

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**  
Факультет комп'ютерних наук та кібернетики  
Кафедра теоретичної кібернетики

**Кваліфікаційна робота**

**на здобуття кваліфікаційного рівня бакалавра**

**за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки**

**на тему:**

**Методи побудови тривимірних об'єктів за їх проєкціями**

Виконав студент групи 4 курсу  
Журавльов Владислав Сергійович

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Науковий керівник:  
Кандидат фізико-математичних наук, доцент  
Ростислав Миколайович Трохимчук

\_\_\_\_\_  
(підпис)

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

Студент

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Роботу розглянуто й допущено до  
захисту на засіданні кафедри  
Теоретичної кібернетики

«\_\_»\_\_\_\_\_201\_р.,

протокол № \_\_\_\_  
Завідувач кафедри

Ю.В.Крак

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2021

## Реферат

### 3D-РЕКОНСТРУКЦІЯ, КАРТА ГЛИБИНИ, НЕЙРОМЕРЕЖА, 2D ЗОБРАЖЕННЯ, 3D МОДЕЛЬ, СТЕРЕОПАРА, МОДЕЛЬ ПОВЕРХНІ ОБЛИЧЧЯ

Метою роботи є ознайомлення з методами тривимірної реконструкції об'єктів, що базуються на перетворенні 2D зображення у 3D-модель

Об'єктом дослідження є зображення об'єктів для подальшого їх перетворення у 3D модель.

В цій роботі об'єктом дослідження виступає зображення, що в подальшому перетворюється у тривимірний об'єкт.

3D-реконструкція це протилежний процес до одержання 2D проекцій із 3D-сцен, під час якого втрачається глибина.

# Зміст

Скорочення	4
Вступ	5
1. Постановка задачі	7
2.1. Основні принципи 3D реконструкції	8
2.2. Способи побудови тривимірних об'єктів	9
2.2.1. Тривимірна-реконструкція за допомогою проектування	10
2.2.2. 3D-реконструкція за допомогою набору зображень з усіх сторін	12
2.2.3. 3D-реконструкція за допомогою 3D-сканера	13
2.2.4. 3D реконструкція за допомогою стереопари	14
2.3. Карта глибини	15
2.4. Елементи внутрішнього орієнтування	16
3. Опис роботи алгоритму побудови 3D-моделі за стереопарою	22
3.1. Взаємне положення камер при створенні зображень	22
3.2. Пошук ключових точок	24
3.2.1. Алгоритм Speeded-Up Robust Features (SURF)	25
3.2.2. Алгоритм Oriented FAST and Rotated BRIEF (ORB)	26
3.3. Зіставлення і фільтрація «поганих» пар особливих точок	27
3.3.1. Зіставлення особливих точок	27
3.3.2. Фільтрація «поганих» пар особливих точок	28
3.4. Ректифікація стереопари, створення карти глибини	30
4. 3D-реконструкція облич	34
4.1. 3D Face Morphable Model	36
4.2. Заходи якості реконструкції для підгонки до зображень	40
Висновок	44

## Скорочення

LiDAR (Light Detection and Ranging) – дослівно «визначення дальності за допомогою світла».

СК – система координат.

SURF – Speeded-Up Robust Features.

BRIEF – (Binary Robust Independent Elementary Features).

FAST – (Features from Accelerated Segment Test).

ORB – Oriented FAST and Rotated BRIEF.

FLANN – Fast Library for Approximate Nearest Neighbors.

RANSAC – RANdom Sample And Consensus.

3DMM – 3D Face Morphable Model

## Вступ

На протязі останніх десятиліть обчислювальна техніка торкнулася багатьох сфер життєдіяльності людини. Технічні новації автоматизують та полегшують людський труд, допомагають робити наукові відкриття, надають багато цікавих можливостей. Комп'ютерний зір – відносно новий, але стрімко зростаючий напрям з великою сферою застосування. Але для деяких задач не достатньо плоских зображень, і для багатьох підприємств потрібні 3D моделі тих сцен, якими вони оперують.

Цифрові тривимірні об'єкти часто створюють вручну інженери в спеціалізованих редакторах, підігнаних для простішого створення 3D моделей для тих чи інших потреб. Але даний спосіб потребує спеціалізованих знань і досить багато часу. Однак є ситуації в яких потрібно отримати 3D модель в режимі реального часу, і тоді вже потрібно підключати машинні технології. Для автоматизації та роботизації створення 3D моделей все частіше використовуються методи тривимірної реконструкції – відтворення тривимірних поверхонь спостережуваних об'єктів. В промисловості тривимірна реконструкція покращує часові і матеріальні затрати на створення 3D моделей і може збільшувати точність відтворення порівняно з ручним моделюванням.

Потреба побудови 3D моделей виникає в багатьох областях:

- *медицина* – побудова моделей органів і частин тіла створюється для виявлення відхилень і визначення необхідності лікування;
- *культура та історія* – здійснюється відтворення архітектури і мистецтва, а також знахідок під час розкопок, що може давати дослідникам детальну інформацію;
- *промислове виробництво* – багато підприємств потребують створення моделей деталей та механізмів, а сучасні методи реконструкції дозволяють побудувати потужні системи контролю

якості при поточному виготовленні та здійснити перевірку виготовлених деталей на відповідність заданим параметрам в реальному часі;

- *індустрія розваг* – чітка реконструкція поверхонь існуючих об'єктів для створення природних та естетичних оточень та конкретних персонажів в різних сферах: кінофільмах, комп'ютерних іграх, віртуальній реальності;
- *системи комп'ютерного зору* – основною задачею цих систем є знаходження та класифікація об'єктів навколишнього середовища; 3D реконструкція використовується для вирішення задач створення карт місцевості, ідентифікації об'єктів, відслідковування їх взаємного переміщення і розташування, відокремлення об'єктів та їх характеристик для подальшого освоєння додаткових знань.

# 1. Постановка задачі

Ціллю даної роботи є аналіз двох методів 3D-реконструкції, один з яких базується на реконструкції по стереопарі, інший являє собою реконструкцію обличчя людини по одному зображенню.

В ході роботи для досягнення поставлених цілей були поставлені наступні задачі:

- Знаходження взаємного розташування камер при створенні зображень;
- Пошук опорних точок;
- Аналіз методів зіставлення ключових точок в парі з наступною фільтрацією «поганих» пар;
- Ректифікація стереопари та отримання карти глибини;
- Огляд методів тривимірної реконструкції облич, та розгляд реконструкції по одному вхідному зображенню

## 2. Методи тривимірної реконструкції

Методи тривимірної реконструкції осіб розрізняються залежно від наявних ресурсів, поставлених вимог і сфер застосування.

### 2.1. Основні принципи 3D реконструкції

Усі методи 3D реконструкції можна поділити на два типи: активні і пасивні.

Активні методи взаємодіють з відновлюваних об'єктом, механічно або радіометричного. Така взаємодія відбувається в сторону об'єктів сцени для здобуття додаткової даних, на основі яких будуть працювати алгоритми реконструкції і наступний вимір реконструкції. Вимірювання здійснюється за допомогою сенсорів, параметрів яких досить для сприйняття масштабів випромінювання, необхідних для наступної обробки.

Прикладом механічного підходу є використання глибиноміра, яким вимірюється відстань до об'єкта. Також часто застосовують радіометоди: пускають випромінювання на об'єкт, а потім вимірюють його відбиту частину. Прикладами можуть бути мікрохвильові та ультразвукові датчики, застосування різнобарвного освітлення, LIDAR, лазерні далекоміри, рухомі джерела освітлення та інші методи тривимірного сканування.

Пасивні методи тривимірної реконструкції не впливають на об'єкт реконструкції і використовують датчики для вимірювання випромінювання, що відбивається від поверхні об'єкта або випромінюється безпосередньо поверхнею об'єкта. Як правило використовують фотокамери, чутливі до видимого діапазону, в якості сенсора. На вхід алгоритм обробки приймає набір з декількох

зображень(одне, два або більше) або віде-потік. В такому випадку говорять про фотограмметрію - реконструкцію, засновану на зображеннях [14].

Потрібно зазначити що саме пасивні методи реконструкції використовуються для забезпечення систем безпеки та безконтактного контролю, а також в різних рекламних додатках, де потрібно відновити поверхню особи(зазвичай обличчя) в режимі реального часу по фотографії або відео-поток.

Реконструкція тривимірних моделей за зображеннями зазвичай складається з наступних етапів: визначення орієнтації та калібрування камери, знаходження ключових точок на зображенні, створення тривимірної хмари точок і накладення текстури зображення. Калібрування камери відіграє одну з найважливіших ролей в отриманні точної тривимірної моделі.

## **2.2. Способи побудови тривимірних об'єктів**

На сьогоднішній день пропонується цілий ряд рішень задачі побудови 3D-моделі об'єктів. Для деяких з них потрібне використання дорогого і спеціалізованого обладнання, наприклад 3D сканерів, для інших достатньо фотокамери. Більшість методів зосереджена на знаходженні розташування точок об'єкта в просторі без зміни масштабу, і в разі необхідності, накладенні текстур на точки моделі.

Необхідно виконати певні умови для отримання для отримання результатів високої якості, незалежно від обраного методу:

1. Висока якість вхідних даних;
2. Однакова освітленість поверхні при зміні кута спостереження;
3. Калібрування камер(дослідження їх технічних параметрів і положення у просторі);

4. Існування областей перетину в зображенні;
5. Різка зміна інтенсивності на грані об'єкта.

### **2.2.1. Тривимірна-реконструкція за допомогою проектування**

Цей метод передбачає проектування заданого об'єкта вручну, за допомогою спеціальних додатків. Існує безліч програм для розробки моделей, причому як в офлайн (Autodesk 3D max, Blender, ASCON Kompas3D) (рис. 1), так і в онлайн (Sketchfab, Tinkercad) (рис. 2) варіантах. При створенні моделі відсутня пряма взаємодія з зображенням об'єкта, адже проектувальник створює модель на основі власного сприйняття. Завдяки даному методу можна створювати тривимірні моделі як реальних об'єктів, так і об'єктів що уявляє інженер.

Етапи створення 3D-моделі:

1. Побудова каркасу(полігональної моделі). Відбувається шляхом відтворення геометричної форми і масштабу даного об'єкта;
2. Визначення структурного матеріалу. Наприклад, застосування до макету споруди при його конструюванні текстури каменю;
3. Налаштування освітлення;
4. Налаштування сцени: розміщення камер для спостереження.
5. Створення зовнішніх впливів (якщо потрібно).

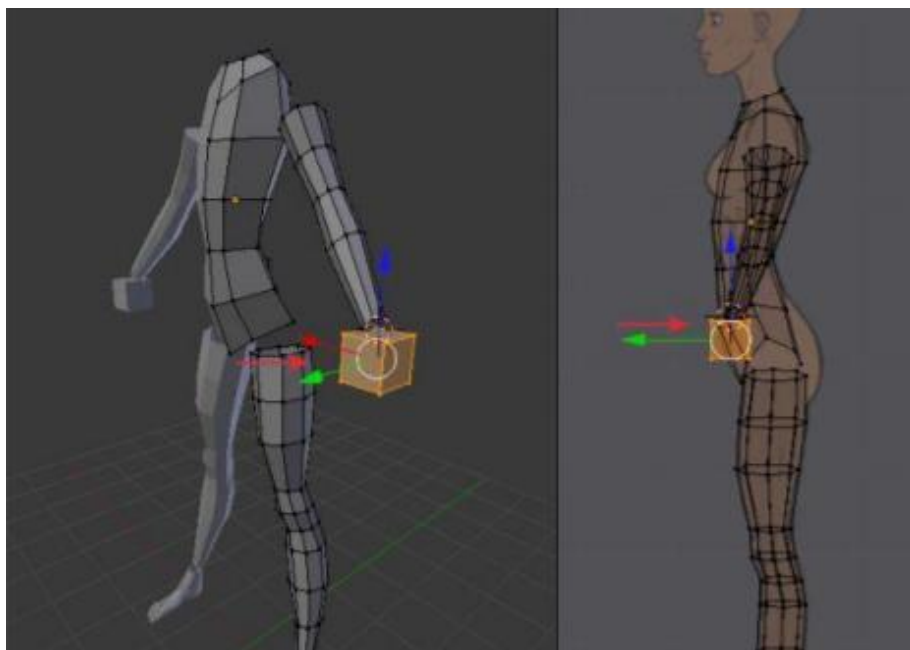


Рис.1 Процес моделювання з використанням Blender

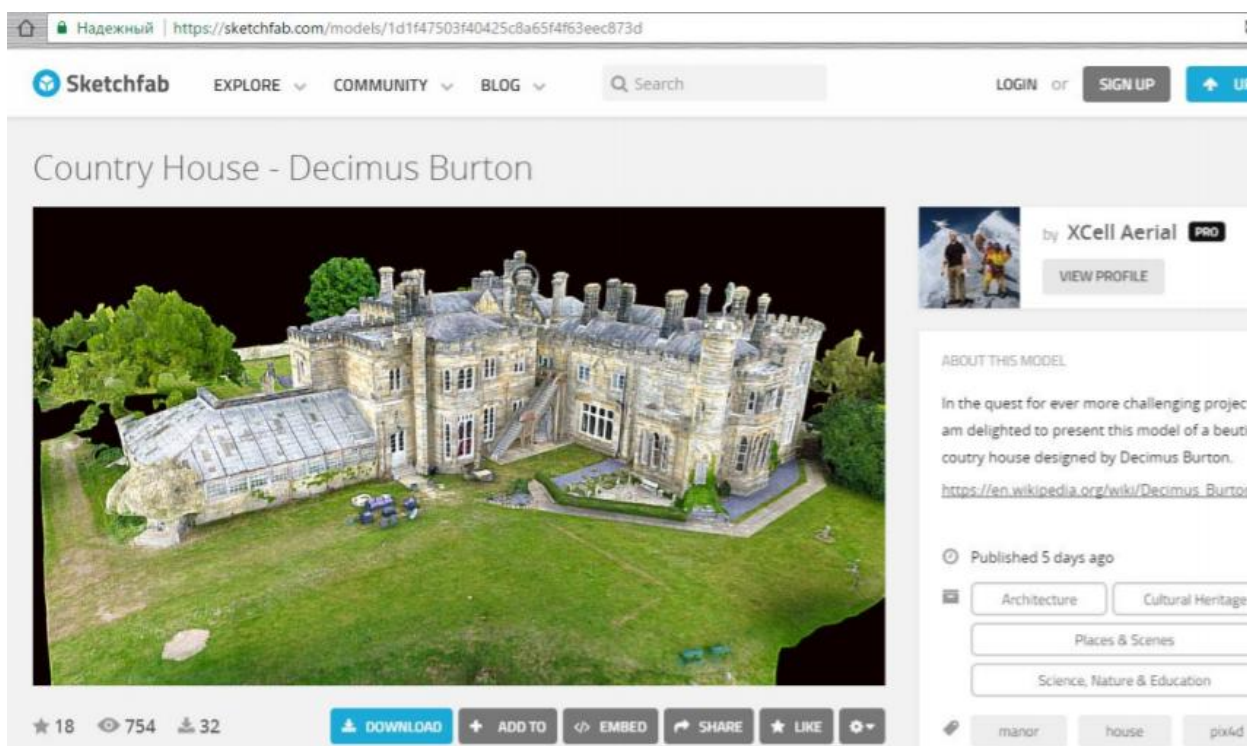


Рис.2 Моделювання споруди за допомогою Sketchfab

Цей метод має достатньо переваг. Він має високу точністю, оскільки інженер може відтворити найменші деталі, встановити точні розміри, і створити модель будь-якого об'єкта в рамках можливості програм

проектування. Але ,однозначно, суттєвим недоліком є великі затрати в часі, незважаючи на кваліфікацію проектувальника.

### 2.2.2. 3D-реконструкція за допомогою набору зображень з усіх сторін

Метод використовує послідовний ряд зображень об'єкта (рис. 3). При цьому суміжні кадри мають перекриватися більше ніж на 50%, а мінімальна кількість кадрів, що перекриваються, повинна бути більше трьох. При правильному виконанні умов можна отримати достатньо якісний образ і далі редагувати масштаб об'єкта.

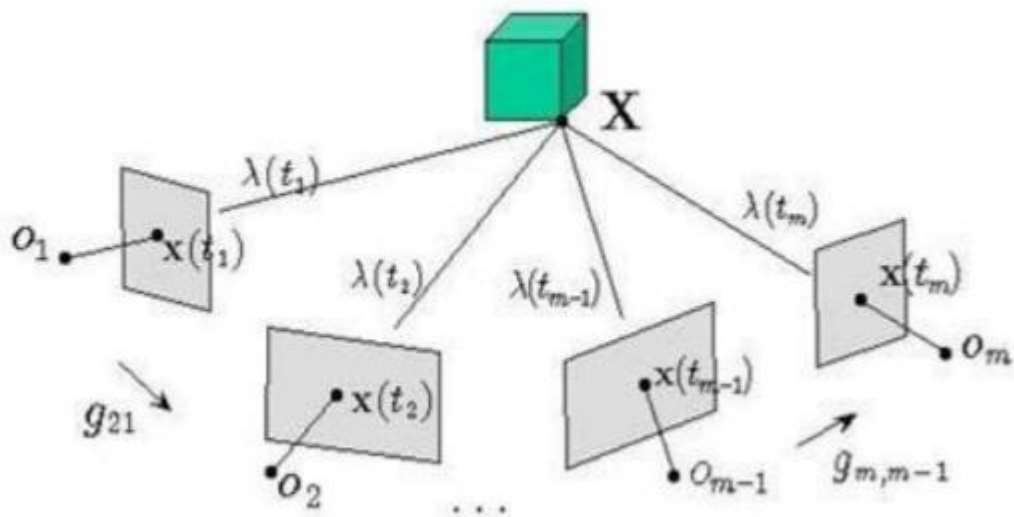


Рис. 3 Схема фотографування об'єкта

Роботу цього метода можна представити таким алгоритмом:

1. Імпорт зображень отриманих з фотографування досліджуваного об'єкта;
2. Знаходження опорних точок і вирішення системи рівнянь, отриманої на основі безлічі цих точок;
3. Встановлення параметрів камери;

4. знаходження «однакових» точок на різних суміжних зображеннях об'єкта дослідження;
5. визначення координат точок відносно «базового» зображення об'єкта;
6. Зведення точок до системи координат, більш зручної для аналізу та накладення текстури об'єкта на тривимірну модель.

Серед недоліків даного методу можна визначити потребу в стаціонарному становленні об'єкта та тривалий процес зйомки. Але збільшення кількості знімків призводить до більш точних результатів відтворень.

### **2.2.3. 3D-реконструкція за допомогою 3D-сканера**

3D-сканер – периферійний пристрій, що аналізує об'єкт і на основі отриманих даних створює його 3D-модель.

Сканери поділяються на два типи за способом сканування. Перший базується на використанні спеціального щупа, який досліджує точки, визначені оператором. Точність отриманих даних залежить від точності датчиків, які схожі на датчики оптико-механічної миші, розташованих на щупі. Цей тип може використовуватися для сканування об'єктів простої форми і невеликих розмірів. Сканери безконтактного типу мають складнішу структуру і використовують для сканування ультразвук, лазерні датчики і фотокамери. здійснюється комбінування даних зображень і результатів, отриманих від інших датчиків.

Гарним прикладом є сканування, що використовує біле світло (Рис. 4). Сканер направляє на об'єкт шаблон закодованого світла від джерела, яке і «привласнює» форму об'єкту. Дані узгоджуються зі знімками і утворюють якісну модель.

Цей метод дає можливість отримати точну тривимірну модель за короткий інтервал часу. Але технічні прилади не лише матеріально затратні, а ще й стаціонарні, що не дозволяє відтворювати будь-який об'єкт

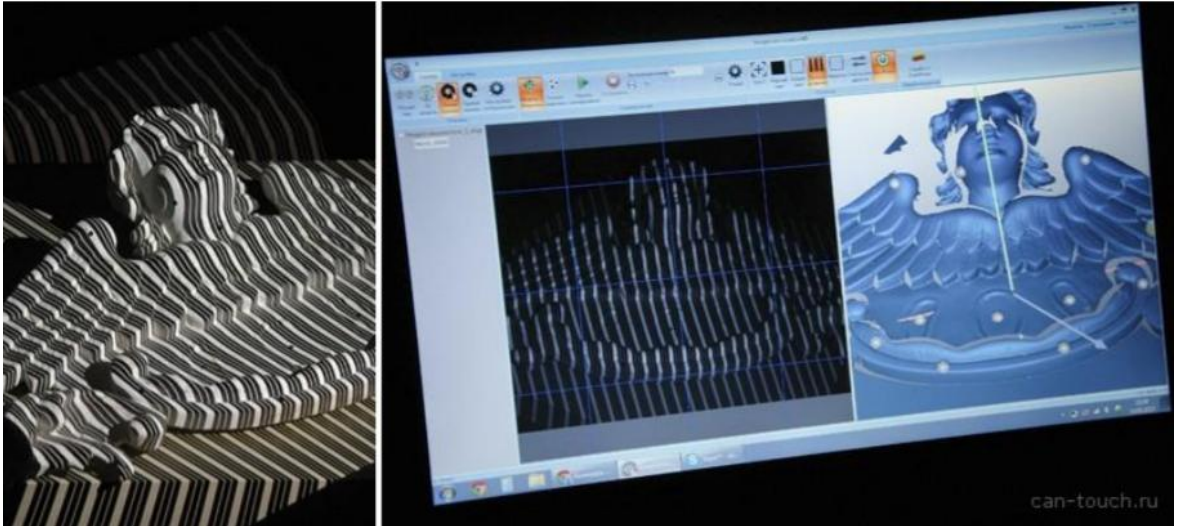


Рис. 4 Сканування білим світлом

#### 2.2.4. 3D реконструкція за допомогою стереопари

Метод базується на аналізі лише двох зображень, які були отримані за допомогою стерео камери. У цьому способі так само виконується вибір точок відповідності, їх зіставлення і геометричні перетворення.

Тоді для отримання тривимірної моделі потрібно виконати дії наступного алгоритму:

1. Визначення фундаментальної матриці;
2. Визначення матриці камер;
3. Знаходження відповідних точок;
4. Побудова хмари точок;
5. Накладення текстури.

Однак, модель, отримана подібним чином, не вважається «повним» 3D-

образом, так як будується лише поверхневий «вигляд» об'єкта. Приваблює даний метод своїми швидкістю і доступністю.

### **2.3. Карта глибини**

Перетворення тривимірного об'єкта у 2D-зображення відбувається шляхом проектування кожної видимої точки об'єкта відносно деякої точки, що є центром проекції. При даній операції втрачаються дані глибини та відстані.

Важливою задачею стерео зору є процес відтворення тривимірної сцени за двома плоскими зображеннями з відновленням даних про глибину кожної точки плоского зображення.

Маючи інформацію про глибину(функція двох змінних), можна створювати моделі об'єктів для використання в різних додатках: симуляція польотів, моделювання ландшафтів для комп'ютерних ігор, віртуальна реальність. Інформація про відстань точок зображення від дійсного прообразу дозволяє захопити опорні точки рухомого об'єкта для отримання тривимірних координат, що актуально в сфері кіно, та спец ефектів.

На разі відомо два методи відновлення даних про глибину дійсної сцени: активні і пасивні. Активні використовують лазерне освітлення робочого простору або ультразвукові перетворювачі, що в результаті дає швидку та чітку інформацію про глибину. Але ці методи фінансово затратні і мають обмеження в діапазоні вимірювання.

Пасивні методи що, використовують комп'ютерний зір, часто реалізуються більш простими та менш затратним сенсорами, які визначають глибину. Ці методи можуть створювати дані про відстань за парою зображень і параметрами двох камер.

Одна з основних задач стерео зору – встановлення точної відповідності між лівою і правою частиною стереопари. Під відповідністю мається на увазі відстань (диспаратет) між пікселями одного і того ж об'єкта на лівому і правому зображенні. Локальні методи по обчисленню, що зараз існують, характеризуються певною збалансованістю швидкості-якості, масштабуються і реалізуються на паралельних архітектурах (відеокартах).

Для вирішення рівняння для значень глибини були розроблені обмеження та спрощення для зниження ступеня свободи, що веде до різних алгоритмів оцінки глибини, кожен з яких підходить для вирішення задачі в певній області. Одна частина чітко обчислює поле руху перед тим, як відновити інформацію про глибину, інша – оцінює структуру з полем руху, інтегрованим під час оцінки. Потрібно відзначити, що невелика середня просторова розбіжність відповідних точок у просторових кадрах сприятлива для надійності і стабільності 3D-реконструкції від інтеграції часу двох послідовних кадрів. З іншої сторони, коли середня невідповідність кадрів велика, реконструкцію глибини можна виконати таким чином, як бінокулярна невідповідність. Поле руху стає рівним карті стерео нерівномірності лише в тому випадку, якщо просторові та часові відхилення між кадрами досить малі.

#### **2.4. Елементи внутрішнього орієнтування**

Орієнтацію знімка в просторі визначають елементи зовнішнього орієнтування. Під поняттям знімок треба мати на увазі зв'язку проєктованих променів, відновлену на етапі внутрішнього орієнтування, коли були задані елементи внутрішнього орієнтування кадру.

Збереження ключових зв'язків, виражених загальними рівняннями можливо, якщо змінити помилкові частини моделі або взяти додаткові невідомі – параметри калібрування. Калібрування – встановлення

залежності між показниками вимірювального пристрою і вимірюваною величиною. Принципово калібрування можна робити при вирішенні всіх відомих задач: зворотної просторової зарубки, побудови одиночної моделі, маршрутної і блокової фотограмметричних мереж, трансформування одиночних і пари знімків (взаємне орієнтування). В якості опорних (твердих) даних при реалізації зв'язків можуть бути використані величини, розташовані в просторі об'єктів, кількісні характеристики яких визначені з необхідним ступенем точності.

До основних з них належать такі:

- координати точок об'єктного простору (місцевості);
- кути;
- відстані між точками;
- координати точок фотографування;
- різниці висот точок фотографування;
- похилі дальності;
- кути нахилу знімків.

В основі всіх методів калібрування лежить аналітичне рішення однієї задачі фотограмметрії, в яку включені додаткові параметри калібрування, звідси випливає, що рішення задачі може відбуватися спеціально для визначення параметрів калібрування .

Аналіз похибок знімків показує, що систематичні спотворення центральної проекції всіх знімків, які отримані в однакових умовах, майже не відрізняються.

Основний принцип підходу до створення певної технології має спиратися на максимальне використання всіх наявних ключових даних і виборі найбільш підходящого в даних умовах способу калібрування. Калібрування виконують по знімках виробничої зйомки (вирішення виробничого завдання

з одночасним калібруванням знімків) або отримують 2-3 групи знімків з певними параметрами, але в тих же умовах, що й виробнича зйомка.

Останнє виконують по кожній групі незалежно. Порівнюючи результати за різними групами, виконується контроль якості калібрування. Серед цих результатів середні значення є остаточними параметрами калібрування. Ці значення виконують для вирішення фотограмметричного завдання по знімках виробничої зйомки. Число зон або тип інтерполюючого полінома попередньо встановлюють на підставі наявних даних, остаточно – дослідним шляхом в процесі калібрування.

На першому кроці вирішення фотограмметричної задачі слід визначити невідомі, обчислювані найбільш надійно, на інших етапах – включати послідовно наступні по надійності визначення невідомі. В елементарному випадку на першому кроці визначаються приблизні значення елементів фотограмметричної задачі, а на другому отримують остаточні значення елементів і параметри калібрування.

При виконанні фотограмметричних вимірів, отриманих цифровими камерами, з'являється проблема переходу від внутрішньої системи координат до системи, заснованої на положенні головної точки знімку.

Для того щоб, зрозуміти сутність проблеми, зобразимо послідовність переходу від однієї системи координат до іншої в традиційній аналоговій фотограмметрії. Знаходимо координати точок зображення в СК приладу (стереокомпаратора). Ця система координат не є самостійною, що проявляється в зміні координат тієї ж точки на тому ж знімку при зміні положення знімка.

Перехід до системи координат знімка, яка визначається (як правило) за допомогою координатних міток приладу. Система координат знімка може задаватися двома способами: через відстань між мітками і координатами головної точки, або безпосередньо координатами координатних міток. Далі

виконується перехід до СК зображення з урахуванням систематичних помилок (дісторсії).

Дісторсією зазвичай називають геометричні викривлення об'єктів, спотворення ліній, що утворюються в процесі формування зображень (Рис. 5).

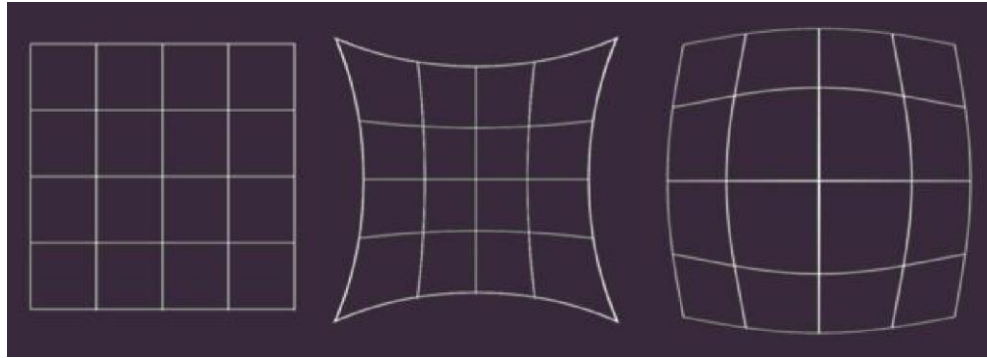


Рис.5 Дісторсія зображень

Існує декілька причин утворення дісторсії. Одна з них – це сходження паралельних прямих, коли фотоапарат перебуває в похилому положенні, або його нахиляє фотограф. Найчастіше таке спотворення виникає під час фотографування високих споруд. Окрім цього дісторсія може виникати в разі використання дешевого або неякісного обладнання: поганих об'єктивів. Загалом ця властивість притаманна об'єктивам з зумом, тобто об'єктивам зі змінною фокусною відстанню. А от об'єктиви з постійною фокусною відстанню надають відмінну, чітку композицію без дісторсії.

Дісторсію найкраще видно коли в кадрі є прямі лінії по всій його довжині. Наприклад, при зйомці будівлі ширококутним або понад-ширококутним об'єктивом, вам знадобиться зайнятися корекцією дісторсії подушкоподібної.

Обробка зображень, отриманих цифровими камерами, має декілька особливостей. По-перше, система координат приладу (цифрової камери, цифрового зображення) не є тимчасовою, вона повністю, і вимірювані дані можуть зберігати свої властивості з використанням цієї системи. По-друге, на цей час ще немає загальноприйнятих стандартів стосовно системи координат

для цифрового зображення. Відмінності виражаються в напрямку осі у (вгору або вниз), в положенні початку системи координат (лівий нижній, лівий верхній кути, центр знімка), в прив'язці початку системи координат до краю пікселя або його центру.

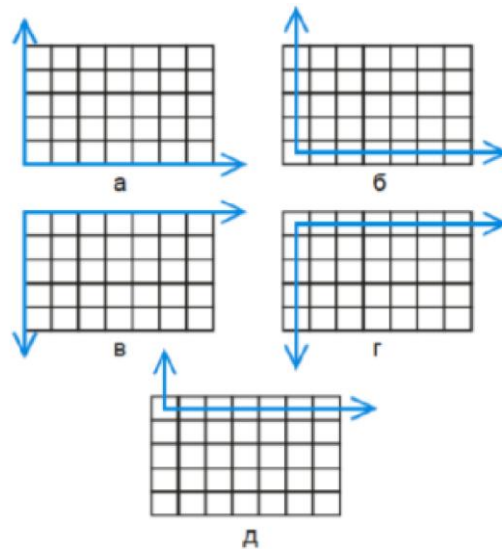


Рис.6 – Варіанти систем координат цифрового зображення:

- а) початок СК - лівий нижній кут, вісь у - вгору, прив'язка до краю пікселя (MonoSDS, Calibrator); б) початок СК - лівий нижній кут, вісь у - вгору, прив'язка до центру пікселя (PhotoMod); в) початок СК - лівий верхній кут, вісь у - вниз, прив'язка до краю пікселя (MapInfo); г) початок СК - лівий верхній кут, вісь у - вниз, прив'язка до центру пікселя (WorldFile: ArcView, ArcGIS, MapInfo); д) початок СК - лівий верхній кут, вісь у - вгору, прив'язка до центру пікселя (Erdas Imagine).

По-третє, мікрометри в цифрових камерах (як і фокусна відстань в міліметрах) не мають жодного сенсу, оскільки дійсні розміри матриці і фокусні відстані неможливо виміряти з достатньою точністю (мінімум 4 значущих цифри), а використання приблизних значень для фотограмметричних вимірювань абсолютно недоцільно. Крім того, одиниці вимірювання фокусної відстані повинні відповідати одиницям виміру по осях x і у. Але на практиці «традиційною» фокусною відстанню користуються не часто, вважаючи за краще так зване «еквівалентне», тобто відповідне знімку, має такий же кут огляду, але отриманого плівковою камерою з розміром кадру 24 \* 36 мм. Це ще більше заплутує справу.

По-четверте, піксель матриці не обов'язково являє собою квадрат. Тоді будь-яку систему усунення систематичних спотворень і переходу до СК, заснованої на положенні головної точки, можна представити у вигляді деякої послідовності перерахованих функцій. Кожна з цих функцій у відповідності зі своїми параметрами здійснює перетворення результатів, отриманих від попередньої функції. Причому параметри перетворень не залежать від інших функцій та їх параметрів.

Виключенням з цього правила може бути перетворення між різними видами СК цифрового зображення. (вони природним чином залежать від вихідної системи координат цифрового зображення) і перенесення системи координат в певну задану точку, оскільки положення точки може бути не задано на попередньому етапі перетворення, а на якомусь чи іншому (в інший, реформованій СК).

### 3. Опис роботи алгоритму побудови 3D-моделі за стереопарою

#### 3.1. Взаємне положення камер при створенні зображень

Як згадувалося раніше, на зображення накладається ряд обмежень, що збільшує значимість питання про розташування камер.

Зображення досліджуваного об'єкта можна отримати двома основними способами зйомки: паралельним (рис.7) або спрямованим (рис.8).

При використанні першого методу зйомки оптична вісь об'єктивів джерел не змінюється. Однак, при подальшій обробці зображень потрібне використання компенсаційного зсуву, за допомогою якого досягається нульовий паралакс на одному з об'єктивів. В даному випадку стереопарою буде лише та область зображення, яка потрапляє в область перетинів. Даний метод користується популярністю через свою простоту. Ще однією перевагою є те, що при отриманні стереопар подібним чином, зміщення буде спостерігатися лише у об'єктів на передньому плані, а далеко розташовані об'єкти залишаться на своїх місцях.

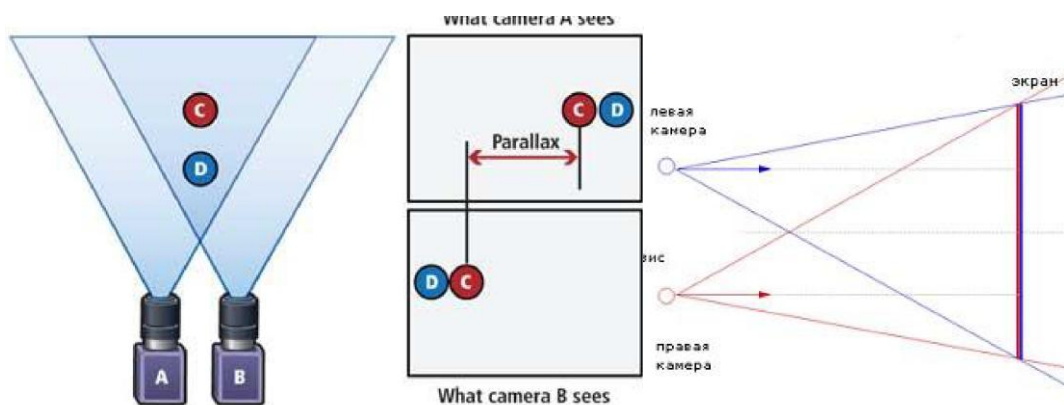


Рис.7 Паралельний спосіб зйомки об'єкта

При наведеному методі зйомки поворот камери здійснюється таким чином, щоб об'єктив завжди був спрямований на об'єкт фокусування, що в подальшому не вимагає обробки отриманих результатів. Використовуючи цей метод, можливо отримання моделі найбільш близькою до природного сприйняття. Але при цьому, до виникаючих труднощів можна віднести складність процесу зйомки об'єкта.

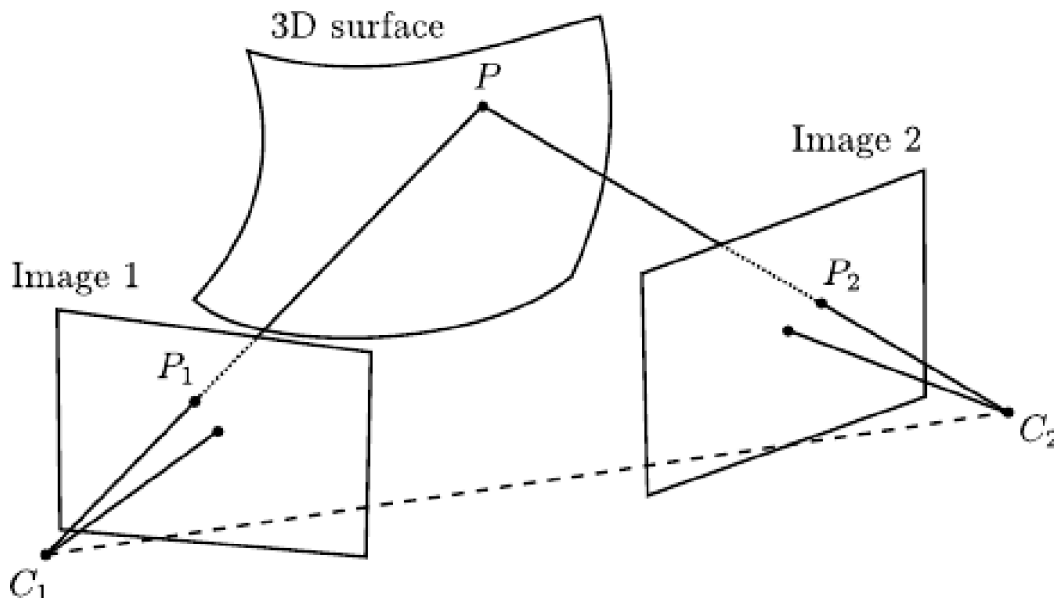


Рис.8 Направлений спосіб зйомки об'єкта

Для отримання якісного результату необхідно:

1. Знати фокусні відстані об'єктивів і відстані між ними;
2. Забезпечити паралельність осей і збіг площин кадру;
3. Синхронізувати роботу затворів камер в разі присутності рухомого об'єкту.

У таблиці 1 наведена залежність відстані між об'єктом і камерою ( $d$ ) і стерео базисом ( $b$ ), яка може бути виражена формулою:

$$b = 0,03 * d$$

де  $b$  - базис стереозйомки,  $d$  - відстань до найближчого об'єкта сцени зйомки.

Використовуваний у формулі коефіцієнт (0,03) отримано з кута сходження зорових осей, що забезпечує найкращі умови для спостереження стереоефекту.

Відстань, d(м)	Стереобазис, b(м)
1-2	6-9
2-3	9-12
3-4	12-15
4-5	15-18
5-6	18-21
6-7	21-24

Табл.1 Відношення відстані між об'єктом і камерою(d) і стереобазисом(b)

### 3.2. Пошук ключових точок

Для зіставлення зображень з метою пошуку областей перетинів, необхідно виділити характеризують ознаки - особливі (ключові) точки. Під такими точками на увазі точки, що відповідають таким властивостям: визначеність, стійкість, інваріантність, стабільність. Дані ознаки забезпечують переваги алгоритмів, заснованих на пошуку ключових точок.

Метод роботи з зображеннями на основі ключових точок досить популярний. Результатом його використання служить набір параметрів у вигляді числових або бінарних векторів, що визначають околиці ключових точок - дескрипторів. Далі, при аналізі зображень відбувається порівняння дескрипторів з використанням певної метрики.

На основі вивчених публікацій, і з урахуванням поставлених вимог, були обрані два методи, реалізовані в бібліотеці OpenCV. Розглянемо кожен з них детальніше.

### 3.2.1. Алгоритм Speeded-Up Robust Features (SURF)

SURF вирішує завдання пошуку особливих точок і створення їх дескрипторів, інваріантних до масштабу і обертанню - при зміні масштабу або поворотах зображення, описи ключових точок не змінюються.

Метод здійснює пошук особливих точок за допомогою матриці Гессе (1). Її визначник досягає екстремуму в точках максимального зміни градієнта яскравості. Виходячи з цього, отримуємо, що такі елементи зображень як плями, кути і краю ліній будуть досить добре «розпізнані».

$$Gs(f(x, y)) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \end{bmatrix}, \quad \det \det (Gs) \\ = \frac{\partial^2 f \partial^2 f}{\partial x^2 \partial y^2} - \left( \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \right)^2, \quad (1)$$

Де  $Gs$  – матриця Гессе,  $f(x, y)$  – функція зміни градієнта яскравості.

Інваріантність масштабу SURF забезпечується використанням різномасштабних фільтрів при знаходженні гессіанов. Для кожної особливої точки розраховується масштаб і напрямок максимального зміни яскравості, формується дескриптор, що представляє собою набір з 64 (або 128) чисел.

Для забезпечення ефективності обчислень кожне зображення, перед «запуском» алгоритму, представляється в інтегральному форматі. Даний формат передбачає використання матриці, розмірність якої еквівалентна розміру самого зображення. Елементи ж матриці обчислюються за формулою (2).

$$I(x, y) = \sum_{i=0}^x \sum_{j=0}^y I(i, j), \quad (2)$$

де  $I(i, j)$  – яскравість пікселя вхідного зображення,  $(x, y)$  – координати пікселя на матриці.

Алгоритм SURF більш ефективний при аналізі зображень з розмиванням і наявністю обертань. Обробка ж зображень з сильною зміною освітленості створить певні труднощі для даного алгоритму. Також метод не «спрацює» при обробці простих (з однотонною текстурою) об'єктів. SURF сприймає картинку як єдине ціле і в таких умовах здійснює пошук його особливостей. Точки будуть виявлені на кордоні об'єкта з фоном і при зміні об'єкта виникнуть проблеми з його ідентифікацією.

Так само, недоліком даного алгоритму може служити наявність патентних обмежень, що, певним чином, обмежує можливості його використання.

### 3.2.2. Алгоритм Oriented FAST and Rotated BRIEF (ORB)

Алгоритм ORB опублікований в 2011р. В його основі лежить комбінація таких алгоритмів, як детектор FAST (Features from Accelerated Segment Test) і дескриптор BRIEF (Binary Robust Independent Elementary Features) з деякими поліпшеннями.

Для знаходження особливих точок використовується детектор FAST, який неодноразово демонстрував себе в якості швидкого інструменту при виявленні особливостей зображення. Метод FAST не інваріантний до поворотів, а тому, виникає необхідність введення параметра кутовий орієнтації. Зазначений параметр забезпечує детектування при обертанні об'єкта, використовує напрямок з найбільшою інтенсивністю, яка призначається орієнтацією особливої точки  $\theta$ .

Дескриптор BRIEF, що представляє собою вектор довжиною, рівній 256, складається з результатів бінарних тестів навколо особливої точки. Для досягнення інваріантності до обертання область обчислення дескриптора визначається орієнтацією особливої точки  $\theta$ . Дескриптор BRIEF забезпечує розпізнавання об'єкта з різних ракурсів при досить малих витратах на обчислення.

Швидкість роботи алгоритму ORB вище, ніж у алгоритму SURF, так як використовуються в повному обсязі особливі точки, а тільки та їх частина, яка залишається після «відсіву» детектора кутів Харріса.

Ще однією перевагою даного алгоритму є його публікація під BSD ліцензією в бібліотеці OpenCV.

У деяких завданнях ORB дозволяє виявляти особливості зображень в режимі реального часу. Підхід до пошуку ключових точок і їх описів, властивий ORB, дозволяє використовувати його на менш потужних обчислювальних пристроях.

### **3.3. Зіставлення і фільтрація «поганих» пар особливих точок**

За підсумками роботи алгоритмів, описаних в попередньому розділі, ми отримуємо безліч дескрипторів, що описують особливі точки зображення.

Далі необхідно знайти відповідність між особливими точками, з метою знаходження «схожих», видалити з розгляду «погані» (невідповідні) пари, щоб в подальшому останні не вплинули на процес генерування панорами приміщення.

#### **3.3.1. Зіставлення особливих точок**

Для вирішення даного завдання в OpenCV існує кілька методів, серед яких BruteForceMatcher і FlannBasedMatcher.

За назвами зазначених методів можна бачити, що перший з них виконує повний перебір різних комбінацій дескрипторів з досліджуваних зображень. Даний метод здійснює пошук для дескриптора з одного зображення «найближчого» сусіда-дескриптора з іншого, обчислюючи при цьому відстані між ними. Маючи великий обсяг оброблюваної інформації, специфіка алгоритму BruteForceMatcher виступає в якості недоліку, так як потребують чимало часу для зіставлення особливих точок.

Для вирішення даної проблеми існує метод FlannBasedMatcher, що базується на бібліотеці Fast Library for Approximate Nearest Neighbors (FLANN). Бібліотека містить безліч алгоритмів для вилучення і обчислення дескрипторів, індексації та застосовуваний в даному методі пошук KNN або метод пошуку k-найближчих сусідів.

За підсумками другого розділу для виявлення особливих точок був обраний алгоритм ORB, в результаті роботи якого ми отримуємо бінарні дескриптори кінцевого числа точок. При вирішенні задачі розглядається помірною кількість даних, в зв'язку з чим було вирішено процедуру зіставлення здійснювати шляхом перебору. Як ми вже знаємо, для порівняння дескрипторів ORB необхідне використання спеціальної метрики. В даному випадку використовується відстань Хеммінга, яка визначає кількість різних позицій між двома бінарними послідовностями. Таку метрику можна представити у вигляді формули (3).

$$hamming(x, y) = \sum_{x_i \neq y_i} 1, \quad i = 1, \dots, n, \quad (3)$$

Де  $x$  та  $y$  – дескриптори

### 3.3.2. Фільтрація «поганих» пар особливих точок

Методи зіставлення точок, описані в попередньому параграфі, в процесі роботи «роблять» помилки. Відбувається об'єднання особливих точок, насправді не є відображенням одного й того ж об'єкта. Некоректні зв'язку сильно впливають на результат. Наприклад, при побудові панорами ми можемо в результаті отримати невірне об'єднання фрагментів.

Вирішення цієї проблеми має велике значення, і на сьогоднішній день існує чимало алгоритмів фільтрації. Ці алгоритми можна розділити на дві групи: прості і ітеративні фільтри. Розглянемо деякі фільтри, які не потребують при їх реалізації значних часових ресурсів.

Методи перехресної перевірки. Розглянемо ситуацію з аналізом двох зображень. За допомогою дескриптора ми знаходимо пару точок («1» і «2») і встановлюємо між ними відповідність. Якщо ми припускаємо, що це ставлення істинно, то існує в деякому роді взаємно-однозначна відповідність. Іншими словами, якщо до точки «1» найближчій виявилася точка «2», то і для точки «2» найближчій повинна виявитися точка «1».

Це допоможе нам виключити зв'язку, в яких особливій точці на одному зображенні відповідає кілька точок на іншому зображенні. Даний алгоритм не найшвидший в роботі і, крім того, можливі ситуації, при яких помилково відкидаються справжні зв'язку. Незважаючи на це, алгоритм здатний демонструвати ефективність при фільтрації великої кількості помилкових зв'язків.

Алгоритм RANSAC. RANSAC (RANdom Sample And Consensus) - один з найбільш популярних в різних областях обробки зображень. Він не стоїть на місці і постійно вдосконалюється розробниками. Пропонуються нові рішення, що перевершують за швидкістю і якістю початкові версії алгоритму.

Даний метод відноситься до групи ітеративних, і кожен його крок можна розбити на етапи:

1. Вибір випадкової кількості протестованих точок і обчислення моделі на їх основі;
2. Для обчисленої моделі виконується класифікація інших точок (не "беруть участь" у першому етапі), вважається значення втрат, і якщо отриманий результат перевершує найкращий збережений раніше, даний набір допустимих точок запам'ятовується для подальших перевірок.

Для продуктивного використання алгоритму RANSAC, необхідно розумно вибрати кількість ітерацій алгоритму. При виборі невеликої кількості ітерацій, ми, можливо, не доберемося до найкращої моделі, а при великому його кількості сильно «втратимо» в часі.

### 3.4. Ректифікація стереопари, створення карти глибини

Після отримання особливих точок необхідно знайти їх координати в єдину систему, і далі перевірити отримані пари точок на виконання умови стереопари. Суть даної умови буде описана нижче.

Для початку опишемо деякі геометричні поняття і властивості. Розглянемо дві камери (рис.9).  $C$ ,  $C'$  – їх центри. Точка простору  $X$  проектується на площині зображень лівої і правої камер в точки  $x$  і  $x'$  відповідно. Прообразом точки  $x$  є промінь, що виходить від точки простору  $X$ . Цей промінь проектується на площину другої камери в пряму  $l'$ , звану епіполлярною лінією. Образ точки  $X$  на площині зображення другої камери обов'язково лежить на епіполлярній лінії  $l'$ .

Таким чином, існує взаємно-однозначна відповідність між кожною точкою одного зображення і епіполлярною лінією другого зображення. При цьому парна точка для  $x$  на зображенні правою камери може лежати тільки на відповідній епіполлярній лінії.

Епіполярна геометрія має дуже простий запис в координатах. Існує така матриця  $F$  розміру  $3 \times 3$ , що пара точок  $x$  і  $x'$  є стереопарою тоді і тільки тоді, коли виконується рівність:

$$x'^T F x = 0$$

Матриця  $F$  називається фундаментальною матрицею (fundamental matrix). З її допомогою обчислюються рівняння епіполярних ліній. Для точки  $x$  рівняння матиме вигляд:  $l^T x' = 0$ . Ранг  $F$  дорівнює двом, вона визначена з точністю до ненульового множника і залежить тільки від матриць вихідних камер  $P$  і  $P'$ .

Так само важливим поняттям в цій галузі є суттєва матриця (essential matrix):  $E = K'^T F K$ . У випадку, коли  $K$ ,  $K'$  - матриці внутрішніх параметрів камери будуть одиничними, дана матриця співпаде з фундаментальною. По ній можна визначити положення і поворот другої камери щодо першої, що використовується в задачах визначення руху камери.

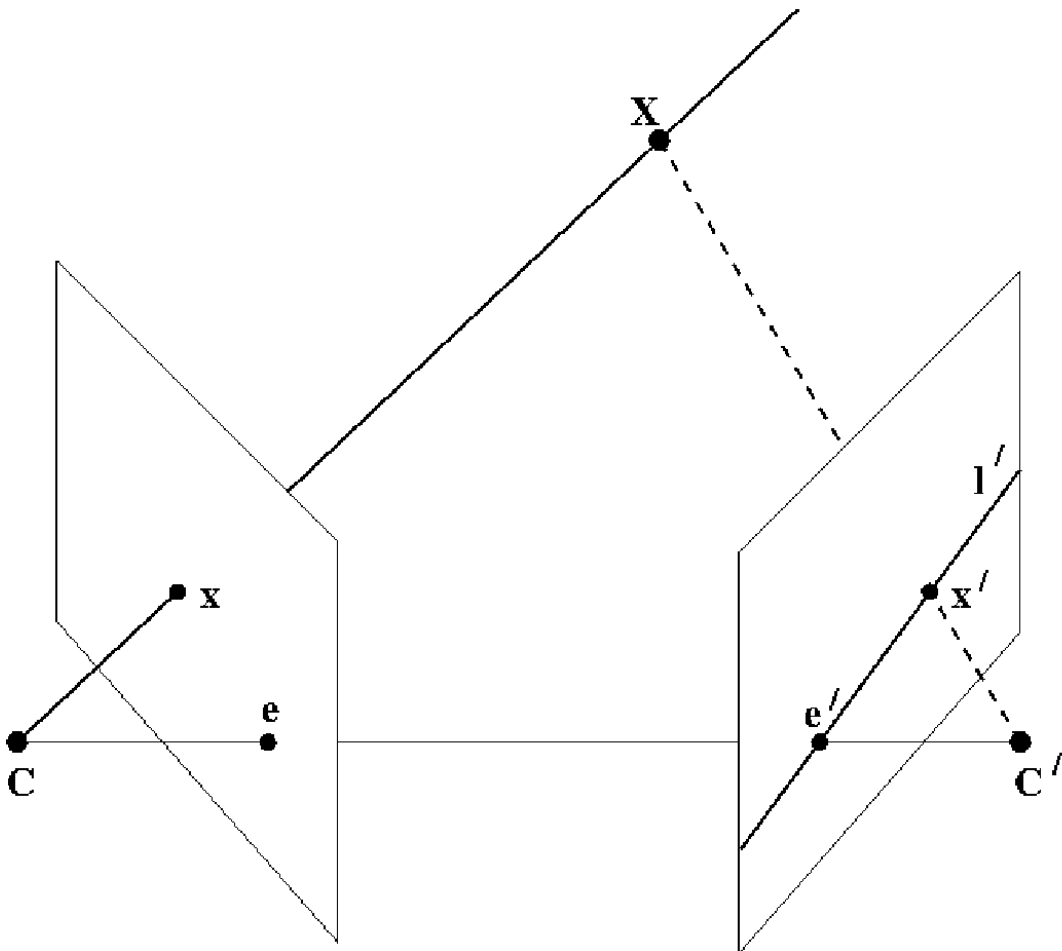


Рис.9 Епіполярна геометрія

Тепер обговоримо питання отримання тривимірних координат точки за координатами її проєкцій, тобто процес триангуляції. Він зводиться до вирішення такої системи:

$$\{x = PX \quad x' = P'X$$

Використовуючи обчислені координати, ми отримуємо координати прообразу. Таким чином, ми можемо легко визначити відстані до площини камери, а значить і можливість отримати карту глибини (рис.10). Також її можна швидко отримати за допомогою спеціального обладнання, наприклад, сенсора Kinect.



Рис.10 Приклад ректифікованих картинок, і відповідної їм карти глибини

## 4. 3D-реконструкція облич

Методи тривимірної реконструкції широко використовуються для відновлення 3D-геометрії людських облич. Відновлення 3D поверхонь і тривимірне розпізнавання осіб може бути застосовано при вирішенні наступних завдань:

- забезпечення безпеки – за допомогою камер відеоспостереження в місцях масового перебування людей можна відстежувати знаходження окремих особистостей, в тому числі злочинців;
- верифікація та ідентифікація користувачів різних систем;
- проведення контролю на прикордонних паспортно-візові контрольних пунктах, прохідних і КПП режимних, стратегічних і комерційних об'єктів;
- реклама і маркетингові дослідження - інтерактивні сервіси, що реагують на міміку покупця, дозволяють отримувати оцінку задоволеності споживача, а також таргетована реклама дозволяє передбачати, який продукт може бути дійсно цікавий конкретному користувачу.

Тривимірне розпізнавання осіб здійснюється за реконструйованими поверхнями, тому отримання 3D-геометрії обличчя є актуальним напрямком досліджень.

Алгоритми тривимірного розпізнавання осіб використовують інформацію про глибину і кривизну поверхні, в той час як системи 2D-розпізнавання, традиційно використовують ознаки, засновані на колірні характеристики пікселів зображення. Системи 2D-розпізнавання вельми чутливі до висвітлення і при нерівномірному висвітленні облич достовірність розпізнавання помітно падає. Тому основною перевагою тривимірного розпізнавання облич перед двовимірним є відсутність

залежності від умов освітлення. Для систем 3D-розпізнавання зміни в освітленні впливають лише на текстуру обличчя, а реконструйована поверхня обличчя зберігається незмінною. Однак не можна сказати, що 3D-розпізнавання осіб зовсім не залежить від освітлення. Залежно від алгоритму реконструкції деякі частини обличчя (наприклад, засвічені ділянки або області з дуже низьким контрастом) можуть виглядати як прогалини або викиди (артефакти) на поверхні реконструкції. Усунення подібних артефактів в малих кількостях виконується вручну, а при збільшенні їх числа розробляються і використовуються спеціальні методи, наприклад метод зворотньої відстані.

З переваг систем тривимірного розпізнавання осіб крім їх ефективності можна виділити також зручність у використанні. По-перше тривимірного розпізнавання є безконтактним, що зручно як користувачам системи, так і її власникам. По-друге, даний спосіб розпізнавання не вимагає від людини спеціальних дій, так як часто спрямований на розпізнавання осіб в режимі реального часу за допомогою обробки відео потоку камери. Людині не потрібно позиціонувати себе перед зчитувальних пристроїв, направляти погляд, або сканувати палець або долоня. Найчастіше людина взагалі може не звертати уваги на систему розпізнавання, а іноді навіть і не знати про її існування. По-третє, для розпізнавання не потрібне додаткове сканування біометричних ознак людини. Бази даних з фотографіями користувачів присутні на багатьох об'єктах ще до установки біометричної системи.

Одним з найважливіших недоліків тривимірного розпізнавання є висока вартість використовуваного обладнання, оскільки система 3D-розпізнавання вимагає набагато більших обчислювальних ресурсів, ніж двовимірні аналоги.

Отримання тривимірної моделі обличчя зазвичай передбачає наявності спеціального пристрою, як, наприклад, лазерний сканер, який вимірює час відображення лазера від об'єкта і отримує інформацію про глибину

розташування точок на його поверхні. Такі прилади складно використовувати поза спеціальними лабораторіями через труднощі в обладнанні необхідного оточення і їхню високу ціну. Лазерне сканування показує дуже високі результати, однак навіть при ідеальному освітленні сенсорні системи схильні до недоліків: частим випадком є поява на моделі артефактів у вигляді «дірок» і «виступів» через відсутніх даних і помилок відновлення. В простішому випадку реконструювання 3D моделей обличчя проводиться по одній або кільком фотографіям (фотограмметрія). При такому підході, як правило, використовують бази шаблонних моделей для пошуку максимально близьких до вихідного зображення ключових областей.

В якості альтернативи стерео зору і подібних методів, які використовують камери, з'являються методи тривимірної реконструкції, що використовують для відновлення поверхні обличчя всього одне 2D-зображення, або кілька зображень однієї людини, але без накладання на них будь-яких обмежень у висвітленні, позі, використовуваної камери. Алгоритми реконструкції обличчя за одним вхідним зображенням часто засновані на використанні параметричної моделі обличчя.

#### **4.1. 3D Face Morphable Model**

Для досягнення незалежності тривимірної реконструкції від пози і освітленості обличчя на зображенні корисно використовувати 3D-інформацію про об'єкт. За таких міркувань Blanz і Vetter майже 20 років тому ввели поняття параметричної моделі обличчя (3D Morphable Model (3DMM)). Параметрична модель обличчя – це задана параметрично тривимірною функцією, заснована на лінійній комбінації тривимірних моделей осіб, отриманих в результаті лазерного сканування. Поверхня і текстура обличчя описуються відповідними векторами коефіцієнтів. Таким

чином, процес реконструкції тривимірної поверхні обличчя з використанням параметричної моделі полягає в підборі параметрів, що описують її поверхню.

Як описано авторами моделі, представимо геометрію поверхні обличчя за допомогою вектора форми  $S = (X_1, Y_1, Z_1, X_2, \dots, Y_n, Z_n)^T \in R^{3n}$ , який містить  $X, Y, Z$  координати  $n$  вершин поверхні. Текстуру обличчя представимо у вигляді вектора текстури  $T = (R_1, G_1, B_1, R_2, \dots, G_n, B_n)^T \in R^{3n}$ , який містить  $R, G, B$  значення кольору  $n$  відповідних вершин поверхні обличчя. Параметрична модель обличчя побудована з використанням бази даних з  $m$  екземплярів осіб, кожне з яких представлено своїми вектором форми  $S_i$  і вектором текстури  $T_i$ .

Вважаючи, що всі особи перебувають в повній відповідності точок, тобто вершини з однаковим індексом в сітці відповідають одній і тій же семантичній точці на кожному обличчі, нові форми  $S_{model}$  і текстури  $T_{model}$  можуть бути виражені в барицентричних координатах як лінійна комбінація форм і текстур  $m$  обличч-екземплярів бази даних:

$$S_{mod} = \sum_{i=1}^m a_i S_i, \quad T_{mod} = \sum_{i=1}^m b_i T_i, \quad \sum_{i=1}^m a_i = \sum_{i=1}^m b_i = 1 \quad (4)$$

Таким чином довільне нове обличчя може бути згенеровано за допомогою варіювання параметрів форми  $\vec{a}$  і текстури  $\vec{b}$  обличчя.

Для оцінки реалістичності згенерованого обличчя при складанні параметричної моделі обличчя авторами статті була зроблена оцінка ймовірного розподілу коефіцієнтів  $a_i$  і  $b_i$ . Цей розподіл дозволяє контролювати ймовірність коефіцієнтів і, отже, регулює ймовірність появи конкретного обличчя.

Вважаючи, що особи в базі даних розподілені нормально, за допомогою методу головних компонент (PCA), можна виконати перетворення до ортогональної системи координат:

$$S_{model} = \underline{S} + \sum_{i=0}^{m-1} \alpha_i s_i, \quad T_{model} = \underline{T} + \sum_{i=0}^{m-1} \beta_i t_i$$

Де  $\underline{S}, \underline{T}$  – середні значення форми і текстури обличчя параметричної моделі,  $s_i, t_i$  – власні вектори коваріаційних матриць форм і текстур,  $\alpha_i, \beta_i \in R^{m-1}$  – коефіцієнти форми  $S_{model}$  і текстури  $T_{model}$  обличчя відповідно.

Виразність моделі може бути збільшена за допомогою поділу обличчя на сегменти, такі як очі, ніс, рот і навколишнє область (рис. 11), які при трансформаціях змінюються незалежно один від одного. Така сегментація еквівалентна розбиття векторного простору обличчя на незалежні підпростори. Таким чином, повну 3D модель особи може бути згенеровано шляхом з'єднання всіх сегментів, отриманих окремо за допомогою лінійної комбінації.



Рис.11 Сегменти обличчя, оброблювані незалежно: очі, ніс, рот, зовнішня область

Ключовим елементом роботи є алгоритм для автоматичного зіставлення параметричної моделі з одним або декількома зображеннями. У цьому алгоритмі поряд з описаними параметрами форми і текстури

особи використовуються також параметри рендеринга. Вектор параметрів рендеринга  $\vec{p}$  описує такі показники, як стан камери (азимут і висоту), масштаб об'єкта, поворот і зрушення площині зображення, інтенсивність навколишнього і спрямованого світла та ін.

В ході алгоритму коефіцієнти 3D-моделі оптимізуються разом з набором параметрів рендеринга так, що вони створюють зображення якомога ближче до вхідного зображення в термінах евклідової відстані:

$$E_I = \sum_{x,y} \|I_{input}(x,y) - I_{model}(x,y)\|^2 \quad (5)$$

Алгоритм починає ітеративну оптимізацію від середнього особи і з грубо оціненими користувачем параметрами рендеринга. Далі в циклі створюється текстура, відображена на 3D-поверхню обличчя, за поточними параметрами моделі, візуалізується зображення і оновлюються параметри відповідно до залишкової різниці.

Наявність численних статей, присвячених реконструкції осіб з використанням параметричної моделі, підтверджують той факт, що з появою 3DMM аналіз зображень обличчя вийшов на новий рівень. Однак слід зазначити, що основна перешкода у використанні 3DMM полягає в трудомісткому процесі побудови моделі – створення власної бази тривимірних обличчя, що вимагає точного і швидкого 3D-сканера, сканування декількох сотень особистостей і розрахунку щільного відповідності точок між отриманими тривимірними моделями.

У зв'язку з цим, була розроблена і описана загальнодоступна параметрична модель Basel Face Model (BFM), безкоштовна для використання в некомерційних цілях. Модель BFM побудована на відсканованих особах 100 чоловіків і 100 жінок в нейтральному виразі. Параметрична модель особи BFM містить 53490 вершин, що становлять 160470 площин.

Ця модель не тільки дозволяє розробляти алгоритми аналізу зображень на основі 3DMM, але також включає нові функції, як наприклад генерація синтетичного обличчя по випадковим коефіцієнтами моделі (рис. 12). Функції роботи з загальнодоступною моделлю реалізовані на мові Matlab.



Рис.12 Синтетичні лиця згенеровані по випадковим параметрам моделі BFM.

#### 4.2. Заходи якості реконструкції для підгонки до зображень

Процес отримання реконструкції обличчя найбільш близького до вихідного зображення називається підгонкою (fitting). Підгонка зображення виконується з використанням будь-якої міри якості реконструкції, або інакше міри близькості реконструйованої поверхні з вихідним зображенням.

Зіставлень зображень за допомогою евклідової відстані за формулою (5) недостатньо, оскільки вони нечутливі до невеликих, але важливим помилок і артефактів, через які реконструкція особи стає неприродною на думку людини.

Для людей якість може означати, наскільки природним і правдоподібним виглядає тривимірне обличчя, а також наскільки він схожий на людину на зображенні. Для невдалих реконструкцій обидва критерії, як правило, порушуються одночасно, тому більшість з методів автоматичної оцінки якості реконструкції зазвичай оцінюють лише правдоподібність і не вимірюють схожість з вхідним обличчям. Метою

досліджень [11] було виявлення міри якості, найбільш близькою до оцінок, які привласнюють реконструкції люди.

Більш того, автори статті стверджують, що в багатьох реальних додатках є більше однієї фотографії людини, тому автоматизований алгоритм реконструкції може використовувати надлишкові дані з декількох зображень для збільшення надійності.

Запропонований авторами [11] алгоритм виробляє окремі тривимірні реконструкції для кожного вхідного зображення, а потім об'єднує їх в оптимальне спільне рішення. Метод окремо працює на різних ділянках особи, вибирає найбільш правдоподібні реконструкції і об'єднує їх в одне тривимірне обличчя. Ключовий компонент алгоритму – новий показник візуальної якості тривимірних реконструкцій, заснований на поверхневих нормалях. Автоматична оцінка якості зображення в комп'ютерній графіці і комп'ютерному зорі є фундаментальною завданням. Простих зіставлень зображень недостатньо, оскільки вони нечутливі до невеликих, але важливих помилок і артефактів.

Було встановлено, що потенційні причини невдалих реконструкцій, такі як світлові ефекти, оклюзії або екстремальні вирази обличчя, зазвичай призводять алгоритм до моделей, далеким від середньої, і дуже чутливою мірою для цього є відхилення нормалей поверхні від середнього.

Оцінка якості реконструкцій з використання поверхневих нормалей визначається наступним чином. Вважаючи, що параметрична модель, певна рівняннями (4), приведена до повної точкової відповідності між вершинами і моделі, нова міра якості  $d_{normal}$  аналізує різницю між нормалями  $n_i$  поверхні реконструйованого обличчя і нормалями  $n'_i$  середнього обличчя:

$$d_{normal} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \arccos \frac{n_i \cdot n'_i}{\|n_i\| \cdot \|n'_i\|} \quad (6)$$

Таким чином, нормальна відстань визначається шляхом обчислення кута між нормальними середнього і відновленого обличчя для пари відповідних вершин. Для кожного сегмента особи (очі, рот, ніс і навколишня область) можна визначити індивідуальне відстань  $d_{normal}$ , яке відображає правдоподібність конкретного сегмента. Ці значення усереднюють для отримання глобального значення відстані.

Однак варто зауважити, що у поверхонь людських обличч нормалі в деяких вершинах на носі, очах або губах змінюються більше, ніж інші. Автори статті проаналізували оригінальні 200 тривимірних сканів параметричної моделі і створили різні вагові карти, які враховують ці локальні відмінності шляхом масштабування областей з високою варіацією нормалей. Потім була знайдена найкраща карта ваг, яка визначається за допомогою виразу  $\omega = 1 - \frac{\phi_i - \phi_{min}}{\phi_{max} - \phi_{min}}$ , де  $\phi$  – середній кут відхилення нормалі  $n_i$  від середньої нормалі  $n'_i$  в кожній вершині  $i$  на всіх обличчях бази даних, і зважена нормальна відстань визначається виразом:

$$d_{normalW} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \omega_i \arccos \frac{n_i \cdot n'_i}{\|n_i\| \cdot \|n'_i\|} \quad (7)$$

Загальний алгоритм можна описати наступними кроками:

- Виконати підгонку 3DMM для кожного з вхідних даних зображення людини;
- Вибрати кращі результати на кожному сегменті обличчя за допомогою  $d_{normal}$ ;
- Обчислити зважені лінійні комбінації сегментів;
- З'єднати їх в одне тривимірне обличчя

Реконструювана поверхня кожного сегмента визначається зваженою лінійною комбінацією відповідних сегментів, заснованою на порядку реконструкцій сегментів в списку ранжирування. Вага сегмента

зменшується з його рангом. Таким чином, комбінована поверхня для кожного окремого сегмента

$$S_{seg} = \sum_{i=0}^{m-1} \alpha_i S_{seg,i}$$

визначається  $m$  індивідуальними реконструкціями відповідних сегментів  $S_{seg,i}$ , зважених за допомогою

$$\alpha_i = \frac{1 - \left(i \cdot \frac{1}{m}\right)}{\sum_{c=0}^{m-1} 1 - \left(c \cdot \frac{1}{m}\right)}$$

За результатами експериментів, автори алгоритму також визначили граничне значення міри якості, який відокремлює правдоподібні від неправдоподібних реконструкцій і визначає, які реконструкції розглядаються у зваженій сумі, а якими варто знехтувати.

Автоматизована 3D-реконструкція, запропонована в цій статті, компенсує низьку точність і надійність автоматично визначаються позицій, використовуючи більше одного зображення особи. Варто зауважити, що, на відміну від стерео і багатовидових алгоритмів, в даному підході враховуються нежорсткі деформації міміки і великі відмінності в умовах формування зображення.

Експериментальні порівняння існуючих заходів якості з оцінками, які встановлювали люди тестованим реконструкціям, показали, що нові міри якості, засновані на поверхневих нормалях (6), (7) значно перевершують раніше використовувані оцінки якості реконструкції.

## Висновок

В ході виконання даної роботи була вивчена частина такого актуального напрямку як комп'ютерний зір і обробка зображень. Була проведена дослідницька робота і аналіз існуючих методів побудови 3D-моделей.

Під час цієї роботи були вивчені основні принципи тривимірної реконструкції осіб. Було приділено увагу методам 3D-реконструкції з використанням параметричної моделі обличчя, які працюють лише за одним вхідним зображенням, що дозволяє їх використовувати в умовах обмежених ресурсів і без додаткового обладнання.

Отримані в даній роботі результати можуть бути використані в якості бази для інших проектів 3D-реконструкцій.

## Перелік джерел посилання

1. A 3D Face Model for Pose and Illumination Invariant Face Recognition /IEEE. – Genova, Italy, 2009.
2. 3D model viewer for the eos Morphable Model library. – <https://github.com/patrikhuber/eos-model-viewer>. – Accessed: 2017-05-20.
3. Blanz Volker, Vetter Thomas. A morphable model for the synthesis of 3D faces / ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co. – 1999. – P. 187–194.
4. Detailed 3D reconstruction of large-scale heritage sites with integrated techniques / Sabry F El-Hakim, J-A Beraldin, Michel Picard, Guy Godin // IEEE Computer Graphics and Applications. – 2004. – Vol. 24, no. 3. – P. 21–29.
5. Jeni László A, Cohn Jeffrey F, Kanade Takeo. Dense 3D face alignment from 2D videos in real-time / IEEE. – Vol. 1. – 2015. – P. 1–8.
6. Kemelmacher-Shlizerman Ira, Basri Ronen. 3D face reconstruction from a single image using a single reference face shape // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 2011. – Vol. 33, no. 2. –P. 394–405.
7. J. D. BRIERS Laser speckle contrast imaging for measuring blood flow, Optica Applicata, 2007, 14 p.
8. Веб-сайт 3Д моделювання :  
“<https://sites.google.com/site/3dmodeluvana/so-take-3d-modeluvanna>”
9. Шапиро Л. Компьютерное зрение/ под ред.: С. М. Соколов, пер.: А. А. Богуславский, Л. Шапиро. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. 762 с.
10. Веб-сайт ГітХаб : <https://github.com/patrikhuber/eos>
11. Piotraschke Marcel, Blanz Volker. Automated 3d face reconstruction from multiple images using quality measures. — 2016. — P. 3418–3427.

12. Курс Digital Image Processing.:  
<http://freevidelectures.com/Course/2316/Digital-Image-Processing-ИТ-Кхаргпур>.
13. Курс "Введение в компьютерное зрение", 2015
14. S. M. Seitz and C. R. Dyer, Proc. Computer Vision and Pattern Recognition Conf. Photorealistic Scene Reconstruction by Voxel Coloring, 1997, 1067-1073.
15. Путятин, Е. П. (1990). Обработка изображений в робототехнике. Москва.
16. Путятин, С. П., Гороховатський, В. О., & Матат, О. О. (2006). Методи та алгоритми комп'ютерного зору: навч. посіб. Харків: ТОВ «Компанія СМІТ».
17. Lyashenko, V., Kobylin, O., & Ahmad, M. A. (2014). General methodology for implementation of image normalization procedure using its wavelet transform. International Journal of Science and Research (IJSR), 3(11), 2870-2877.
18. Веб-сайт OpenCV: <https://opencv.org/>
19. Веб-сайт:  
[http://pz.vntu.edu.ua/media/uploads/metod/animations/KA\\_lecture9.pdf](http://pz.vntu.edu.ua/media/uploads/metod/animations/KA_lecture9.pdf)