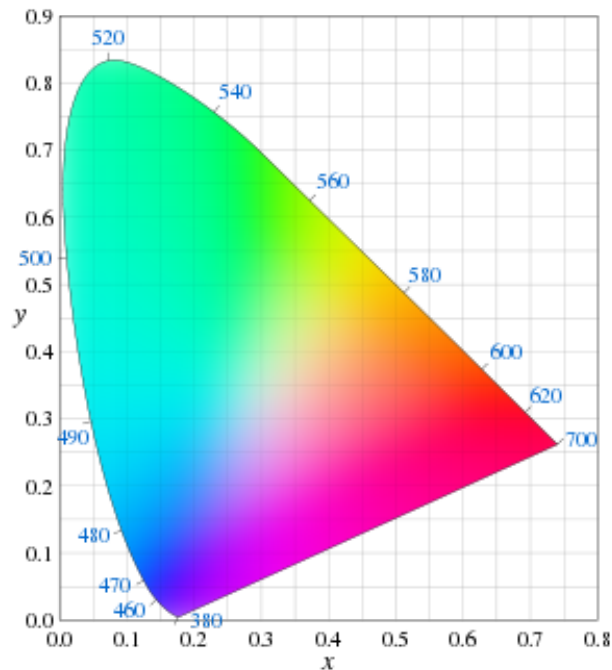


Рисунок 2.2 – Хроматична діаграма з довжинами хвиль кольорів

2.2.1 RGB

RGB (скорочено від англ. Red, Green, Blue — червоний, зелений, синій) — адитивна колірна модель, що описує спосіб синтезу кольору, за якою червоне, зелене та синє світло накладаються разом, змішуючись у різноманітні кольори. Широко застосовується в техніці, що відтворює зображення за допомогою випромінення світла.

У даній моделі колір кодується градаціями складових каналів (Red, Green, Blue). Тому за збільшення величини градації котрогось каналу — зростає його інтенсивність під час синтезу.

Кількість градацій кожного каналу залежить від розрядності бітового значення RGB. Зазвичай використовують 24-бітну модель, у котрій визначається по 8 біт на кожен канал, і тому кількість градацій дорівнює 256, що дозволяє закодувати $256^3 = 16\,777\,216$ кольорів.

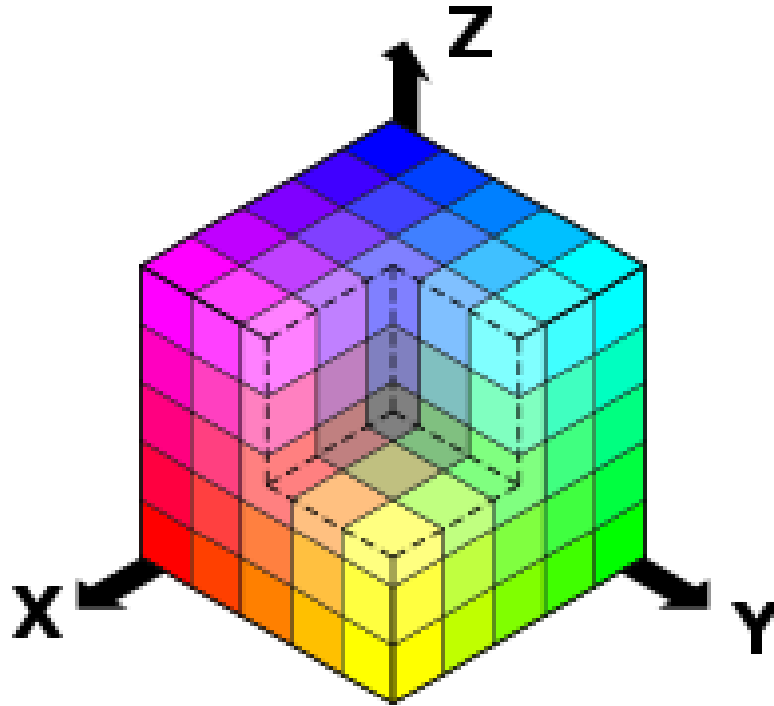


Рисунок 2.3 – Тривимірне представлення моделі RGB

Колірна модель RGB призначена сприймати, представляти та відображати зображення в електронних системах, таких як телебачення та комп'ютери, хоча її також застосовували у традиційній фотографії. Вже до електронного віку, модель RGB мала за собою серйозну теорію, засновану на сприйнятті кольорів людиною.

Типово приладами із RGB-входом є кольоровий телевізор і відеокамера, сканер і цифровий фотоапарат.

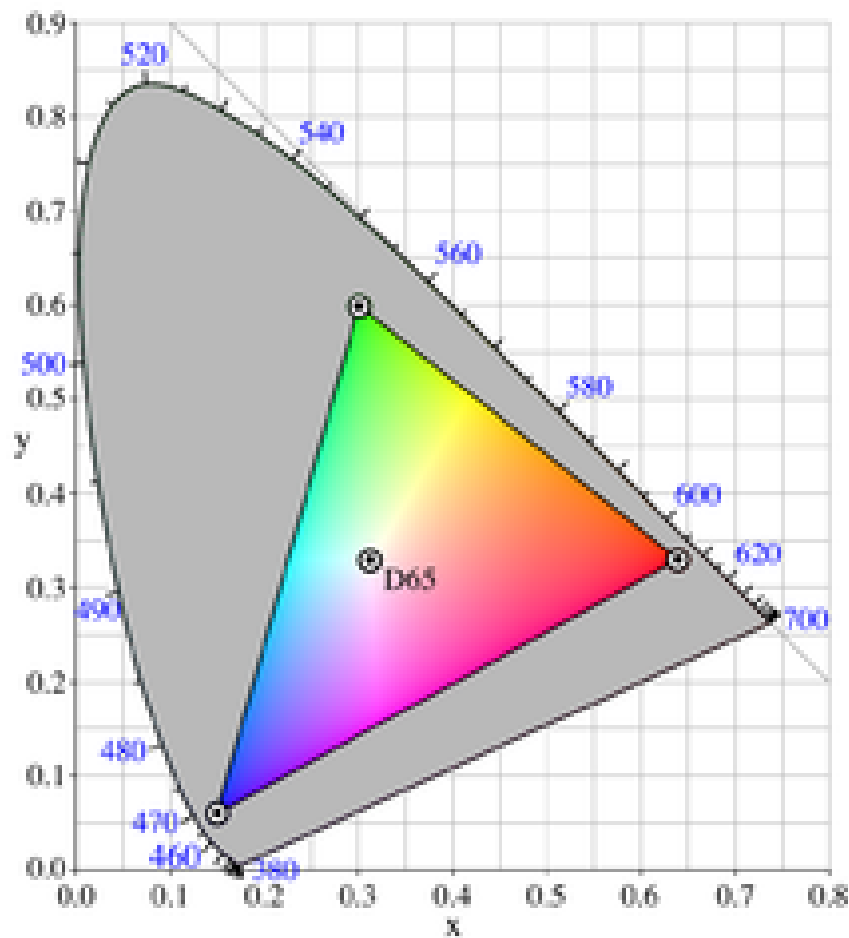


Рисунок 2.4 – Обмеженість моделі по можливості передачі кольору

Переваги моделі:

- а) Апаратна близькість із монітором, сканером, проектором, іншими пристроями;
- б) Велика кольорова гама, близька до можливостей людського зору;
- в) Доступність багатьох функцій обробки зображення (фільтрів) у програмах растрової графіки;
- г) Невеликий (порівняно до моделі СМҮК) обсяг, проте ширший спектр кольорів.

Недоліки:

- а) Обмеженість моделі (Рис 2.4);
- б) Немає явного відділення люмінантної компоненти - для аналізу яскравості пікселя потрібно робити додаткові перетворення.

2.2.2 HSV

HSB — колірна модель, що використовується тільки для оформлення векторних і текстових об'єктів документа. Описує колірний простір, заснований на трьох характеристиках кольору: колірному тоні (Hue), насиченості (Saturation) і яскравості (Brightness).

- Hue — колірний тон, (наприклад, червоний, зелений або синьо-блакитний). Варіюється в межах 0-360°, але іноді приводиться до діапазону 0-100 або 0-1. У Windows весь колірний спектр ділиться на 240 відтінків (що можна спостерігати в редакторі палітри MS Paint), тобто тут «Hue» зводиться до діапазону 0-240 (відтінок 240 відсутній, оскільки він дублював би 0).
- Saturation — насиченість. Варіюється в межах 0-100 або 0-1. Чим більший цей параметр, тим «чистіший» колір, тому цей параметр іноді називають чистотою кольору. А чим ближчий цей параметр до нуля, тим ближчий колір до нейтрального сірого.
- Value (значення кольору) або Brightness — яскравість. Також задається в межах 0-100 або 0-1.

Модель була створена Елві Реєм Смітом, одним із засновників Pixar, в 1978 році. Вона є нелінійним перетворенням моделі RGB.

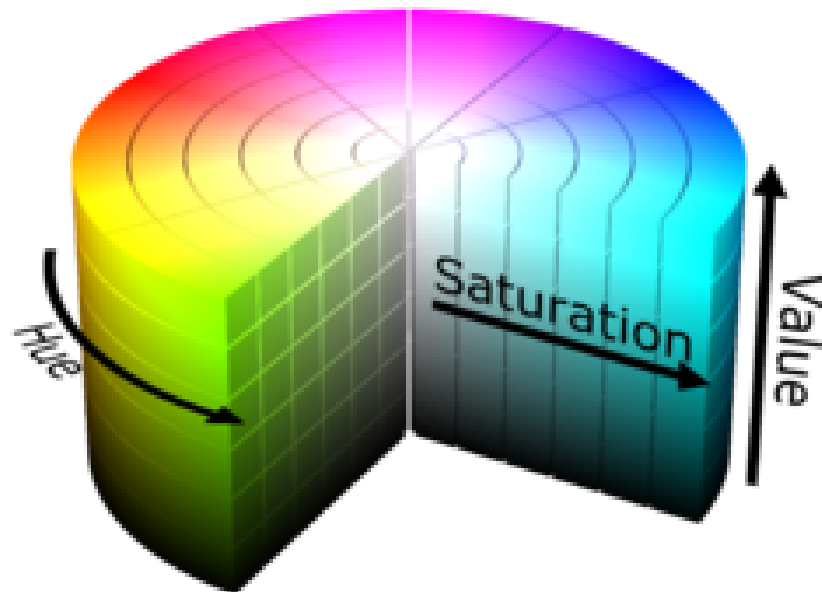


Рисунок 2.5 – Циліндричне представлення колірного простору

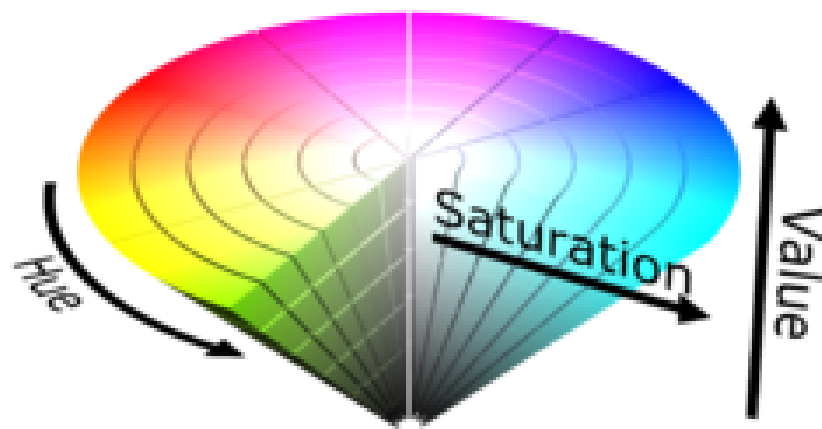


Рисунок 2.6 – Конічне представлення колірного простору

Колір, представлений в HSV, залежить від пристрою, на який він буде виведений, так як HSV — перетворення моделі RGB, яка теж залежить від пристрою. Для отримання коду кольору, не залежного від пристрою, використовується модель Lab.

2.2.3 Lab

Колірний простір Lab використовує як параметри світлосилу, відношення зеленого до червоного та відношення синього до жовтого. Ці три параметри утворюють тривимірний простір, точки якого відповідають певним кольорам.

Цей колірний простір розроблявся як апаратно-незалежний, тобто він задає кольори без врахування особливостей відтворення кольорів. Має три параметри для опису кольору: світлосила L (англ. Lightness) та два хроматичні параметри. Перший (умовно позначений латинською літерою a) вказує на співвідношення зеленої і червоної складової кольору, другий (позначений літерою b) — співвідношення синьої та жовтої складової.

На відміну від кольорових просторів RGB чи CMYK, які є, по суті, набором апаратних даних для відтворення кольору на папері чи на екрані монітора, Lab однозначно визначає колір. Тому Lab широко використовується в програмному забезпеченні для обробки зображень у якості проміжного кольорового простору, через яке проходить конвертування даних між іншими кольоровими просторами (наприклад, з RGB сканера в CMYK печатного процесу). При цьому особливі властивості Lab зробили редагування в цьому просторі потужним інструментом корекції кольору.

Завдяки характеру визначення кольору в Lab з'являється можливість окремо впливати на яскравість, контраст зображення і на його колір. У багатьох випадках це дозволяє прискорити обробку зображень. Lab надає можливість вибіркового впливу на окремі кольори в зображенні, посилення кольорового контрасту, незамінними є можливості, які цей колірний простір надають для боротьби із шумом на цифрових фотографіях.

2.2.4 YCrCb

YCrCb являється ще одним колірним простором в якому виділяється люмінантна складова кольору.

$$\begin{aligned}
 Y &= K_R * R + (1 - K_R - K_B) * G + K_B * B \\
 Cb &= \frac{1}{2} * \frac{B - Y}{1 - K_B} \\
 Cr &= \frac{1}{2} * \frac{R - Y}{1 - K_R}
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

де R, G, B - координати кольору у форматі RGB, K_R, K_B - деякі константи.

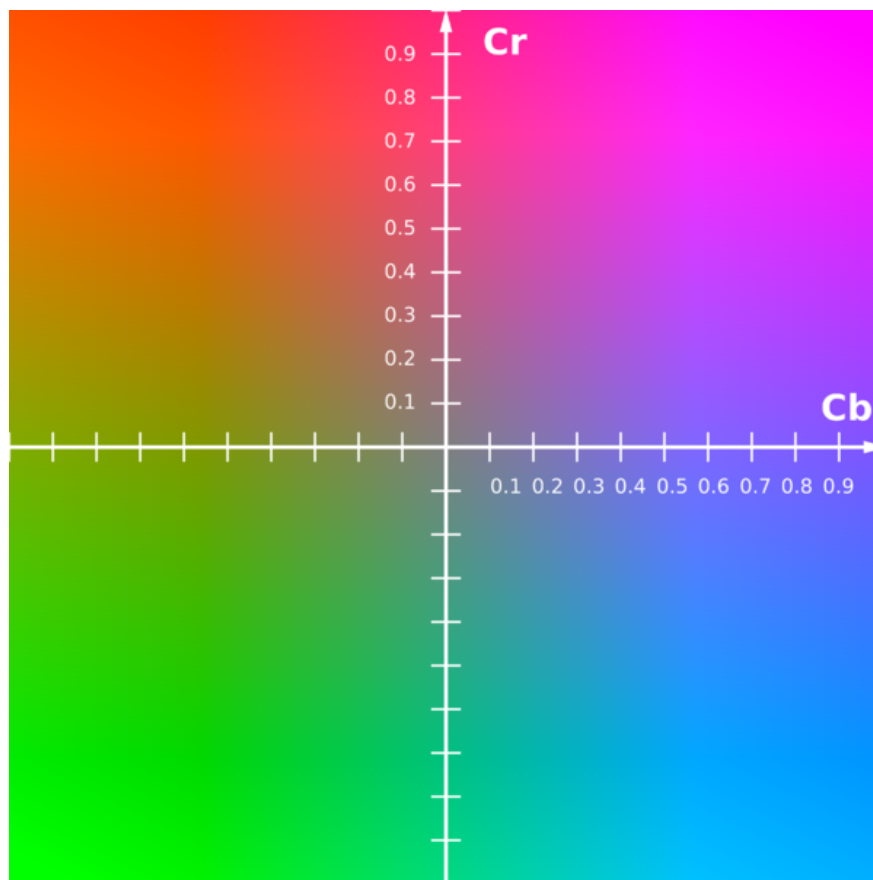


Рисунок 2.7 – Площина CbCr при $Y = 0.5$

В комп'ютерній графіці часто YCrCb покоординатно переводять з відрізка $[0, 1]$ у множину $[0, \dots, 255]$ щоб кожну координату зберігати як беззнакове ціле число розміром 1 байт. Звісно це вносить деякі похибки, проте в такому форматі легше працювати з кольором.

2.3 Попередня обробка зображень

Попередня обробка зображень - перший етап у будь-якій роботі над зображеннями чи відео оскільки у більшості випадків від того, наскільки правильно буде вона проведена, залежить стабільність роботи алгоритмів у подальшому.

Основні причини чому попередня обробка зображень обов'язкова:

- а) Видалення шумів - випадкові чи не випадкові шуми можуть з'являтися за багатьох причин і дуже сильно впливати на точність роботи системи. Також слід розуміти, що достатньо якісні камери дорого коштують і тому система, яка не буде враховувати випадкові шуми на простих камерах працювати буде погано або навіть кардинально неправильно. До того ж система по локалізації людської руки буде більш затребуваною якщо зможе достатньо добре працювати на простих вебкамерах ноутбуків
- б) Стабілізація форм об'єктів - іноді шуми можуть бути не точкові, а мати деяку форму та спотворювати форму досліджуваних об'єктів на відео. Такі випадки також потрібно враховувати оскільки для видалення таких дефектів використовуються окремі підходи

2.3.1 Морфологічні перетворення зображень

Математична морфологія — це наука, яка вивчає методи і алгоритми аналізу і обробки геометричних структур, основана на теорії множин, топології і випадкових функцій. Застосовується при обробці цифрових зображень, але також може бути застосована до графів, полігональної сітки, стереометрії і багатьох інших просторових структур.

Морфологічні операції виконуються над двома зображеннями: вхідним зображенням і спеціальним, яке залежить від операції і типу виконуваної задачі. Таке спеціальне зображення в математичній морфології називається структурним елементом, примітивом чи ядром. Структурний елемент являє собою деяке двійкове зображення. Він може бути довільного розміру і структури, але за звичай розмір такого зображення має розмір 3x3, 4x4, 5x5 пі-

кселів, тобто значно менше вхідного зображення. Частіше за все використовуються симетричні елементи, такі як прямокутник фіксованого розміру чи круг заданого діаметру. В кожному елементі виділяють особливу точку, яку називають початковою (origin). Вона може вибиратися в будь-якому місці зображення, але найчастіше це центральний піксель.

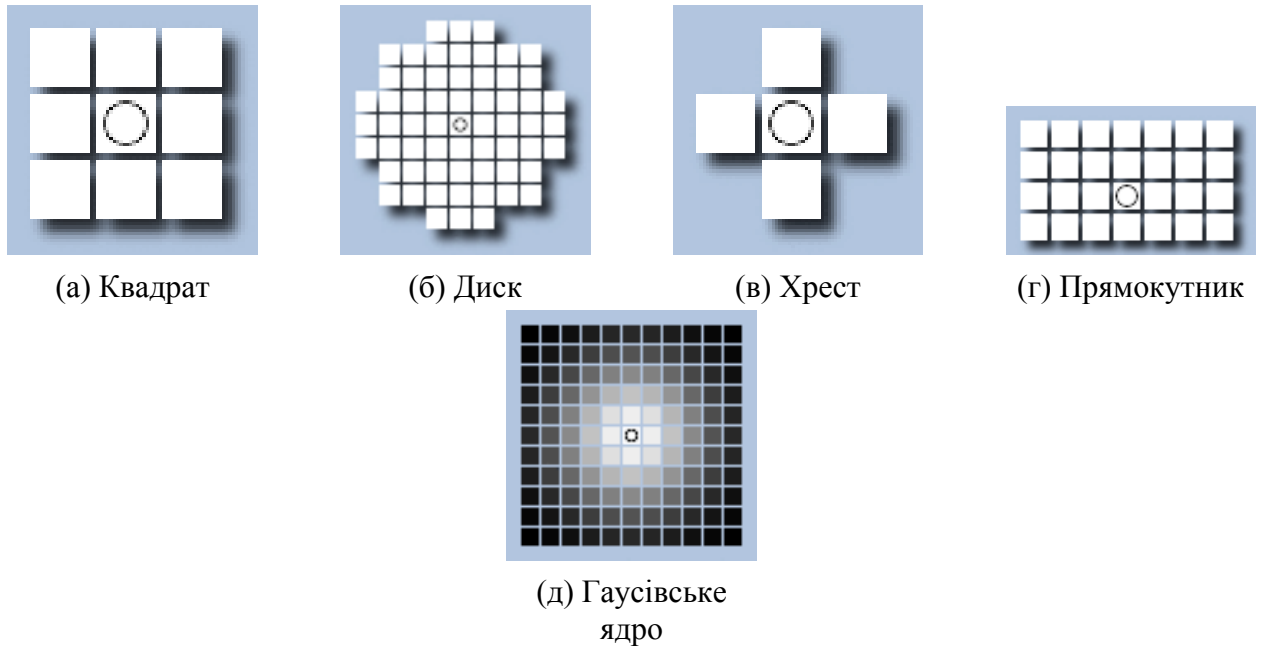


Рисунок 2.8 – Основні структурні елементи

Структурні елементи 2.8а, 2.8б, 2.8в та 2.8г складаються лише з 0 та 1. Ядро 2.8д відрізняється тим, що 1 лише у центрі і далі з віддаленням від центра елементи мають величину, що виражається гаусівським законом розподілу [7].

Основними морфологічними операціями є:

- а) Ерозія
- б) Дилація
- в) Розкриття
- г) Закриття
- д) Перенос

2.3.1.1 Ерозія

$$A \ominus B = \{z \in E \mid B_z \subseteq A\} \quad (2.4)$$

Інакше кажучи, ерозія множини A по примітиву B , це таке геометричне місце точок для всіх таких позицій точок центру z , при зсуві яких множина B цілком міститься в A .



(а) До



(б) Після

Рисунок 2.9 – Ілюстрація операції ерозії

2.3.1.2 Дилація

$$A \oplus B = \{z \in E \mid B_z^\delta \cap A \neq \emptyset\} \quad (2.5)$$

При цьому дилація множини A по структурному елементу B це множина всіх таких переміщень z , при яких множини A і B співпадають принаймні в одному елементі.



(а) До



(б) Після

Рисунок 2.10 – Ілюстрація операції дилації

2.3.1.3 Розкриття

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \quad (2.6)$$

Таким чином, розкриття множини A по структурному елементу B знаходиться як ерозія A по B , результат котрої піддається дилації по тому ж структурному елементу B . В загальному випадку розкриття сгладжує контури об'єкту, усуває візькі перешийки і ліквідує виступи невеликої ширини.

2.3.1.4 Закриття

$$A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B \quad (2.7)$$

В результаті операції закриття відбувається згладження відрізків контурів, але, на відміну від розкриття, в загальному випадку заповнюються невеликі розриви і довгі заглибини малої ширини, а також ліквідуються невеликі отвори і заповнюються проміжки контуру.

2.3.1.5 Перенос

$$A_s = a + s | a \in A, \forall s \in E \quad (2.8)$$

Перенос можна визначити за допомогою упорядкованої пари чисел (x, y) , де x – кількість пікселів зміщення вздовж осі X , а y – рух вздовж осі Y

2.3.2 Видалення шумів шляхом згладжування

Шуми на цифрових зображеннях доволі поширене явище, особливо якщо зображення було отримане у нестабільних умовах освітлення чи з не-якісної камери. Нехтування цим етапом попередньої обробки може призвести до того, що алгоритми також будуть видавати зашумлений результат з великої кількості дефектів.

Згорткове ядро являє собою матрицю та має деяку особливу точку в матриці, яку називають центром чи початком. Частіше за все цю точку не задають, а вважають що нею є центр матриці оскільки будь-яке ядро з центром відмінним від центра матриці можна привести до ядра, можливо більшого розміру, щоб його центр співпадав з центром матриці.

Згортка матриці A розмірів $m \times n$ з ядром K розмірів $a \times b$ та центром у точці (c_1, c_2) є матриця R , яка будується таким чином:

$$R_{i,j} = \sum_{x=1}^a \sum_{y=1}^b A_{i-c_1+x, j-c_2+y} * K_{x,y}, \quad i = 1..m, j = 1..n \quad (2.9)$$

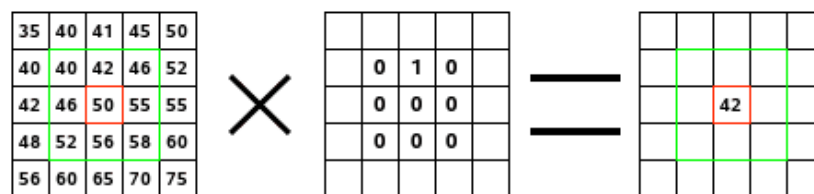


Рисунок 2.11 – Ілюстрація згортки

На Рис. 2.11 показаний приклад ядра зсуву. Такі ядра називають ядрами зсуву. Вони мають лише одну 1 в матриці, а вектор зсуву можна отримати побудувавши вектор з початком в центрі матриці, а кінцем в одиниці.

Дивлячись на формулу 2.9 можна побачити, що на краях зображення з'являється невизначеність, якої можна позбутися доповнивши матрицю A до розмірів $m + 2a \times n + 2b$.

Доповнювати можна по-різному: нулями, дублювати крайні елементи чи проводити апроксимацію.

Види згладжування видрізняються лише ядром згортки та операцією над елементами згортки. Як правило операція - сума. Такі фільтри називають лінійними.

$$K = \frac{1}{K_{width} \cdot K_{height}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Рисунок 2.12 – Box filter

$$G_{x,y} = Ae^{\frac{-(x-\mu_x)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{-(y-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2}} \quad (2.10)$$

Прикладами лінійних фільтрів є:

- Box filter - прямокутний фільтр. Його ядро має вигляд як на Рис. 2.12;
- Гаусівський фільтр. Елементи матриці мають вигляд щільності двовимірного гаусівського розподілу 2.10.

Прикладами нелінійних фільтрів є:

- Фільтр медіаною - операція над елементами згортки є не сума, а вибір медіани серед них;
- Білатеральний фільтр - достатньо потужний фільтр, який дає дуже хороше розмиття зображення, проте він працює значно довше ніж перераховані вище і саме це є його основним недоліком [8].

2.4 Основні алгоритми

2.4.1 Віднімання фону

Віднімання фону дуже поширений алгоритм, який використовується у ситуаціях, коли відомо, що камера відносно нерухома. Завдяки йому можна

достатньо просто виділити фон із зображення, а значить і передній план чи просто об'єкти, які динамічно рухаються на відео.

Часто використовується для обробки відео з дорожніх відеореєстраторів чи IP камер, які розташовані у людних місцях. Відніманням фону можна миттєво отримати усі рухомі об'єкти на відео - машини, пішоходи тощо. Також є певні модифікації цього алгоритму для виділення навіть об'єктів, що не рухаються певний час, проте вони більш пристосовані під окремі задачі.

2.4.1.1 Математичні основи

$$P[F(t)] = P[I(t)] - P[B] \quad (2.11)$$

де $P[B]$ - зображення фону, $P[I(t)]$ - поточне зображення, $P[F(t)]$ - різниця між поточним зображенням та фоном.

За умови незмінності фону можна працювати з формулою (2.11).

Для відслідковування рухів динамічних об'єктів також використовується рівняння:

$$\|P[F(t)] - P[F(t + 1)]\| > Threshold \quad (2.12)$$

де *Threshold* - деяка задана порогова величина.

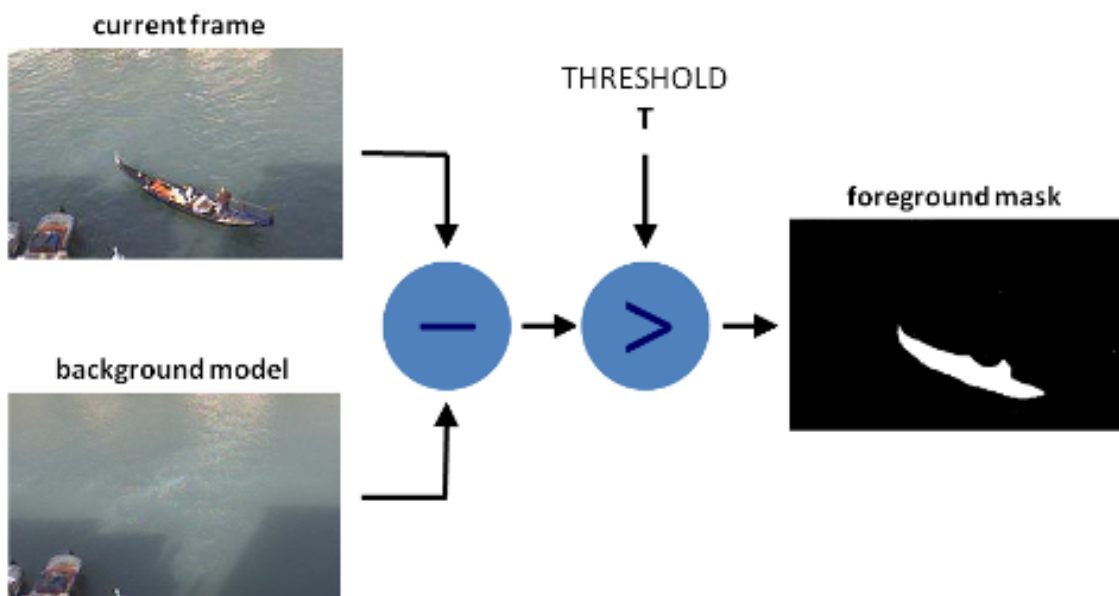


Рисунок 2.13 – Ілюстрація роботи простого алгоритма віднімання фону

Тобто маючи попередньо зображення фону можна отримати передній план зображення просто віднявши від поточного зображення поелементно зображення фону.

Також існують підходи, за яких зберігається не фонове зображення, а історія N останніх зображень. Такі алгоритми називають змішаними.

Нехай у деякий момент $t = t^*$ у пам'яті зберігається історія N останніх фреймів відео $P[I(t^* - 1)], \dots, P[I(t^* - N)], \lambda_1, \dots, \lambda_N : \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1$ - ваги, тоді фонове зображення може бути виражене як:

$$P[F(t^*)] = \sum_{i=1}^N \lambda_i * P[I(t^* - i)] \quad (2.13)$$

Від вибору λ_i залежить значимість віддалених у часі фреймів у фоновому зображенні. Якщо взяти їх усіх рівними $\frac{1}{N}$, то такий алгоритм називають змішаною моделю середнього значення віднімання фону.

Виділення переднього фону можна записати як:

$$Foreground[I(t^*)] = |P[F(t^*)] - P[I(t^*)]| > Threshold \quad (2.14)$$

$|P[F(t^*)] - P[I(t^*)]| > Threshold$ у формулі 2.14 слід розуміти як поелементна різниця матриць і поелементне порівняння цієї різниці з певною пороговою величиною. Тобто на виході отримане бінарне зображення - матриця з 0 та 1.

2.4.1.2 Особливості реалізації

У роботі використовується змішана гаусівська модель віднімання фону, що описана у [9] та [10]. Така модель краща за звичайну модель середнього значення через те, що чим більше віддалена від поточного зображення фрейм, тим менша його значимість на даний момент. Також гаусівський розподіл дуже добре себе показує у багатьох ситуаціях. Звісно можна вибрати коефіцієнти згідно з рядом фібоначі, проте гаусівський розподіл показує кращі результати.

2.4.2 Байесовський класифікатор

2.4.2.1 Теоретичні засади

Цей підхід зустрічається у літературі дуже часто і основна формула, що описує модель, на перший погляд незрозуміла:

$$P(s|c) = \frac{P(c|s) * P(s)}{P(c)} \quad (2.15)$$

Це звичайний запис теореми Байеса для знаходження апостеріорних ймовірностей.

$P(s|c)$ - ймовірність того, що піксель належить до множини кольорів шуканого об'єкта за умови що піксель має колір c . $P(s|c)$ в свою чергу має обернене формулювання - ймовірність того, що піксель приймає значення s за умови що він належить до множини кольорів об'єкта. $P(s)$ - ймовірність того, що піксель належить до множини кольорів об'єкта. $P(c)$ - загальна ймовірність того, що піксель має колір c .

2.4.2.2 Пристосування до задачі розпізнавання кольорів об'єкта

З формули 2.15 не зовсім зрозуміло як взяти шукати 3 ймовірності, що присутні у правій частині рівності.

Основне припущення цього підходу - кольори окремих пікселів на зображенні незалежні один від одного. За такого припущення можна сказати, що $P(s)/P(c)$ - деяка загальна константа якою можна знехтувати поставивши її рівною 1, а $P(c|s) = m/n$, де m - кількість пікселів кольору c , що належать об'єкту, n - загальна кількість пікселів, що належала об'єкту.

2.4.2.3 Корекція моделі

Приймаючи до уваги, що в задачі розпізнавання людської руки на відео класифікатор використовується лише для 2 із 3 компонент колірному простору, в якому є виділення люмінантної складової в окремому компоненту, то

результатом навчання класифікатора слід очікувати деяку матрицю ймовірностей.

Основною ідеєю корекції моделі є те, що навчання могло проводитись не зовсім якісно і тому деякі ймовірності можуть бути лише поодинокими шумами. Матрицю ймовірностей можна розцінювати як деяке зображення та його обробку можна також розцінювати як обробку специфічного зображення.

Перший підхід до обробки матриці ймовірностей має прив'язку лише до чи нульова певна ймовірність.

$$A[i, j] = (P[i, j] > 0) \quad (2.16)$$

де P - матриця ймовірностей.

Матриця A складається лише з 0 та 1. Наступним кроком є застосування згортки з ядром, що складається лише з 1 та має форму круга з радіусом R . Це ядро ненормоване, тобто сума усіх його елементів не рівна 1. Таким чином буде отримана матриця N , що її (i, j) елемент приймає значення кількості його ненульових сусідів у радіусі R навколо нього. Тобто побудована матриця N на позиції (i, j) містить число ненульових ймовірностей матриці P у крузі з центром в (i, j) та радіуса R . Заключним кроком є занулювання усіх ймовірностей, що мають недостатню кількість ненульових сусідів у відсотках від площі круга згорткового ядра. Таким чином після цієї процедури вигляд матриці ймовірностей більш заокруглений та не містить поодиноких ймовірностей.

Другий підхід приймає до уваги не тільки факт того, що ймовірність ненульова, а і її значення. Відрізняється він тим, що у якості згорткового ядра береться гаусівське ядро, яке нормоване і тому результат згортки також буде знаходитись у межах $[0, 1]$. Усі ймовірності, що менші за задане значення зануляються. Тобто результат згортки зберігається в окремій матриці

2.4.2.4 Удосконалення процесу навчання класифікатора

Оскільки процес навчання класифікатора доволі тривалий через те, що треба вручну обробляти велику кількість фотографій, то є сенс подумати над іншими можливими шляхами навчання.

У цій роботі використовується камера Intel Realsense F200, яка окрім кольорової камери має ще і сенсор глибини. Завдяки вбудованій у драйвер можливості отримувати синхронізовану карту глибини зображення є спосіб удосконалити та кардинально пришвидшити навчання класифікатора.

Карта глибини - матриця з цілими типу `uint16` (16 бітне ціле беззнакове число). 0 використовується для позначення неможливості визначити відстань.

Таким чином можна фільтрувати колірне зображення за відстанню та встановити межу 0.5м і усі пікселі, відстані до яких більша за встановлену границю, будуть мати чорний колір, який використовується для позначення пікселя, який не бере участь у навчанні.

2.4.3 Обробка відеопотоку камери глибини

Завдяки камері Intel Realsense F200 є можливість працювати з картами глибини зображення, проте для локалізації руки та подальшого аналізу жестів в цьому випадку дані про кольори насправді непотрібні. Вимикання колірного відеопотоку значно збільшує швидкість отримання зображення оскільки не виконується синхронізація двох відеопотоків, яка у драйвері навіть не оптимізована.

Обробка карт глибини ідентична до того, що вище було зазначено для кольорових зображень:

- а) Erode, dilate - для стабілізації геометричних контурів об'єктів;
- б) Розмиття - видалення шумів оскільки інфрачервоний сенсор цієї камери працює не зовсім стабільно та часто можна помітити випадкові шуми.

Далі у загальному випадку за допомоги SimpleBlobDetector з бібліотеки `opencv` можна отримати усі blob елементи зображення та провести фільтра-

цію по певним параметрам - площа, кількість геометричних дефектів контура об'єкта тощо.

2.5 Критерії оцінки якості роботи системи

Для оцінки адекватності роботи алгоритмів запропоновано ввести такі 2 критерії:

- а) Відсоток пікселів, що належать руці та були помічені алгоритмом як ті, що належать руці;
- б) Відсоток пікселів, які не належать руці, проте були помічені алгоритмом як ті, що належать.

Цих критеріїв буде достатньо для порівняння алгоритмів.

Перевірка алгоритмів буде проводитись в найкращих для кожного алгоритма умовах:

- а) Віднімання фону - рука рухається весь час на відео, сторонніх об'єктів, що рухаються, немає;
- б) Байесовський класифікатор - при тих самих умовах освітлення що і проводилось навчання та з умовою, що лице не знаходиться у полі зору камери (оскільки можна провести детекцію лица на відео і потім вилучити його з досліджуваних областей;
- в) Камера глибини - у полі зору на відстані до 0.5 метрів окрім руки інших об'єктів немає.

2.6 Висновки за розділом

РОЗДІЛ 3 ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

3.1 Результати роботи та аналіз оптимальних умов роботи алгоритмів

У роботі реалізовані такі модулі:

- а) `train_from_folder` - модуль навчання байесовського класифікатора з вказаної папки, в ній мають міститися кольорові фотографії та маски для кожної відповідно. Назви мають бути формату `[номер]_i.[формат]` для зображення, та `[номер]_m.[формат]` - маска;
- б) `train_from_realsense` - модуль навчання байесовського класифікатора за допомоги камери Intel Realsense.
- в) `process_opencv` - обробка відеопотоку за допомоги байесовського класифікатора та отримання відео за допомоги бібліотеки `opencv`. Бібліотека `opencv` накладає деякі обмеження на максимальну кількість фреймів за секунду, тому було вирішено реалізувати варіант з використанням драйвера Intel Realsense так як в ньому такого обмеження немає;
- г) `process_realsense` - обробка відеопотоку за допомоги байесовського класифікатора та отримання відео за допомоги драйвера Intel Realsense;
- д) `show_model_representation` - модуль, що призначений для читання байесовської моделі з файлу та виведення зображень ілюстрацій навчання;
- е) `filter_model` - модуль для роботи з моделями, в якому реалізовані усі зазначені у практичній частині перетворення матриці ймовірностей.

Усі програмні модулі виконані у консольному середовищі з виведенням відеопотоків в окремі вікна для ілюстрації роботи алгоритмів.

3.1.1 Віднімання фону

Віднімання фону достатньо показало достатньо непогані результати.



(а) Поточне кольорове зображення



(б) Маска виділеного переднього плану

Рисунок 3.1 – Ілюстрація роботи алгоритма віднімання фону

Значення першого критерія - 91.37

Значення другого критерія - 0.03



(а) Поточне кольорове зображення



(б) Маска виділеного переднього плану

Рисунок 3.2 – Ілюстрація роботи алгоритма віднімання фону

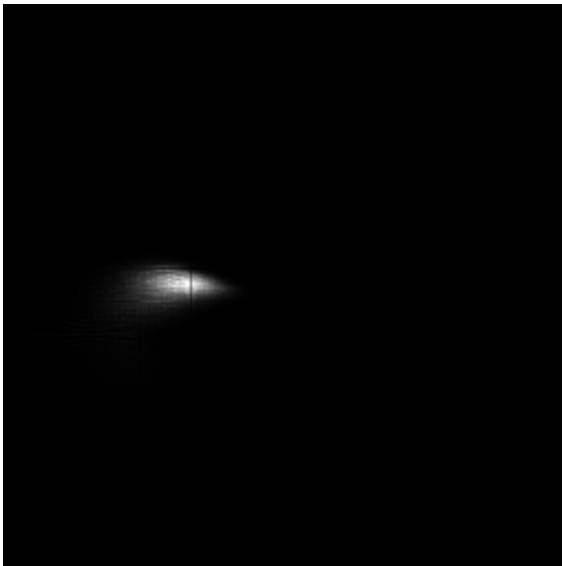
Значення першого критерія - 98.26

Значення другого критерія - 0.74

3.1.2 Байесовський класифікатор

3.1.2.1 Класична реалізація

Після навчання класифікатора можна отримати графічне представлення матриці ймовірностей як два зображення градації сірого.



(а) Матриця ймовірностей



(б) Матриця ненульових ймовірностей

Рисунок 3.3 – Результат навчання класифікатора

На Рис. 3.6а показана матриця ймовірностей в градації сірого. Ймовірності переводяться методом домноження їх на 255. На Рис. 3.6б показані усі елементи матриці ймовірностей, що мають ненульові значення.



(а) Кольорове зображення



(б) Відфільтроване

Рисунок 3.4 – Ілюстрація роботи байесовського класифікатора

Значення першого критерія - 84.62

Значення другого критерія - 4.68



(а) Кольорове зображення



(б) Відфільтроване

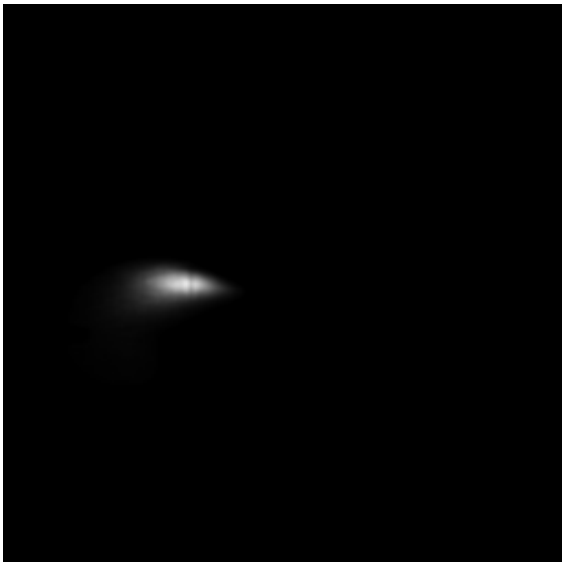
Рисунок 3.5 – Ілюстрація роботи байесовського класифікатора

Значення першого критерія - 76.21

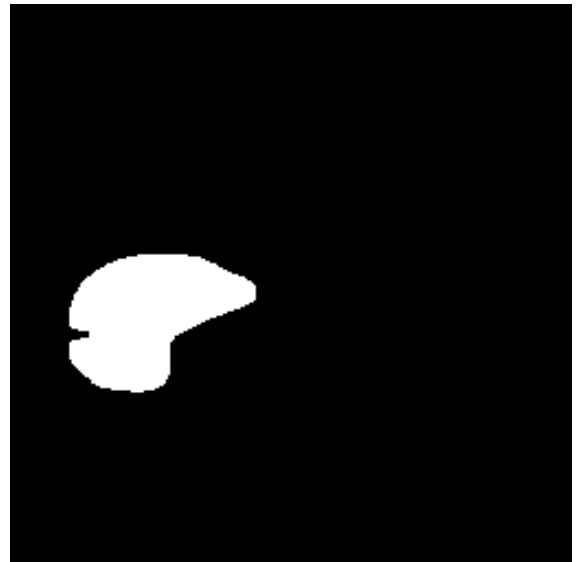
Значення другого критерія - 3.84

3.1.2.2 Корекція класифікатора

Застосувавши корекції ймовірностей матриця ймовірностей прийняла такий вид:



(а) Матриця ймовірностей



(б) Матриця ненульових ймовірностей

Рисунок 3.6 – Результат навчання класифікатора

Значення першого критерія покращились на майже на 3%. Значення другого критерія майже не змінилися.

3.1.3 Камера глибини

3.2 Порівняння алгоритмів

3.3 Обґрунтування вибору платформи та мови програмування

На початкових етапах виконання роботи основною мовою програмування для реалізації поставлених задач була мова Python. Ця мова була вибрана через простоту та зручність розробки, проте для реалізації байесовського класифікатора вона не підходить оскільки швидкість доступу до елементів матриці `np.ndarray` дуже низька, а класифікація пікселів побудована саме на ній.

Таким чином було вирішено зробити аналогічну реалізацію на C++ та в разі великої різниці у часі обробки класифікатором одного фрейма продовжити розробку на C++.

Реалізація байесовського класифікатора на мові Python в секунду обробляла майже 2 фрейма, в той час як C++ версія коливалася в межах 300-400 фреймів в секунду.

3.4 Висновки до розділу

РОЗДІЛ 4 ФУНКЦІОНАЛЬНО-ВАРТІСНИЙ АНАЛІЗ ПРОГРАМНОГО ПРОДУКТУ

У даному розділі проводиться оцінка основних характеристик програмного продукту, призначеного для обробки вхідного відеопотоку і локалізації людської руки. Інтерфейс користувача був розроблений за допомогою мови програмування C++ та opencv.

Програмний продукт призначено для використання на персональних комп'ютерах під управлінням операційних систем Windows або Linux.

Нижче наведено аналіз різних варіантів реалізації модулю з метою вибору оптимальної, з огляду при цьому як на економічні фактори, так і на характеристики продукту, що впливають на продуктивність роботи і на його сумісність з апаратним забезпеченням. Для цього було використано апарат функціонально-вартісного аналізу.

Функціонально-вартісний аналіз (ФВА) – це технологія, яка дозволяє оцінити реальну вартість продукту або послуги незалежно від організаційної структури компанії. Як прямі, так і побічні витрати розподіляються по продуктам та послугам у залежності від потрібних на кожному етапі виробництва обсягів ресурсів. Виконані на цих етапах дії у контексті метода ФВА називаються функціями.

Мета ФВА полягає у забезпеченні правильного розподілу ресурсів, виділених на виробництво продукції або надання послуг, на прямі та непрямі витрати. У даному випадку – аналізу функцій програмного продукту й виявлення усіх витрат на реалізацію цих функцій.

Фактично, цей метод працює за таким алгоритмом:

- визначається послідовність функцій, необхідних для виробництва продукту. Спочатку – всі можливі, потім вони розподіляються по двом групам: ті, що впливають на вартість продукту і ті, що не впливають. На цьому ж етапі оптимізується сама послідовність скороченням кроків, що не впливають на цінність і відповідно витрат.
- для кожної функції визначаються повні річні витрати й кількість робочих часів.

- для кожної функції на основі оцінок попереднього пункту визначається кількісна характеристика джерел витрат.
- після того, як для кожної функції будуть визначені їх джерела витрат, проводиться кінцевий розрахунок витрат на виробництво продукту.

4.1 Постановка задачі техніко-економічного аналізу

У роботі застосовується метод ФВА для проведення техніко-економічного аналізу розробки.

Відповідно цьому варто обрати і систему показників якості програмного продукту.

Технічні вимоги до продукту наступні:

- програмний продукт повинен функціонувати на персональних комп'ютерах зі стандартним набором компонент;
- забезпечувати високу швидкість обробки великих об'ємів даних у реальному часі;
- забезпечувати зручність і простоту взаємодії з користувачем або з розробником програмного забезпечення у випадку використання його як модуля;
- передбачати мінімальні витрати на впровадження програмного продукту.

4.1.1 Обґрунтування функцій програмного продукту

Головна функція F_0 – розробка програмного продукту, який аналізує процес за вхідними даними та будує його модель для подальшого прогнозування. Виходячи з конкретної мети, можна виділити наступні основні функції ПП:

F_1 вибір мови програмування;

F_2 інтерфейс користувача;

F_3 вибір камери для роботи.

Кожна з основних функцій може мати декілька варіантів реалізації.

- Функція F_1 :

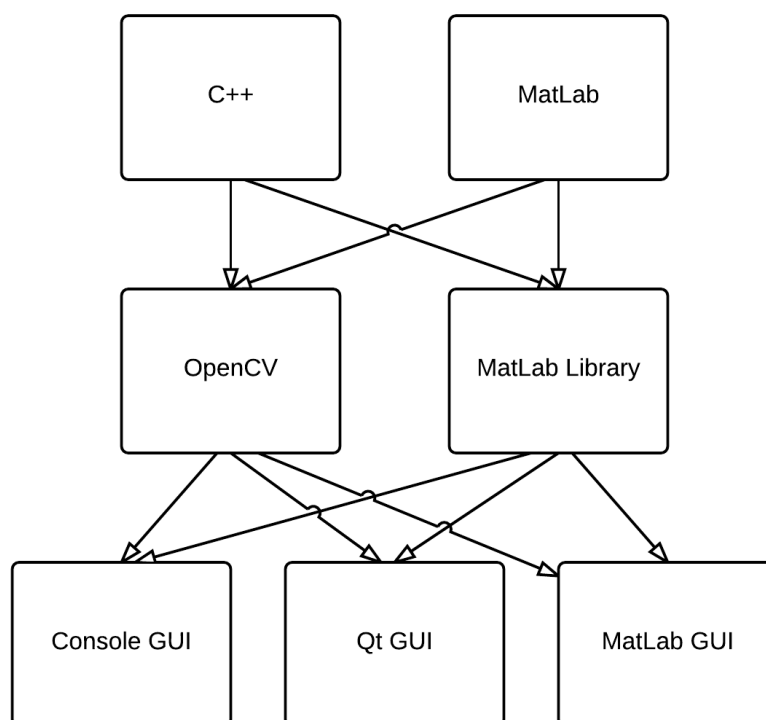


Рисунок 4.1 – Морфологічна карта

- а) мова програмування Python;
- б) мова програмування C++;
- Функція F2:
 - а) інтерфейс користувача, створений на opencv;
 - б) інтерфейс користувача як консольний додаток.
- Функція F3:
 - а) проста веб камера;
 - б) Intel Realsense F200.

4.1.2 Варіанти реалізації основних функцій

Варіанти реалізації основних функцій наведені у морфологічній карті системи (рис. 4.1). На основі цієї карти побудовано позитивно-негативну матрицю варіантів основних функцій (таблиця 4.1).

Морфологічна карта відражає всі можливі комбінації варіантів реалізації функцій, які складають повну множину варіантів ПП.

Таблиця 4.1 – Позитивно-негативна матриця

Основні функції	Варіанти реалізації	Переваги	Недоліки
F1	А	Займає менше часу при написанні коду	Менша швидкість написання коду
	Б	Швидкодіє, кро-сплатформений	Менша швидкість написання коду
F2	А	Проста розробка	Недостатній функціонал
	Б	Простота інтерфейса	Неможливість динамічної зміни робочих параметрів
F3	А	Доступність	Лише камера RGB
	Б	Потужний SDK, depth камера	Висока ціна

На основі аналізу позитивно-негативної матриці робимо висновок, що при розробці програмного продукту деякі варіанти реалізації функцій варто відкинути, тому, що вони не відповідають поставленим перед програмним продуктом задачам. Ці варіанти відзначені у морфологічній карті.

4.1.2.1 Функція F_1

Оскільки для нас важлива швидкість роботи, варіант а) має бути відкинутий.

4.1.2.2 Функція F_2

Оскільки для нас важлива простота, варіант а) має бути відкинутий.

4.1.2.3 Функція F_3

Вибір двох різних камер основна ідея проекту і тому вважаємо варіанти а) та б) гідними розгляду.

Таким чином, будемо розглядати такі варіанти реалізації ПП:

а) $F_{16} - F_{26} - F_{3a}$

б) $F_{16} - F_{26} - F_{36}$

Для оцінювання якості розглянутих функцій обрана система параметрів, описана нижче.

4.2 Обґрунтування системи параметрів ПП

На підставі даних про основні функції, що повинен реалізувати програмний продукт, вимог до нього, визначаються основні параметри виробу, що будуть використані для розрахунку коефіцієнта технічного рівня.

4.2.1 Опис параметрів

Для того, щоб охарактеризувати програмний продукт, будемо використовувати наступні параметри:

X_1 - швидкодія мови програмування;

X_2 - об'єм пам'яті для збереження даних;

X_3 - час обробки даних;

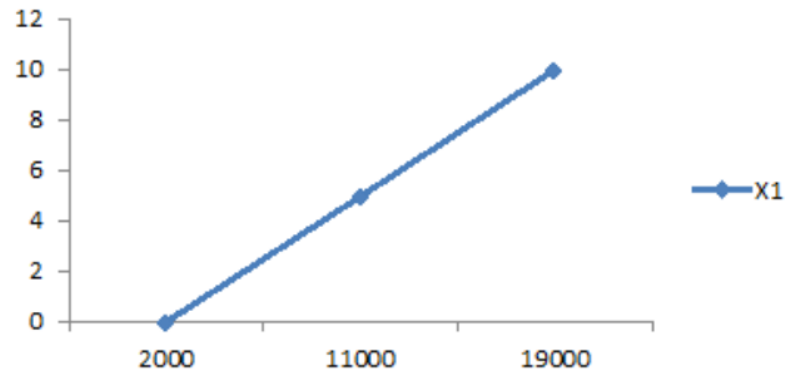
X_4 - потенційний об'єм програмного коду.

X_1 відображає швидкодію операцій залежно від обраної мови програмування.

X_2 відображає об'єм оперативної пам'яті персонального комп'ютера, що необхідний для збереження та обробки даних під час виконання програми.

X_3 відображає час, який витрачається на дії.

X_4 показує кількість програмного коду який необхідно створити безпосередньо розробнику.

Рисунок 4.2 – Швидкодія мови програмування X_1

4.2.2 Кількісна оцінка параметрів

Гірші, середні і кращі значення параметрів вибираються на основі вимог замовника й умов, що характеризують експлуатацію ПП як показано у табл. 4.2

Таблиця 4.2 – Основні параметри ПП

Назва параметра	Умовні позначення	Одиниці виміру	Значення параметра		
			гірші	середні	кращі
Швидкодія мови програмування	X_1	оп/мс	19000	11000	2000
Об'єм оперативної пам'яті	X_2	мб	32	16	8
Час обробки зображення	X_3	мс	1000	420	60
Об'єм програмного коду	X_4	строк	2000	1500	1000

За даними таблиці 4.2 будуються графічні характеристики параметрів: рис. 4.2 - рис. 4.5

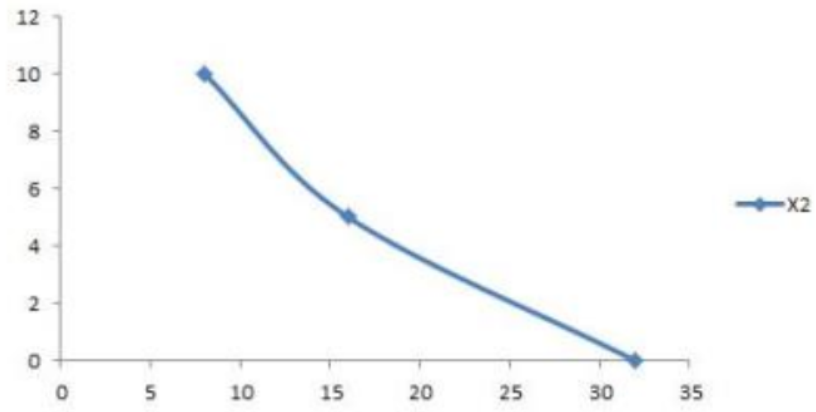


Рисунок 4.3 – Об'єм оперативної пам'яті X_2

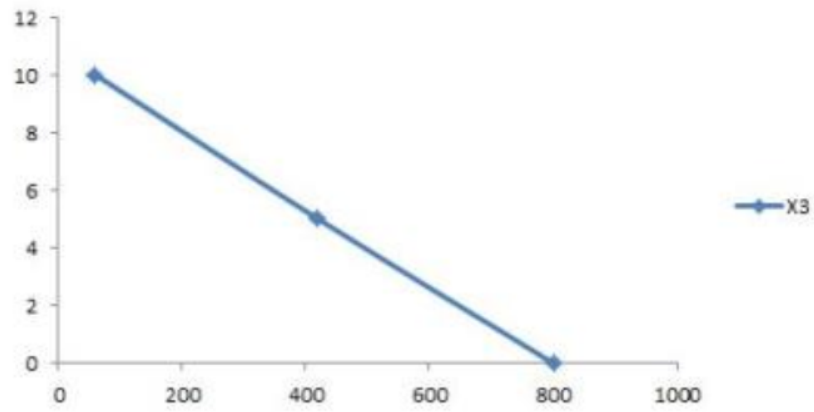


Рисунок 4.4 – Час, який витрачається на дії X_3

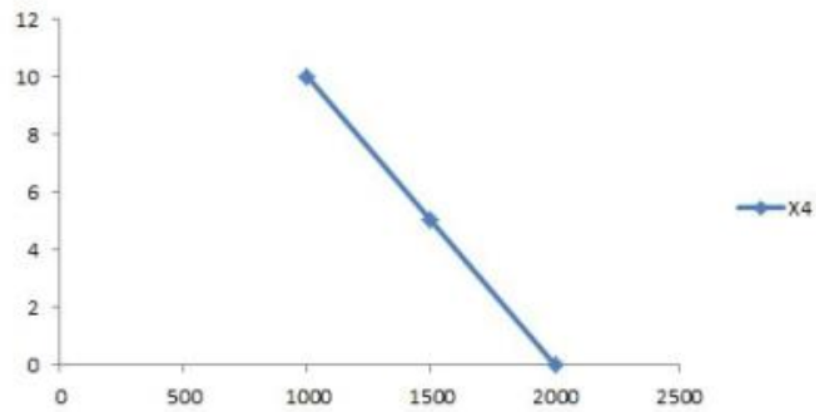


Рисунок 4.5 – Об'єм програмного коду X_4

4.2.3 Аналіз експертного оцінювання параметрів

Після детального обговорення й аналізу кожний експерт оцінює ступінь важливості кожного параметру для конкретно поставленої цілі – розробка програмного продукту, який дає найбільш точні результати при оптичному аналізі нотних листів.

Значимість кожного параметра визначається методом попарного порівняння. Оцінку проводить експертна комісія із 7 людей. Визначення коефіцієнтів значимості передбачає:

- визначення рівня значимості параметра шляхом присвоєння різних рангів;
- перевірку придатності експертних оцінок для подальшого використання;
- визначення оцінки попарного пріоритету параметрів;
- обробку результатів та визначення коефіцієнту значимості.

Результати експертного ранжування наведені у таблиці [4.3](#).

Таблиця 4.3 – Результати експертного ранжування параметрів

Позначення	Назва	Ранг за оцінкою експерта							Сума рангів R_i	Відх. Δ	Δ^2
		1	2	3	4	5	6	7			
X_1 , оп/мс	Швидкодія мови програмування	4	3	4	4	4	4	4	27	0.75	0.56
X_2 , мб	Об'єм оперативної пам'яті	4	4	4	3	4	3	3	25	-1.25	1.56
X_3 , мс	Час, який витрачається на дії	2	2	1	2	1	2	2	12	-14.25	203.06
X_4 , строк	Об'єм програмного коду	5	6	6	6	6	6	6	41	14.75	217.56
Разом		15	15	15	15	15	15	15	105	0	420.75

Для перевірки степені достовірності експертних оцінок, визначимо наступні параметри:

а) сума рангів кожного з параметрів і загальна сума рангів:

$$R = \sum_{i=1}^n R_i = \frac{Nn(n+1)}{2} = 105 \quad (4.1)$$

де n - число оцінюваних параметрів, N - число експертів

б) середня сума рангів:

$$T = \frac{1}{n} \sum_{i,j} R_{ij} = 24.5 \quad (4.2)$$

Числове значення, що визначає ступінь переваги i -го параметра над j -тим, a_{ij} визначається по формулі:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1.5, & X_i > X_j \\ 1.0, & X_i = X_j \\ 0.5, & X_i < X_j \end{cases} \quad (4.6)$$

З отриманих оцінок складемо матрицю $A = ||a_{ij}||$

Для кожного параметра зробимо розрахунок вагомості $K_B^{(i)}$ за наступною формулою:

$$K_B^{(i)} = \frac{b_i}{\sum_{j=1}^n b_j}, \text{ де } b_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad (4.7)$$

Відносні оцінки розраховуються декілька разів доти, поки наступні значення не будуть незначно відрізнятися від попередніх (менше 2%). На другому і наступних кроках відносні оцінки розраховуються за наступними формулами:

$$K_B^{(i)} = \frac{b'_i}{\sum_{j=1}^n b'_j}, \text{ де } b'_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot b_j \quad (4.8)$$

Як видно з таблиці 4.5, різниця значень коефіцієнтів вагомості не перевищує 2%, тому більшої кількості ітерацій не потрібно.

Таблиця 4.5 – Розрахунок вагомості параметрів

Ітерації					1		2		3	
Параметри X_i	X_1	X_2	X_3	X_4	b_i	$K_{\text{Б}}^{(i)}$	b_i^1	$K_{\text{Б}}^{(i)}$	b_i^2	$K_{\text{Б}}^{(i)}$
X_1	1.0	0.5	0.5	1.5	3.5	0.219	22.25	0.216	100	0.215
X_2	1.5	1.0	0.5	1.5	4.5	0.281	27.25	0.282	124.3	0.283
X_3	1.5	1.5	1.0	1.5	5.5	0.344	34.25	0.347	156	0.348
X_4	0.5	0.5	0.5	1.0	2.5	0.156	14.25	0.155	64.75	0.154
Всього:					16	1	98	1	445	1

4.3 Аналіз рівня якості варіантів реалізації функцій

Визначаємо рівень якості кожного варіанту виконання основних функцій окремо.

Абсолютні значення параметрів Х2(об'єм пам'яті для збереження даних) та Х1 (швидкодія мови програмування) відповідають технічним вимогам умов функціонування даного ПП.

Абсолютне значення параметра Х3 (час обробки даних) обрано не найгіршим (не максимальним), тобто це значення відповідає або варіанту а) 800 мс або варіанту б) 80мс.

Коефіцієнт технічного рівня для кожного варіанта реалізації ПП розраховується за формулою (4.9) Результати наведемо в таблиці 4.6

$$K_K(j) = \sum_{i=1}^n K_B^{(i,j)} B^{(i,j)} \quad (4.9)$$

де n - кількість параметрів, $K_B^{(i)}$ - коефіцієнт вагомості i -го параметра, $B^{(i,j)}$ - оцінка i -го параметра в балах.

Таблиця 4.6 – Розрахунок показників рівня якості варіантів реалізації основних функцій ПП

Основні функції	Варіант реалізації функції	Абсолютне значення параметра	Бальна оцінка параметра	Коефіцієнт вагомості параметра	Коефіцієнт рівня якості
$F_1(X_1)$	А	11000	3.6	0.215	0.774
$F_2(X_2)$	А	16	3.4	0.283	0.962
$F_3(X_3, X_4)$	А	800	2.4	0.348	0.835
	Б	80	1	0.154	0.154

За даними з таблиці 4.6 за формулою

$$K_K = K_{\text{ТУ}} [F_{1k}] + K_{\text{ТУ}} [F_{2k}] + \dots + K_{\text{ТУ}} [F_{zk}] \quad (4.10)$$

визначаємо рівень якості кожного з варіантів:

$$K_{K1} = 0.774 + 0.962 + 0.835 = 2.57$$

$$K_{K2} = 0.774 + 0.962 + 0.154 = 1.89$$

Як видно з розрахунків, кращим є перший варіант, для якого коефіцієнт технічного рівня має найбільше значення.

4.4 Економічний аналіз варіантів розробки ПП

Для визначення вартості розробки ПП спочатку проведемо розрахунок трудомісткості.

Всі варіанти включають в себе два окремих завдання:

- а) Розробка проекту програмного продукту;
- б) Розробка програмної оболонки;

Завдання 1 за ступенем новизни відноситься до групи А, завдання 2 – до групи Б. За складністю алгоритми, які використовуються в завданні 1 належать до групи 1; а в завданні 2 – до групи 3.

Для реалізації завдання 1 використовується довідкова інформація, а завдання 2 використовує інформацію у вигляді даних.

Проведемо розрахунок норм часу на розробку та програмування для кожного з завдань. Загальна трудомісткість обчислюється як

$$T_O = T_P \cdot K_{\Pi} \cdot K_{СК} \cdot K_M \cdot K_{СТ} \cdot K_{СТ.М} \quad (4.11)$$

де T_P - трудомісткість розробки ПП; K_{Π} - поправочний коефіцієнт; $K_{СК}$ - коефіцієнт на складність вхідної інформації; K_M - коефіцієнт рівня мови програмування; $K_{СТ}$ - коефіцієнт використання стандартних модулів і прикладних програм; $K_{СТ.М}$ - коефіцієнт стандартного математичного забезпечення.

Для першого завдання, виходячи із норм часу для завдань розрахункового характеру степеню новизни А та групи складності алгоритму 1, трудомісткість дорівнює: $T_P = 90$ людино-днів. Поправний коефіцієнт, який враховує вид нормативно-довідкової інформації для першого завдання: $K_{\Pi} = 1.7$. Поправний коефіцієнт, який враховує складність контролю вхідної та

вихідної інформації для всіх завдань рівний 1: $K_{СК} = 1$. Оскільки при розробці першого завдання використовуються стандартні модулі, врахуємо ц за допомогою коефіцієнта $K_{СТ} = 0.8$. Тоді, за формулою (4.11), загальна трудомісткість програмування першого завдання дорівнює:

$$T_1 = 90 \cdot 1.7 \cdot 0.8 = 122.4 \text{ людино-днів}$$

Проведемо аналогічні розрахунки для подальших завдань.

Для другого завдання (використовується алгоритм третьої групи складності, степінь новизни Б), тобто $T_P = 27$ людино-днів, $K_{П} = 0.9$, $K_{СК} = 1$, $K_{СТ} = 0.8$:

$$T_2 = 27 \cdot 0.9 \cdot 0.8 = 19.44 \text{ людино-днів}$$

Складаємо трудомісткість відповідних завдань для кожного з обраних варіантів реалізації програми, щоб отримати їх трудомісткість:

$$T_1 = (122.4 + 19.44 + 4.8 + 19.44) \cdot 8 = 1328.64 \text{ людино-годин}$$

$$T_2 = (122.4 + 19.44 + 6.91 + 19.44) \cdot 8 = 1345.52 \text{ людино-годин}$$

Найбільш високу трудомісткість має варіант 2. В розробці беруть участь два програмісти з окладом 7000 грн., один аналітик-програміст з окладом 9500 грн. Визначимо годинну зарплату за формулою:

$$C_h = \frac{M}{T_m t} \text{ грн} \quad (4.12)$$

де M – місячний оклад працівників; T_m – кількість робочих днів тиждень; t – кількість робочих годин в день.

$$C_h = \frac{7000 + 7000 + 9500}{3 \cdot 21 \cdot 8} = 46.62 \text{ грн} \quad (4.13)$$

Тоді, розрахуємо заробітну плату за формулою:

$$C_{зп} = C_h \cdot T_i \cdot K_{КД} \quad (4.14)$$

де C_h – величина погодинної оплати праці програміста; T_i – трудомісткість відповідного завдання; K_{KD} – норматив, який враховує додаткову заробітну плату.

Зарплата розробників за варіантами становить:

$$a) C_{зп} = 46.62 \cdot 1328.64 \cdot 1.2 = 74340.57 \text{ грн}$$

$$б) C_{зп} = 46.62 \cdot 1345.52 \cdot 1.2 = 75285.04 \text{ грн}$$

Відрахування на єдиний соціальний внесок в залежності від групи професійного ризику (II клас) становить 22%:

$$a) C_{від} = C_{зп} \cdot 0.22 = 74340.57 \cdot 0.22 = 16354.92 \text{ грн}$$

$$б) C_{від} = C_{зп} \cdot 0.22 = 75285.04 \cdot 0.22 = 16562.70 \text{ грн}$$

Тепер визначимо витрати на оплату однієї машино-години — C_M

Так як одна ЕОМ обслуговує одного програміста з окладом 7000 грн., з коефіцієнтом зайнятості 0.2 то для однієї машини отримаємо:

$$C_{Г} = 12 \cdot M \cdot K_3 = 12 \cdot 7000 \cdot 0.2 = 16800 \text{ грн}$$

З урахуванням додаткової заробітної плати:

$$C_{зп} = C_{Г} \cdot (1 + K) = 16800 \cdot (1 + 0.2) = 20160 \text{ грн}$$

Відрахування на єдиний соціальний внесок:

$$C_{від} = C_{зп} \cdot 0.22 = 20160 \cdot 0.22 = 4435.2 \text{ грн}$$

Амортизаційні відрахування розраховуємо при амортизації 25% та вартості ЕОМ – 20000 грн.

$$C_a = K_{тм} \cdot K_a \cdot Ц_{пр} = 1.15 \cdot 0.25 \cdot 20000 = 5750 \text{ грн}$$

де $K_{тм}$ – коефіцієнт, який враховує витрати на транспортування та монтаж приладу у користувача; K_a – річна норма амортизації; $Ц_{пр}$ – договірна ціна приладу.

Витрати на ремонт та профілактику розраховуємо як:

$$C_p = K_{тм} \cdot Ц_{пр} \cdot K_p = 1.15 \cdot 20000 \cdot 0.05 = 1150 \text{ грн}$$

де K_p – відсоток витрат на поточні ремонти.

Ефективний годинний фонд часу ПК за рік розраховуємо за формулою:

$$T_{\text{еф}} = (D_k - D_b - D_c - D_p) \cdot t \cdot K_b = \\ = (365 - 104 - 8 - 16) \cdot 8 \cdot 0.9 = 1706.4 \text{ годин}$$

де D_k – календарна кількість днів у році; D_b, D_c – відповідно кількість вихідних та святкових днів; D_p – кількість днів планових ремонтів устаткування; t – кількість робочих годин в день; K_b – коефіцієнт використання приладу у часі протягом зміни.

Витрати на оплату електроенергії розраховуємо за формулою:

$$C_{\text{ел}} = T_{\text{еф}} \cdot N_c \cdot K_z \cdot \Pi_{\text{ен}} = 1706.4 \cdot 0.156 \cdot 0.9733 \cdot 2.018 = 523.82 \text{ грн}$$

де N_c – середньо-споживча потужність приладу; K_z – коефіцієнтом зайнятості приладу; $\Pi_{\text{ен}}$ – тариф за 1 КВт-годину електроенергії.

Накладні витрати розраховуємо за формулою:

$$C_n = \Pi_{\text{пр}} \cdot 0.67 = 20000 \cdot 0.67 = 13400 \text{ грн}$$

Тоді, річні експлуатаційні витрати будуть:

$$C_{\text{екс}} = C_{\text{зп}} + C_{\text{від}} + C_a + C_p + C_{\text{ел}} + C_n$$

$$C_{\text{екс1}} = 20160 + 4435.2 + 5750 + 1150 + 523.82 + 13400 = 45419.02 \text{ грн}$$

$$C_{\text{екс2}} = 20160 + 4435.2 + 13586 + 1150 + 472.84 + 13400 = 53204.03 \text{ грн}$$

Собівартість однієї машино-години ЕОМ дорівнюватиме:

$$C_{\text{м-г1}} = C_{\text{екс}} / T_{\text{еф}} = 45419.02 / 1706.4 = 26.61 \text{ грн/год}$$

$$C_{\text{м-г1}} = C_{\text{екс}} / T_{\text{еф}} = 53204.03 / 1706.4 = 31.17 \text{ грн/год}$$

В нашому випадку всі роботи пов'язані з розробкою програмного продукту ведуться на ЕОМ. Витрати на оплату машинного часу розраховуються за наступною формулою:

$$C_M = C_{M-Г} \cdot T$$

В залежності від обраного варіанта реалізації, витрати на оплату машинного часу складають:

а) $C_M = 26.61 \cdot 1328.64 = 35355.11$ грн

б) $C_M = 31.17 \cdot 1345.52 = 41939.85$ грн

Накладні витрати складають 67% від заробітної плати:

$$C_H = C_{зп} \cdot 0.67$$

а) $C_H = 74340.57 \cdot 0.67 = 49808.18$ грн

б) $C_H = 75285.04 \cdot 0.67 = 50440.98$ грн

Отже, вартість розробки ПП за варіантами становить:

$$C_{пп} = C_{зп} + C_{від} + C_M + C_H$$

а) $C_{пп} = 74340.57 + 27335.02 + 35355.11 + 49808.18 = 186838.88$ грн

б) $C_{пп} = 75285.04 + 27682.31 + 41939.85 + 50440.98 = 195348.18$ грн

4.5 Вибір кращого варіанта ПП техніко-економічного рівня

Розрахуємо коефіцієнт техніко-економічного рівня за формулою:

$$K_{терj} = K_{Кj} / C_{Фj} \quad (4.15)$$

а) $K_{тер1} = 2.57/186838.88 = 1.37 \cdot 10^{-5}$;

б) $K_{тер2} = 1.89/195348.18 = 0.96 \cdot 10^{-5}$;

Як бачимо, найбільш ефективним є перший варіант реалізації програми з коефіцієнтом техніко-економічного рівня $K_{тер1} = 1.37 \cdot 10^{-5}$.

4.6 Висновки до розділу

В даному розділі проведено повний функціонально-вартісний аналіз ПП, який було розроблено в рамках дипломного проекту. Процес аналізу можна умовно розділити на дві частини.

В першій з них проведено дослідження ПП з технічної точки зору: було визначено основні функції ПП та сформовано множину варіантів їх реалізації; на основі обчислених значень параметрів, а також експертних оцінок їх важливості було обчислено коефіцієнт технічного рівня, який і дав змогу визначити оптимальну з технічної точки зору альтернативу реалізації функцій ПП.

Другу частину ФВА присвячено вибору із альтернативних варіантів реалізації найбільш економічно обґрунтованого. Порівняння запропонованих варіантів реалізації в рамках даної частини виконувалось за коефіцієнтом ефективності, для обчислення якого були обчислені такі допоміжні параметри, як трудомісткість, витрати на заробітну плату, накладні витрати.

Після виконання функціонально-вартісного аналізу програмного комплексу що розроблюється, можна зробити висновок, що з альтернатив, що залишились після першого відбору двох варіантів виконання програмного комплексу оптимальним є перший варіант реалізації програмного продукту. У нього виявився найкращий показник техніко-економічного рівня якості $K_{\text{тер}} = 0.16 \cdot 10^{-4}$.

Цей варіант реалізації програмного продукту має такі параметри:

- мова програмування – C++;
- інтерфейс користувача у консольному варіанті;
- камера RGB;

Даний варіант виконання програмного комплексу дає користувачу зручний інтерфейс, непоганий функціонал та швидкодію.

ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

У ході роботи були реалізовані 3 кардинально різні підходи:

- а) Віднімання фону;
- б) Байесовський класифікатор;
- в) Аналіз depth відеопотоку.

Віднімання фону та використання камери глибини дали дуже точні результати по обом критеріям, проте у загальному випадку віднімання фону саме в задачі локалізації руки на відео використовувати недоцільно через прив'язку до фону та рухомих об'єктів. Обробка відеопотоку камери глибини також дає можливість точно виділити людську руку, проте постають проблеми ціни таких камер та синхронізації depth та кольорового відеопотоків.

Реалізація байесовського класифікатора дозволяє зменшити кількість обчислень та використовувати його на веб камерах бюджетних ноутбуків.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ogihara, Akio. Hand Region Extraction by Background Subtraction with Renewable Background for Hand Gesture Recognition / Akio Ogihara // International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communications. — 2006. — Pp. 227 – 230.
2. Taylor, Michael J. — Adaptive skin segmentation via feature-based face detection. — Master's thesis, School of Computer Science, 2014.
3. Adaptive skin detection under unconstrained lightning conditions using a bigaussian model and illumination estimation / Jian-Hua Zheng, Chong-Yang Hao, Yang-Yu Fan, Xian-Yong Zang // Image Anal Stereol. — 2005. — Vol. 24, no. 3. — Pp. 21–33.
4. Георгиевич, Мурлин Алексей. Алгоритм и методы обнаружения и распознавания жестов руки на видео в режиме реального времени / Мурлин Алексей Георгиевич, Пиотровский Дмитрий Леонидович, Руденко Елизавета Алексеевна // Научный журнал КубГАУ. — 2014. — Т. 3, № 97. — С. 10.
5. Н.Х., Фан. Распознавание жестов на видеопоследовательности в режиме реального времени на основе применения метода Виолы-Джонса, алгоритма CAMSHIFT, вейвлет-преобразования и метода главных компонент / Фан Н.Х., Буй Т.Т., Спицын В.Г. // Управление, вычислительная техника и информатика. — 2013. — Pp. 103–110.
6. Kandel, Eric. Principles of Neural Science / Eric Kandel, James Schwartz, Thomas Jessell. — 4 edition. — McGraw-Hill, New York, 2000. — Pp. 577–80.
7. Eroding and Dilating. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://docs.opencv.org/2.4/doc/tutorials/imgproc/erosion_dilatation/erosion_dilatation.html.
8. Bilateral Filtering for Gray and Color Images. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL_COPIES/MANDUCHI1/Bilateral_Filtering.html.

9. Zivkovic, Zoran. Efficient adaptive density estimation per image pixel for the task of background subtraction / Zoran Zivkovic, Ferdinand van der Heijden // Pattern recognition letters. — 2006. — Vol. 27, no. 7. — P. 773–780.
10. Zivkovic, Zoran. Improved adaptive gaussian mixture model for background subtraction / Zoran Zivkovic // Proceedings of the 17th International Conference. — 2004. — Vol. 2, no. 5. — P. 28–31.

ДОДАТОК А. ІЛЮСТРАТИВНІ МАТЕРІАЛИ ДОПОВІДІ

Розпізнавання людської руки на відео

студент 4-го курсу
КА-21, Одобеску Владислав

Інститут прикладного системного аналізу
керівник: доц. Дідковська Марина Віталіївна



1 / 10

студент 4-го курсу КА-21, Одобеску Владислав

Розпізнавання людської руки на відео

Актуальність роботи



Сфери використання:

- Computer-human interaction systems;
- Робота з мовою жестів;
- Динамічні рухові додатки.

Актуальність роботи полягає у тому, що:

- Виводить взаємодію з ПК на новий рівень;
- У зв'язку з розвиненням сфери віртуальної та доповненої реальності, з'являється потреба у винайденні оптимальних шляхів взаємодії користувача та системи;
- Використовується нова камера Intel Realsense F200.



2 / 10

студент 4-го курсу КА-21, Одобеску Владислав

Розпізнавання людської руки на відео

Постановка задачі



Мета роботи

Розробка системи розпізнавання людської руки на відео

Об'єкт дослідження

Цифровий відеопотік з RGB чи depth камери

Предмет дослідження

Методи локалізації людської руки на відео



3 / 10

студент 4-го курсу КА-21, Одобеску Владислав

Розпізнавання людської руки на відео

Постановка задачі



Поставлені задачі

- попередня обробка зображення:
 - видалення шумів
 - згладжування
- обробка RGB чи depth зображення та виділення об'єктів, що можна класифікувати як людська рука



4 / 10

студент 4-го курсу КА-21, Одобеску Владислав

Розпізнавання людської руки на відео

Підходи



Видалення шумів

- морфологічні операції над зображенням (erode та dilate)
- згладжування (медіаною, Гауса)

Виділення людської руки

- Віднімання фону;
- Байесовський класифікатор;
- Обробка відеопотоку з depth камери;

Алгоритми



- 1 Віднімання фону (медіана, Гауса)
- 2 Байесовський класифікатор
 - 1 Класична реалізація
 - 2 Поправки ймовірностей
 - 3 Удосконалений метод навчання
- 3 Розпізнавання на основі сенсора глибини (Intel Realsense F200 camera)

Результати роботи



Висновки



- Проаналізовано існуючі методи попередньої обробки зображення;
- Реалізовано та проведено порівняльний аналіз трьох підходів з урахуванням обмежень на середовище роботи камер;
- Розроблена система:
 - проводить попередню обробку зображення та видаляє випадкові шуми;
 - виділяє ділянки на яких ймовірно знаходиться людська рука та трансформує зображення у бінарне;
 - проводить обробку цих ділянок.

Шляхи подальшого розвитку



- комбінування деяких підходів;
- інтеграція цієї системи у систему по розпізнаванню статичних та динамічних жестів;
- оптимізація трудомістих обчислень з метою кращого пристосування системи для обробки real-time відеопотоку.



9 / 10

студент 4-го курсу КА-21, Одобеску Владислав

Розпізнавання людської руки на відео

Дякую за увагу.



10 / 10

студент 4-го курсу КА-21, Одобеску Владислав

Розпізнавання людської руки на відео

ДОДАТОК Б. ЛІСТИНГ КОДУ

appendicies/code/background_subtraction/background_subtraction.cpp

```

1  #include <opencv2/opencv.hpp>

    using namespace cv;
    using namespace std;

6

    int main(int argc, char* argv[])
    {
        cv::VideoCapture capture(0);

11        namedWindow("Frame");
        namedWindow("Background");
        namedWindow("FG_Mask_MOG2");

        Mat kernel = getStructuringElement(CV_SHAPE_ELLIPSE, Size(5, 5));
16        Mat frame;
        Mat background;
        Mat fgMaskMOG2;
        Ptr<BackgroundSubtractorMOG2> pMOG2 = createBackgroundSubtractorMOG2(1000,
30, false);
        pMOG2->setVarInit(15);
        pMOG2->setVarMin(4);
21        pMOG2->setVarMax(75);

        unsigned n = 0;

26        while( capture.read(frame) ){

            pMOG2->apply(frame, fgMaskMOG2);
            pMOG2->getBackgroundImage(background);

31            dilate(fgMaskMOG2, fgMaskMOG2, kernel);
            erode(fgMaskMOG2, fgMaskMOG2, kernel);

            imshow("Frame", frame);
            imshow("Background", background);
36            imshow("FG_Mask_MOG2", fgMaskMOG2);

            int key = cv::waitKey(1) & 0xFF;
            if (key == 27)
                break;
41            else if (key == 32){
                ++n;

```

```

        imwrite("frame"+std::to_string(n)+".png", frame);
        imwrite("hand"+std::to_string(n)+".png", fgMaskMOG2);
    }
46     }
    destroyAllWindows();
    return 0;
}

```

appendicies/code/bayesian_classifier/train_from_folder.cpp

```

1  #include <fstream>
    #include <iostream>

    #include <experimental/filesystem>

6  #include <opencv2/opencv.hpp>

    #include "classifier.hpp"

11 namespace fs = std::experimental::filesystem;

    int main(int argc, char* argv[]) {
        assert(argc>3);

16     Bayesian bayesian(256, 256);

        std::string output_folder = argv[1];
        std::string train_folder = argv[2];
        std::string filename = argv[3];

21     fs::path path_to_output_folder(output_folder);
        path_to_output_folder/=filename;
        fs::path path_to_train_folder(train_folder);

26     bayesian.train_from_folder<0,1>(path_to_train_folder);

        auto bayesian_m = bayesian.model();

        std::ofstream file(path_to_output_folder.string());
31     bayesian_m.save_to_file(file);
        bayesian_m.gaussian_blur(5,5,1,1);
        cv::Mat color_map = bayesian_m.representation();
        cv::imwrite(path_to_output_folder.string() + ".jpg",color_map);

36     cv::imshow("color_map",color_map);
        cv::waitKey(0);

```

```
    return 0;
}
```

appendicies/code/bayesian_classifier/train_from_realsense.cpp

```

#include <string>

#include "classifier.hpp"

4
#define DEBUG

const uint16_t height = 480;
const uint16_t width = 640;

9
std::string color_window = "color";

auto struct_element = cv::getStructuringElement(cv::MorphShapes::MORPH_RECT,
        cv::Size(4, 4));

14
// in : cv::Mat of uint16_t
std::pair<double, double> find_min_max(cv::Mat in, bool ignoreZero = true) {
    double min = std::numeric_limits<double>::max(), max =
std::numeric_limits<double>::min();
    if (ignoreZero) {
19        for (int column = 0; column < in.cols; column++)
            for (int row = 0; row < in.rows; row++) {
                double elem = in.at<uint16_t>(row, column);
                if (elem > max)
                    max = elem;
24                if (elem > 0 && elem < min)
                    min = elem;
            }
        // if all elements were ignored ( all zeros )
        if (min == std::numeric_limits<double>::max() && max ==
std::numeric_limits<double>::min()){
29            min = 0;
            max = 0;
        }
    }
    else {
34        for (int column = 0; column < in.cols; column++)
            for (int row = 0; row < in.rows; row++) {
                double elem = in.at<uint16_t>(row, column);
                if (elem > max)
                    max = elem;

```



```

39         if (elem < min)
            min = elem;
        }
    }
    return std::make_pair(min, max);
44 };

void filter_color_image_by_depth(cv::Mat &color, cv::Mat &depth, uint16_t
max_distance) {
    assert(color.rows == depth.rows && color.cols == depth.cols);
    for (int column = 0; column < color.cols; column++)
49     for (int row = 0; row < color.rows; row++) {
        uint16_t current_depth = depth.at<uint16_t>(row, column);
        if (current_depth > max_distance | current_depth == 0)
            color.at<cv::Vec3b>(row, column) = cv::Vec3b(0, 0, 0);
    }
54 }

int main(int argc, char* argv[]) {
    assert(argc>2);
    std::string filepath = argv[1];
59    size_t distance = std::stoull(argv[2]);

    cv::namedWindow(color_window, 1);

    Bayesian b(256,256);
64

    rs::device *dev = nullptr;

    try {
        rs::context ctx;
69

        auto devices_count = ctx.get_device_count();
        if (devices_count == 0) {
            std::cout << "No devices found" << std::endl;
            return -1;
74        }

        dev = ctx.get_device(0);

        dev->set_option(rs::option::f200_laser_power, 15);
79        dev->set_option(rs::option::f200_motion_range, 50);
        dev->set_option(rs::option::f200_confidence_threshold, 15);
        dev->set_option(rs::option::f200_filter_option, 6);
        dev->set_option(rs::option::f200_accuracy, 3);

84        dev->enable_stream(rs::stream::depth, width, height, rs::format::z16, 30);

```

```

        dev->enable_stream(rs::stream::color, width, height, rs::format::bgr8,
30);
        dev->start();

        cv::Mat depth_frame;
        cv::Mat color_frame;
89         cv::Mat hsv_frame;

        while (true) {
            dev->wait_for_frames();
94 #ifdef DEBUG
                std::chrono::duration<double> duration;
                std::chrono::system_clock::time_point start =
                    std::chrono::system_clock::now();
            #endif

                depth_frame = cv::Mat(height, width, CV_16UC1, const_cast<void
*>(dev->get_frame_data(rs::stream::depth)));
99                 color_frame = cv::Mat(height, width, CV_8UC3, const_cast<void
*>(dev->get_frame_data(rs::stream::color_aligned_to_depth)));
            #ifdef DEBUG
                duration = std::chrono::system_clock::now() - start;
                std::cout << "time_elapsed_for_getting_frames" << duration.count()
<< std::endl;
                start = std::chrono::system_clock::now();
104 #endif

                cv::blur(color_frame, color_frame, cv::Size(3, 3));

                cv::erode(depth_frame, depth_frame, struct_element);
                //cv::dilate(depth_frame, depth_frame, struct_element);
109
            #ifdef DIST_DEBUG
                auto minmax = find_min_max(depth_frame);
                std::cout << "min=" << minmax.first << " | max=" << minmax.second
<< std::endl;
            #endif
114

                filter_color_image_by_depth(color_frame, depth_frame, distance);

            #ifdef DEBUG
119                 duration = std::chrono::system_clock::now() - start;
                std::cout << "time_elapsed_for_image_processing_frames" <<
                    duration.count() << std::endl;
            #endif

                cv::imshow(color_window, color_frame);
124

```

```

        // i'm rly mad cuz this function returns every run different codes
just wtf O_O
        int key = cv::waitKey(30) & 0xFF;
        if (key == 27)
129             break;
        else if (key == 32){
            cv::cvtColor(color_frame, hsv_frame, cv::COLOR_BGR2HSV);
            b.train_from_image<0,1>(hsv_frame, hsv_pixel::black);
        }
134
    }
    auto b_model = b.model();
    std::ofstream out(filepath);
    b_model.save_to_file(out);
139    dev->stop();
}
catch (rs::error error) {
    std::cout << error.what() << std::endl;
    return -1;
144 }
return 0;
}

```

appendicies/code/bayesian_classifier/process_opencv.cpp

```

#include <fstream>
#include <chrono>
3
#include <experimental/filesystem>

#include <opencv2/opencv.hpp>

8 #include "classifier.hpp"

namespace fs = std::experimental::filesystem;

std::string color_window = "color";
13 std::string classified_window = "color";

int main(int argc, char* argv[]) {
    assert(argc>3);

18    std::string filepath = argv[1];
    size_t camera = std::stoll(argv[2]);
    double treshold = std::stod(argv[3]);

```

```

23     std::ifstream file(filepath);

    BayesianModel b_m = std::move(BayesianModel::load_from_file(file));

    cv::imshow("repr",b_m.representation());
28     cv::imshow("gen_repr",b_m.general_representation());

    cv::VideoCapture cap(camera);
    cap.set(CV_CAP_PROP_FPS, 30);

33

    cv::Mat color_frame;
    cv::Mat hsv_frame;
    cv::Mat classified_frame;
38     cv::Mat result;
    cv::Mat struct_element =
    cv::getStructuringElement(cv::MORPH_ELLIPSE,cv::Size(10,10));

    size_t n = 0;
    std::chrono::system_clock::time_point start =
    std::chrono::system_clock::now();
43     std::chrono::high_resolution_clock::time_point start_time;
    std::chrono::duration<double> duration;
    while(cap.isOpened()){
        start_time = std::chrono::high_resolution_clock::now();
        cap >> color_frame;
48     cv::cvtColor(color_frame,hsv_frame,cv::COLOR_BGR2HSV);
        duration = std::chrono::high_resolution_clock::now() - start_time;
        std::cout << duration.count() << std::endl;

        start_time = std::chrono::high_resolution_clock::now();
53     classified_frame = b_m.classify<0,1>(hsv_frame,treshold);
        duration = std::chrono::high_resolution_clock::now() - start_time;
        std::cout << duration.count() << std::endl<< std::endl<< std::endl;

        //cv::GaussianBlur(classified,result,cv::Size(5,5),0.2,0.2);
58     //cv::medianBlur(result,result,5);

        //cv::dilate(result,result,struct_element);
        //cv::erode(result,result,struct_element);
63     //cv::imshow("result",result);

    cv::imshow(color_window,color_frame);
    cv::imshow(classified_window,classified_frame);

```

```

68     int key = cv::waitKey(1) & 0xFF;
        if (key == 27)
            break;
        n++;
    }
73     duration = std::chrono::system_clock::now() - start;
    std::cout << "Average_FPS" << n/duration.count() << std::endl;

    return 0;
}

```

appendicies/code/bayesian_classifier/process_realsense.cpp

```

#include <string>

3 #include "classifier.hpp"

#define DEBUG

const uint16_t height = 480;
8 const uint16_t width = 640;

std::string color_window = "color";
std::string classified_window = "color";

13 auto struct_element = cv::getStructuringElement(cv::MorphShapes::MORPH_RECT,
    cv::Size(4, 4));

size_t n = 0;

// in : cv::Mat of uint16_t
18 std::pair<double, double> find_min_max(cv::Mat in, bool ignoreZero = true) {
    double min = std::numeric_limits<double>::max(), max =
    std::numeric_limits<double>::min();
    if (ignoreZero) {
        for (int column = 0; column < in.cols; column++)
            for (int row = 0; row < in.rows; row++) {
23                 double elem = in.at<uint16_t>(row, column);
                    if (elem > max)
                        max = elem;
                    if (elem > 0 && elem < min)
                        min = elem;
28             }
        // if all elements were ignored ( all zeros )
        if (min == std::numeric_limits<double>::max() && max ==
        std::numeric_limits<double>::min()) {

```

```

        min = 0;
        max = 0;
33     }
    }
    else {
        for (int column = 0; column < in.cols; column++)
            for (int row = 0; row < in.rows; row++) {
38                double elem = in.at<uint16_t>(row, column);
                if (elem > max)
                    max = elem;
                if (elem < min)
                    min = elem;
43            }
        }
        return std::make_pair(min, max);
    };

48 void filter_color_image_by_depth(cv::Mat &color, cv::Mat &depth, uint16_t
    max_distance) {
    assert(color.rows == depth.rows && color.cols == depth.cols);
    for (int column = 0; column < color.cols; column++)
        for (int row = 0; row < color.rows; row++) {
            uint16_t current_depth = depth.at<uint16_t>(row, column);
53            if (current_depth > max_distance | current_depth == 0)
                color.at<cv::Vec3b>(row, column) = cv::Vec3b(0, 0, 0);
        }
    }

58 int main(int argc, char* argv[]) {
    assert(argc>2);

    std::string filepath = argv[1];
    std::cout << argv[2];
63    double treshold = std::stod(argv[2]);

    std::ifstream file(filepath);

    BayesianModel b_m = std::move(BayesianModel::load_from_file(file));

68    cv::imshow("repr", b_m.representation());
    cv::imshow("gen_repr", b_m.general_representation());

73    cv::namedWindow(color_window, 1);
    cv::namedWindow(classified_window, 1);

    rs::device *dev = nullptr;

```

```

78     try {
        rs::context ctx;

        auto devices_count = ctx.get_device_count();
        if (devices_count == 0) {
83             std::cout << "No devices found" << std::endl;
            return -1;
        }

        dev = ctx.get_device(0);

88        dev->enable_stream(rs::stream::color, width, height, rs::format::bgr8,
        30);
        dev->start();

        cv::Mat color_frame;
93        cv::Mat hsv_frame;
        cv::Mat classified_frame;
        cv::Mat kernel =
        cv::getStructuringElement(CV_SHAPE_ELLIPSE, cv::Size(5, 5));

        while (true) {
98            dev->wait_for_frames();
            #ifdef DEBUG
                std::chrono::duration<double> duration;
                std::chrono::system_clock::time_point start =
                std::chrono::system_clock::now();
            #endif
103            color_frame = cv::Mat(height, width, CV_8UC3, const_cast<void*>
            *(dev->get_frame_data(rs::stream::color)));
            #ifdef DEBUG
                duration = std::chrono::system_clock::now() - start;
                std::cout << "time elapsed for getting frames" << duration.count()
                << std::endl;
                start = std::chrono::system_clock::now();
108 #endif

            cv::cvtColor(color_frame, hsv_frame, cv::COLOR_BGR2HSV);
            classified_frame = std::move(b_m.classify<0, 1>(hsv_frame, threshold));
            cv::dilate(classified_frame, classified_frame, kernel);
113            cv::erode(classified_frame, classified_frame, kernel);

            #ifdef DEBUG
                duration = std::chrono::system_clock::now() - start;
                std::cout << "time elapsed for image processing" << duration.count()
                << std::endl;

```

```

118 #endif

        cv::imshow(color_window, color_frame);
        cv::imshow(classified_window, classified_frame);

123         // i'm rly mad cuz this function returns every run different codes
        just wtf O_O
        int key = cv::waitKey(30) & 0xFF;
        if (key == 27)
            break;
128         else if (key == 32) {
            ++n;
            cv::imwrite("color" + std::to_string(n) + ".png", color_frame);
            cv::imwrite("mask" + std::to_string(n) + ".png",
classified_frame);
            }
133     }
    dev->stop();
}
catch (rs::error error) {
    std::cout << error.what() << std::endl;
138     return -1;
}
return 0;
}

```

appendicies/code/bayesian_classifier/filter_model.cpp

```

#include <fstream>
#include <iostream>

3  #include <opencv2/opencv.hpp>

#include "classifier.hpp"

8  int main(int argc, char* argv[]){
    assert(argc>4);
    std::string in_filepath = argv[1];
    std::string out_filepath = argv[2];
    std::string command = argv[3];
13  std::vector<std::string> params;
    for(size_t i = 4; i < argc; ++i)
        params.push_back(std::string(argv[i]));

    BayesianModel b_m = std::move(BayesianModel::load_from_file(in_filepath));

18

```



```

cv::imshow("before_repr", b_m.representation());
cv::imshow("before_gen_repr", b_m.general_representation());

if(command == "normalize") {
23     b_m.normalize_probabilities();
}
else if(command == "threshold"){

b_m.threshold_small_probabilities_blobs(std::stoull(params[0]),std::stod(params[1]));
}
28     else if(command == "filter"){

b_m.filter_random_probabilities(std::stoull(params[0]),std::stod(params[1]));
}
else if(command == "erode"){
33     b_m.erode(std::stoull(params[0]),std::stoull(params[1]));
}
else if(command == "dilate"){
    b_m.dilate(std::stoull(params[0]),std::stoull(params[1]));
}
else if(command == "blur"){
38     b_m.blur(std::stoull(params[0]),std::stoull(params[1]));
}
else if(command == "gblur") {

b_m.gaussian_blur(std::stoull(params[0]),std::stoull(params[1]),std::stod(params[2]),s
}
43     else if(command == "dec") {
        auto result =
b_m.decomposition(std::stod(params[0]),std::stod(params[1]));
        for (size_t i = 0; i < result.size(); ++i)
            result[i].save_to_file(out_filepath+std::to_string(i));
    }
48

b_m.save_to_file(out_filepath);

cv::imshow("after_repr", b_m.representation());
cv::imshow("after_gen_repr", b_m.general_representation());
53     cv::waitKey(0);
}

```

appendicies/code/bayesian_classifier/show_model_representation.cpp

```

1 #include <fstream>

#include <opencv2/opencv.hpp>

```

```

#include "classifier.hpp"
6
int main(int argc, char* argv[]){
    assert(argc>1);
    std::string filepath = argv[1];
    BayesianModel b_m = std::move(BayesianModel::load_from_file(filepath));
11    cv::imwrite("repr.png",b_m.representation());
    auto reprep = std::move(b_m.general_representation());
    cv::imwrite("gen_repr.png",reprep);
    cv::waitKey(0);
}

```

appendicies/code/realsense/realsense.cpp

```

#include <iostream>
#include <chrono>

4 #include <opencv2/opencv.hpp>
#include <librealsense/rs.hpp>

#define DEBUG
9
#undef DIST_DEBUG

rs::device *dev = nullptr;

14
const uint16_t height = 480;
const uint16_t width = 640;

std::string depth_window = "depth";
19 std::string filtered_depth_window = "filtered_depth";
std::string color_window = "color";

auto struct_element = cv::getStructuringElement(cv::MorphShapes::MORPH_RECT,
    cv::Size(4, 4));

24 namespace options {
    uint16_t current_distance;
};

namespace option_window {
29     std::string name = "options";
    std::string depth = "depth";

    void depth_update(int value, void *ptr) {

```

```

        options::current_distance = uint16_t(value);
34     }

    void create() {
        cv::namedWindow(option_window::name, cv::WINDOW_NORMAL);
        cv::createTrackbar(option_window::depth, option_window::name, nullptr,
39        30000, option_window::depth_update,
            nullptr);
    }
}

// in : cv::Mat of uint16_t
44 std::pair<double, double> find_min_max(cv::Mat in, bool ignoreZero = true) {
    double min = std::numeric_limits<double>::max(), max =
    std::numeric_limits<double>::min();
    if (ignoreZero) {
        for (int column = 0; column < in.cols; column++)
            for (int row = 0; row < in.rows; row++) {
49                double elem = in.at<uint16_t>(row, column);
                if (elem > max)
                    max = elem;
                if (elem > 0 && elem < min)
                    min = elem;
54            }
        // if all elements were ignored ( all zeros )
        if (min == std::numeric_limits<double>::max() && max ==
        std::numeric_limits<double>::min()) {
            min = 0;
            max = 0;
59        }
    }
    else {
        for (int column = 0; column < in.cols; column++)
            for (int row = 0; row < in.rows; row++) {
64                double elem = in.at<uint16_t>(row, column);
                if (elem > max)
                    max = elem;
                if (elem < min)
                    min = elem;
69            }
    }
    return std::make_pair(min, max);
};

74 void filter_color_image_by_depth(cv::Mat &color, cv::Mat &depth, uint16_t
    max_distance) {
    assert(color.rows == depth.rows && color.cols == depth.cols);

```

```

    for (int column = 0; column < color.cols; column++)
        for (int row = 0; row < color.rows; row++) {
            uint16_t current_depth = depth.at<uint16_t>(row, column);
79             if (current_depth > max_distance | current_depth == 0)
                color.at<cv::Vec3b>(row, column) = cv::Vec3b(0, 0, 0);
        }
    }

84 int main() {
    cv::namedWindow(depth_window, 1);
    cv::namedWindow(color_window, 1);

    option_window::create();

89     try {
        rs::context ctx;

        auto devices_count = ctx.get_device_count();
94         if (devices_count == 0) {
            std::cout << "No devices found" << std::endl;
            return -1;
        }

99         dev = ctx.get_device(0);

        dev->set_option(rs::option::f200_laser_power, 15);
        dev->set_option(rs::option::f200_motion_range, 50);
        dev->set_option(rs::option::f200_confidence_threshold, 15);
104        dev->set_option(rs::option::f200_filter_option, 6);
        dev->set_option(rs::option::f200_accuracy, 3);

        dev->enable_stream(rs::stream::depth, width, height, rs::format::z16, 30);
        dev->enable_stream(rs::stream::color, width, height, rs::format::bgr8,
109        30);
        dev->start();

        cv::Mat depth_frame;
        cv::Mat color_frame;

114        while (true) {
            dev->wait_for_frames();
            #ifdef DEBUG
                std::chrono::duration<double> duration;
                std::chrono::system_clock::time_point start =
                    std::chrono::system_clock::now();
119            #endif

```

```

        depth_frame = cv::Mat(height, width, CV_16UC1, const_cast<void
*>(dev->get_frame_data(rs::stream::depth)));
        color_frame = cv::Mat(height, width, CV_8UC3, const_cast<void
*>(dev->get_frame_data(rs::stream::color_aligned_to_depth)));
#ifdef DEBUG
        duration = std::chrono::system_clock::now() - start;
124         std::cout << "time_elapsed_for_getting_frames" << duration.count()
        << std::endl;
        start = std::chrono::system_clock::now();
#endif

        cv::erode(depth_frame, depth_frame, struct_element);
        cv::dilate(depth_frame, depth_frame, struct_element);
129
#ifdef DIST_DEBUG
        auto minmax = find_min_max(depth_frame);
        std::cout << "min=" << minmax.first << " | max=" << minmax.second
        << std::endl;
#endif
134

        filter_color_image_by_depth(color_frame, depth_frame,
options::current_distance);

#ifdef DEBUG
139         duration = std::chrono::system_clock::now() - start;
        std::cout << "time_elapsed_for_image_processing_frames" <<
duration.count() << std::endl;
#endif

        cv::imshow(depth_window, depth_frame);
144         cv::imshow(color_window, color_frame);

        // i'm rly mad cuz this function returns every run different codes
just wtf O_O
        int key = cv::waitKey(30) & 0xFF;
149         if (key == 27)
            break;
        else if (key != 255)
            std::cout << key << std::endl;

154     }

    dev->stop();
}
catch (rs::error error) {
159     std::cout << error.what() << std::endl;

```

```

        return -1;
    }
    return 0;
}

```

Заголовочні файли

appendicies/code/bayesian_classifier/continuous_matrix.hpp

```

#ifndef CONTINUOUS_MATRIX_HPP
2 #define CONTINUOUS_MATRIX_HPP

#include <iostream>
#include <cstring>

7 #include <boost/serialization/version.hpp>
#include <boost/serialization/split_member.hpp>

template<class T, class S = size_t>
12 class continuous_matrix {

    friend class boost::serialization::access;

    typedef T value_type;

17     typedef T* pointer;
    typedef const pointer const_pointer;

    typedef value_type& reference;
22     typedef const reference const_reference;

    typedef S size_type;

    typedef pointer iterator;
27     typedef const_pointer const_iterator;

    size_type _rows;
    size_type _cols;
    size_type _total;
32     pointer _data;

    template<class Archive>
    void save(Archive & ar, const unsigned int version) const
    {
37         ar & _rows;

```

```

        ar & _cols;
        ar & _total;
        auto elem = cbegin(), last = cend();
        for(;elem != last; elem++)
42         ar & *elem;
    }

    template<class Archive>
    void load(Archive & ar, const unsigned int version)
47    {
        ar & _rows;
        ar & _cols;
        ar & _total;

52        if (_data != nullptr ){
            delete[] _data;
        }
        _data = new value_type[_total];

57        auto elem = cbegin(), last = cend();
        for(;elem != last; elem++)
            ar & *elem;
    }

62    BOOST_SERIALIZATION_SPLIT_MEMBER()
public:

    continuous_matrix() : _data(nullptr), _rows(0), _cols(0), _total(0) { }

67    continuous_matrix(size_type rows, size_type cols, value_type value = 0) :
        _rows(rows), _cols(cols), _total(rows * cols) {
        _data = new value_type[_total];
        std::fill(begin(), end(),value);
        for(auto c = begin(); c!=end(); c++)
            assert(*c == value);
72    }

    continuous_matrix(size_type rows, size_type cols, const_pointer data) :
        _rows(rows), _cols(cols), _total(rows * cols) {
        _data = new value_type[_total];
        std::memcpy(_data, data, _total * sizeof(value_type));
77    }

    continuous_matrix(const continuous_matrix &matrix) : _rows(matrix._rows),
        _cols(matrix._cols), _total(matrix._rows * matrix._cols) {
        _data = new value_type[_total];
        std::memcpy(_data, matrix._data, _total * sizeof(value_type));

```

```

82     }

    continuous_matrix(const continuous_matrix && matrix) : _rows(matrix._rows),
    _cols(matrix._cols), _total(matrix._total) {
        _data = matrix._data;
        matrix._rows = matrix._cols = matrix._total = 0;
87     matrix._data = nullptr;
    }

    continuous_matrix& operator=(const continuous_matrix&& matrix){
        _rows = matrix._rows;
92     _cols = matrix._cols;
        _total = matrix._total;
        _data = matrix._data;
        matrix._rows = matrix._cols = matrix._total = 0;
        matrix._data = nullptr;
97     }

    inline reference operator()(size_type row, size_type col) {
        return _data[row * _cols + col];
    }

102

    inline const_reference operator()(size_type row, size_type col) const{
        return _data[row * _cols + col];
    }

107

    inline reference get(size_type row, size_type col) const {
        return _data[row * _cols + col];
    }

    inline void set(size_type row, size_type col, const_reference value) {
112     _data[row * _cols + col] = value;
    }

    void increment(size_type row, size_type col){
        _data[row * _cols + col]++;
117     }

    ~continuous_matrix() {
        if (_data != nullptr)
            delete[] _data;
122     }

    inline size_type rows() const{
        return _rows;
    }

127

```



```

inline size_type cols() const{
    return _cols;
}

132 inline pointer data() {
    return _data;
}

inline pointer data() const {
137     return _data;
}

inline iterator begin() {
    return _data;
142 }

inline iterator end() {
    return _data+_total;
}

147 inline const_iterator cbegin() const {
    return _data;
}

152 inline const_iterator cend() const {
    return _data+_total;
}

void resize(size_type rows, size_type cols){
157     _rows = rows;
    _cols = _cols;
    _total = _rows*_cols;
    if ( _data != nullptr )
        delete[] _data;
162     _data = new value_type[_total];
}

size_type count_non_zero(){
    size_type non_zero = 0;
167     for(auto c = begin(); c!=end(); c++)
        if(*c != 0)
            non_zero++;
    return non_zero;
}

172
};

```

```

    typedef continuous_matrix<bool>      bmatrix;
177 typedef continuous_matrix<uint8_t>    umatrix;
    typedef continuous_matrix<size_t>    smatrix;
    typedef continuous_matrix<double>    dmatrix;

182 #endif //CONTINUOUS_MATRIX_HPP

```

appendicies/code/bayesian_classifier/general_defines.hpp

```

#ifndef GENERAL_DEFINES
#define GENERAL_DEFINES

3
#include <opencv2/opencv.hpp>
#include <librealsense/rs.hpp>

typedef cv::Vec3b vec3b;

8
template<class UIntegerType>
struct point{
    UIntegerType x,y;
    point() = default;
13    point(const point& p) = default;
    point(point&& p) = default;
    point& operator=(const point&) = default;
    point(const UIntegerType& x_, const UIntegerType& y_):x(x_),y(y_) {};
};

18
typedef point<size_t> spoint;

namespace gray_pixel{
    const uint8_t black = 0;
23    const uint8_t white = 255;
};

namespace rgb_pixel{
    const vec3b black(0,0,0);
28    const vec3b white(255,255,255);
};

namespace hsv_pixel{
    const vec3b black(0,0,0);
33    const vec3b white(0,0,255);
};

#endif //GENERAL_DEFINES

```

appendices/code/bayesian_classifier/classifier.hpp

```

#ifndef CLASSIFICATOR
#define CLASSIFICATOR

4 #include <vector>
#include <algorithm>
#include <string>
#include <utility>
#include <fstream>
9 #include <queue>

#include <experimental/filesystem>

#include <boost/archive/text_oarchive.hpp>
14 #include <boost/archive/text_iarchive.hpp>

#include "continuous_matrix.hpp"
#include "general_defines.hpp"

19

namespace fs = std::experimental::filesystem;

spoint push_wave(const dmatrix& probs, bmatrix& visited, dmatrix& out, spoint
    start);

24 class Bayesian;
class BayesianModel;

BayesianModel model_union(const BayesianModel& bm1, const BayesianModel& bm2);
29

class BayesianModel{
    friend boost::serialization::access;
    friend BayesianModel model_union(const BayesianModel& bm1, const
BayesianModel& bm2);
34

    size_t first_dim;
    size_t second_dim;
    dmatrix probs;

39    // used for serialization
    template<class Archive>
    inline void serialize(Archive & ar, const unsigned int version){
        ar & first_dim;
        ar & second_dim;

```

```

44         ar & probs;
    }

    BayesianModel() {};
public:
49
    static BayesianModel load_from_file(std::ifstream & stream);
    static BayesianModel load_from_file(const std::string& path);

    BayesianModel(BayesianModel&&);
54    BayesianModel(const smatrix& counts);
    BayesianModel(dmatrix&& prob_in);

    void save_to_file(std::ofstream &stream);
    void save_to_file(const std::string& path);
59

    cv::Mat representation();

    cv::Mat general_representation();

64    /*
    *
    */
    template <uint first,uint second>
    cv::Mat classify(const cv::Mat& in, double threshold){
69        cv::Mat out(in.size(),CV_8UC1);
        auto i = in.begin<vec3b>(), end = in.end<vec3b>();
        auto o = out.begin<uint8_t>();
        for (; i != end; ++i,++o) {
            const vec3b& pixel = *i;
74            if (probs(pixel[first],pixel[second]) > threshold)
                *o = gray_pixel::white;
            else
                *o = gray_pixel::black;
        }
79        return out;
    };

    void normalize_probabilities(){
        auto coef = 1.0 / *std::max_element(probs.cbegin(),probs.cend());
84        auto curr = probs.begin(), last = probs.end();
        for(; curr!=last; curr++)
            *curr*=coef;
    }

89    void threshold_small_probabilities_blobs(uint8_t size, double prob_threshold){
        cv::Mat process(first_dim,second_dim,CV_64FC1,probs.data());

```

```

        cv::Mat mask;

        cv::blur(process,mask,cv::Size(size,size));
94      cv::inRange(mask,0,prob_threshold,mask);

        process.setTo(.0,mask);
    }

99    /*
        * size — uint8_t size of elliptic kernel with a=b=size
        *
        * percents — double in range of [0,1] part of the kernel area to accept as
        not noise probability
        * adequate tip is to use percents not less than 0.25 ( 1/4 of the circle )
        because 0.5 may erase
104    * edge probabilities of big probabilities blobs
        */
    void filter_random_probabilities(uint8_t size, double part){
        if (size > 16) {
            std::cerr << "filter_random_probabilities: size>16" << std::endl;
109            return;
        }

        cv::Mat kernel = cv::getStructuringElement(cv::MORPH_ELLIPSE,
cv::Size(size,size));
        cv::Mat process(first_dim,second_dim,CV_64FC1,probs.data());
        uint8_t lower_bound = cv::countNonZero(kernel) * part;

114        continuous_matrix<uint8_t> cmm(first_dim,second_dim);
        auto p_b = probs.cbegin(),p_e = probs.cend();
        auto cmm_b = cmm.begin();
        for(;p_b!=p_e;++p_b,++cmm_b) {
119            if (*p_b > 0) {
                *cmm_b = 1;
            }
        }

        cv::Mat mask(first_dim,second_dim,CV_8U,cmm.data());
124        cv::filter2D(mask,mask,-1,kernel);
        cv::inRange(mask,0,lower_bound,mask);

        process.setTo(.0,mask);
    }

129    void erode(uint8_t a,uint8_t b){
        cv::Mat process(first_dim,second_dim,CV_64FC1,probs.data());
        cv::Mat kernel = cv::getStructuringElement(cv::MORPH_ELLIPSE,
cv::Size(a,b));
        cv::erode(process,process,kernel);

```

```

134     }

    void dilate(uint8_t a,uint8_t b){
        cv::Mat process(first_dim,second_dim,CV_64FC1,probs.data());
        cv::Mat kernel = cv::getStructuringElement(cv::MORPH_ELLIPSE,
cv::Size(a,b));
139        cv::dilate(process,process,kernel);
    }

    void blur(uint8_t a,uint8_t b){
        cv::Mat process(first_dim,second_dim,CV_64FC1,probs.data());
144        cv::blur(process,process,cv::Size(a,b));
    }

    void gaussian_blur(size_t a ,size_t b , double sigmax, double sigmay){
        cv::Mat process(first_dim,second_dim,CV_64FC1,probs.data());
149        cv::GaussianBlur(process,process,cv::Size(a,b),sigmax,sigmay);
    }

    std::vector<BayesianModel> decomposition(double min_area, double
min_distance){
        auto params = cv::SimpleBlobDetector::Params();
154        params.minDistBetweenBlobs = min_distance;
        params.filterByInertia = false;
        params.filterByConvexity = false;
        params.filterByColor = false;
        params.filterByCircularity = false;
159        params.filterByArea = true;
        params.minArea = min_area;
        params.maxArea = std::numeric_limits<double>::max();
        auto blob_detector = cv::SimpleBlobDetector::create(params);

164        auto gen_repr = std::move(this->general_representation());

        std::vector< cv::KeyPoint > keypoints;
        blob_detector->detect(gen_repr,keypoints);

169        cv::drawKeypoints(gen_repr,keypoints,gen_repr,cv::Scalar::all(-1),cv::DrawMatchesFlags
        cv::imshow("LALALA", gen_repr);

        std::vector<BayesianModel> result;
        result.reserve(keypoints.size());

174        bmatrix visited(first_dim,second_dim);

        std::cout << keypoints.size() << std::endl;

```

```

179         for(auto & keypoint : keypoints){
            auto x = keypoint.pt.x,y=keypoint.pt.y;
            dmatrix probs_blob(first_dim,second_dim);
            push_wave(probs,visited,probs_blob,spoint(y,x));
            auto current_model = BayesianModel(std::move(probs_blob));
184             result.push_back(std::move(current_model));
        }
        //for (auto & elem : result)
        //    elem.normalize_probabilities();
        return result;
189     }

    size_t non_zero(){
        return probs.count_non_zero();
    }
194 };

class Bayesian{
    friend boost::serialization::access;

199     size_t first_dim;
    size_t second_dim;
    smatrix counts;

    // used for serialization
204     template<class Archive>
    void serialize(Archive & ar, const unsigned int version){
        ar & first_dim;
        ar & second_dim;
        ar & counts;
209     }

    Bayesian() {};
public:

214     static Bayesian load_from_file(std::ifstream & stream);
    static Bayesian load_from_file(const std::string& path);

    Bayesian(Bayesian&&) = default;
    Bayesian(const size_t first, const size_t second) : first_dim(first),
    second_dim(second), counts(first,second) {};
219

    void save_to_file(std::ofstream & stream);
    void save_to_file(const std::string& path);

    template <uint first,uint second>

```

```

224 void train_from_folder(const fs::path &path, uchar color_space_conversion =
cv::COLOR_BGR2HSV) {
    std::vector<std::pair<fs::path, fs::path>> train_set;
    {
        fs::directory_iterator entries(path);
        train_set.resize(std::distance(fs::begin(entries), fs::end(entries))
/ 2);
229     }
    for (auto &entry : fs::directory_iterator(path)) {
        std::stringstream str_stream(entry.path().filename());
        std::string temp;
        std::getline(str_stream, temp, '_');
234         size_t n = std::stoi(temp);
        char c = str_stream.get();
        if (c == 'i')
            train_set[n - 1].first = std::move(const_cast<fs::path
&>(entry.path()));
        else
239         train_set[n - 1].second = std::move(const_cast<fs::path
&>(entry.path()));
    }
    for (auto &set : train_set) {
        cv::Mat img = cv::imread(set.first.string());
        cv::Mat mask = cv::imread(set.second.string());
244         cv::cvtColor(img, img, color_space_conversion);
        auto i = img.begin<vec3b>(), end = img.end<vec3b>();
        auto m = mask.begin<vec3b>();
        for (; i != end; ++i, ++m) {
            vec3b &i_pixel = *i, m_pixel = *m;
249             if (m_pixel != rgb_pixel::white)
                counts.increment(i_pixel[first], i_pixel[second]);
        }
    }
};

254 template <uint first, uint second>
void train_from_image(const cv::Mat& image, const vec3b& ignore_color) {
    auto i = image.begin<vec3b>(), end = image.end<vec3b>();
    for (; i != end; ++i) {
259         const vec3b& i_pixel = *i;
        if (i_pixel != ignore_color)
            counts.increment(i_pixel[first], i_pixel[second]);
    }
};

264 BayesianModel model() const {
    return BayesianModel(counts);
}

```



```

    }
};
269

```

```

274 #endif

```

Файли реалізації

appendicies/code/bayesian_classifier/continuous_matrix.cpp

appendicies/code/bayesian_classifier/classificator.cpp

```

#include "classificator.hpp"

3
spoint push_wave(const dmatrix& probs, bmatrix& visited, dmatrix& out, spoint
start){
    std::queue<spoint> curr_q;
    auto height = probs.rows()-1, width = probs.cols()-1;
    curr_q.push(start);
8    spoint max_prob = start;
    double max_prob_value = probs(start.x, start.y);
    visited(start.x, start.y) = true;
    while (!curr_q.empty()) {
        spoint current_point = std::move(curr_q.front());
13    curr_q.pop();
        auto& x = current_point.x, y = current_point.y;

        auto prob = probs(x,y);
        out(x, y) = prob;

18
        if (x > 1 && !visited(x - 1, y) && probs(x - 1, y) > 0) {
            curr_q.push(std::move(spoint(x - 1, y)));
            visited(x - 1, y) = true;
        }
23    if (x < width && !visited(x + 1, y) && probs(x + 1, y) > 0) {
        curr_q.push(std::move(spoint(x + 1, y)));
        visited(x + 1, y) = true;
    }
    if (y > 1 && !visited(x, y - 1) && probs(x, y - 1) > 0) {
28    curr_q.push(std::move(spoint(x, y - 1)));
        visited(x, y - 1) = true;
    }
}

```

```

        if (y < height && !visited(x, y + 1) && probs(x, y + 1) > 0) {
            curr_q.push(std::move(spoint(x, y + 1)));
33         visited(x, y + 1) = true;
        }

        if (prob > max_prob_value) {
            max_prob_value = prob;
38         max_prob = std::move(current_point);
        }
    }
    return max_prob;
}

43 BayesianModel BayesianModel::load_from_file(std::ifstream &stream) {
    boost::archive::text_iarchive in_archive(stream);
    BayesianModel b_m;
    in_archive >> b_m;
48     return b_m;
}

BayesianModel BayesianModel::load_from_file(const std::string& path) {
    std::ifstream stream(path);
53     boost::archive::text_iarchive in_archive(stream);
    BayesianModel b_m;
    in_archive >> b_m;
    return b_m;
}

58

BayesianModel::BayesianModel(const smatrix& counts) : first_dim(counts.rows()),
    second_dim(counts.cols()), probs(first_dim, second_dim) {
    size_t m = *std::max_element(counts.cbegin(), counts.cend());
    double multiplier = 1.0 / m;
63     for (size_t i = 0; i < first_dim; ++i)
        for (size_t j = 0; j < second_dim; ++j)
            probs(i, j) = counts.get(i, j) * multiplier;
}

68 BayesianModel::BayesianModel(BayesianModel&& model) : first_dim(model.first_dim),
    second_dim(model.second_dim) {
    std::swap(probs, model.probs);
}

BayesianModel::BayesianModel(dmatrix&& probs_in) : first_dim(probs_in.rows()),
    second_dim(probs_in.cols()) {
73     probs = std::move(probs_in);
}

```

```

void BayesianModel::save_to_file(std::ofstream &stream) {
    boost::archive::text_oarchive out_archive(stream);
78     out_archive << *this;
}

void BayesianModel::save_to_file(const std::string& path) {
    std::ofstream stream(path);
83     boost::archive::text_oarchive out_archive(stream);
    out_archive << *this;
}

cv::Mat BayesianModel::representation() {
88     cv::Mat result(cv::Size(first_dim,second_dim),CV_8UC1);
    for(size_t i = 0; i<first_dim; ++i)
        for(size_t j = 0; j<second_dim; ++j)
            result.at<uint8_t>(i,j) = probs(i,j)*255;
    return result;
93 }

cv::Mat BayesianModel::general_representation() {
    cv::Mat result(cv::Size(first_dim,second_dim),CV_8UC1);
    for(size_t i = 0; i<first_dim; ++i)
98         for(size_t j = 0; j<second_dim; ++j)
            if (probs(i,j)> 0)
                result.at<uint8_t>(i,j) = 255;
    return result;
}
103

Bayesian Bayesian::load_from_file(std::ifstream &stream) {
    boost::archive::text_iarchive in_archive(stream);
    Bayesian b;
108     in_archive >> b;
    return b;
}

Bayesian Bayesian::load_from_file(const std::string& path) {
113     std::ifstream stream(path);
    boost::archive::text_iarchive in_archive(stream);
    Bayesian b;
    in_archive >> b;
    return b;
118 }

void Bayesian::save_to_file(std::ofstream &stream) {
    boost::archive::text_oarchive out_archive(stream);

```

```

        out_archive << *this;
123 }

void Bayesian::save_to_file(const std::string& path) {
    std::ofstream stream(path);
    boost::archive::text_oarchive out_archive(stream);
128     out_archive << *this;
    }

template <class BinaryFunction>
BayesianModel model_union(const BayesianModel& bm1, const BayesianModel& bm2,
    BinaryFunction func = std::max){
133     assert(bm1.first_dim==bm2.first_dim && bm1.second_dim == bm2.second_dim);
    BayesianModel result(bm1.first_dim,bm1.second_dim);

    auto bm1_b = bm1.probs.cbegin(),bm1_e = bm1.probs.cend();
    auto bm2_b = bm2.probs.cbegin(), res_b = result.probs.begin();
138

    for(;bm1_b!=bm1_e;++bm1_b,++bm2_b,++res_b)
        *res_b == func(*bm1_b,*bm2_b);
    return result;
}

```