

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”
ІНСТИТУТ ПРИКЛАДНОГО СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ
КАФЕДРА СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

(підпис)
М. В. Грайворонський

“ ”
(ініціали, прізвище)

2022 р.

Дипломна робота

освітньо-кваліфікаційного рівня “бакалавр”

за спеціальністю 8.04030101 «Прикладна математика»

на тему «Тема»

Виконав студент 4 курсу групи КА-81

Хропачов Іван

Керівник Rank, Кригін Валерій Михайлович

Рецензент Rank, Name

(підпис)

(підпис)

(підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авто-
рів без відповідних посилань.

Студент _____

РЕФЕРАТ

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

ABSTRACT

ЛВЫАЫЛВДЦЛВЫАЫЛВОАМДФВЫОСАЛЖФВС

РЕФЕРАТ

СЛОВА

ЗМІСТ

Вступ	6
1 Теоретичні відомості	7
1.1 Камера-обскури та стереопара	7
1.2 Сцена.	7
1.3 Епіполярні лінії.	8
1.4 Матриця гомографії та фундаментальна матриця.	9
1.5 Ректифікація зображень	11
2 Алгоритм ректифікації стереопари	13
2.1 Постановка задачі	13
2.2 Пошук фундаментальної матриці.	13
2.3 Матриця ректифікації правого зображення	16
2.4 Матриця ректифікації лівого зображення.	21
2.5 Аналіз алгоритму.	22
3 Практичні результати	23
Висновки	24
Перелік посилань	25

ВСТУП

Актуальність роботи. ?

Об'єкт дослідження — Стереопари

Предмет дослідження — Обчислювальна геометрія

Мета дослідження. Реалізувати і експериментально перевірити новий метод ректифікації стереопар

Завдання наступні:

- 1) Запропонувати теоретичне підґрунтя для нового методу ректифікації зображень
- 2) Розробити новий алгоритм на практиці

Практичне значення одержаних результатів. Більш простий алгоритм ректифікації стереопар

1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1.1 Камера-обскури та стереопара

В даній роботі ми маємо вхідні дані з двох камер-обскур. Камери-обскура — це прототип фотографічного апарату, темне приміщення з одним малим отвором, через який на протилежну стіну проектується перевернуте зменшене зображення предметів ззовні (сцени). Цей малий отвір ми називаємо центром камери, а протилежна стіна є площиною отриманого зображення. Не втрачаючи загальності, перенесемо площину зпроектованого зображення до уявної площини між центром камери та об'єктом (сценою). Таким чином отримане зображення не буде перевернутим.

На вхід ми маємо пару плоских зображень одного і того ж об'єкта, зазначених вище. Зображення мають відмінності між собою та покликані створити ефект об'єму. Ефект об'єму виникає в силу того, що розташовані на різній відстані від камери-обскури частини сцени (об'єкту) при фотографуванні з різних точок мають різне кутове зміщення (паралакс). Надалі ми будемо називати лівим — зображення, центр камери якого знаходиться лівіше в просторі відносно горизонтальної осі, а правим — друге зображення, центр камери якого правіше. Така пара зображень називається стереопарою. Саме стереопара дається на вхід в нашої роботі.

1.2 Сцена

//Зображення сцени та фотоапаратів

Нехай точка належить деякому об'єкту в трьохвимірному просторі. Ми маємо стереопару цього об'єкту. Тож ми маємо два зображення, де лежать проєкції точки X . Назвемо її проєкцію на ліве зображення — x , а проєкцію на праве

зображення — x' . Зазначемо, що x та x' точки у трьохвимірному просторі. Введемо центри камер наших зображень: O — лівого та O' — правого. Очевидно, що пряма Ox перетинає X , так само як і пряма $O'x'$. Разом прямі Ox та $O'x'$ утворюють площину π . Якщо центри камер відомі, то π може бути задана як і точкою X , так і точками x чи x' . Таким чином для кожної точки чи проекції точки деякого об'єкту, який ми фотографуємо, існує відповідна площина π , яка визначає певну точку об'єкта та дві її проекції на зображення стереопари. Далі будемо називати площину π — епіполярна площина точки X .

1.3 Епіполярні лінії

Центри камер та $'$ — фактично теж лежать у трьохвимірному просторі нашої сцени. Отже вони теж проектується на зображення. Назвемо проекцію на праве зображення — e' , а проекцію $'$ на ліве зображення — e . Точки e та e' називаються лівою та правою епіполярними точками (епіполями) відповідно.

Епіполі лежать на прямій OO' , отже вони теж належать площині π . Тепер, як зазначено вище побудуємо π , через деяку проекцію на ліве зображення — x . Маємо питання: А де саме знаходиться відповідна проекція на праве зображення — точка x' , відносно площини π ?

Введемо точку X , яку ми проектували в x та x' . Ми знаємо однозначно, що X знаходиться на прямій Ox . Спроектуємо цю пряму на праве зображення. Оскільки центр правого зображення O' лежить на площині π , то і проекція прямої з π теж буде лежати на площині π . Маємо, що проекція лежить на π та на площині правого зображення — на прямій їх перетину. Вона має проходити через праву епіполь e' , оскільки точки O проектується в епіполь e' . Назвемо зпроектовану пряму прямою l' . На ній і повинна лежати точка x' .

Назва прямої l' — епіполярна пряма правого зображення. Аналогічно знаходимо пряму l — епіполярну пряму лівого зображення, яка проходить через

ліву епіполь e . Епіполярна площина π перетинає площини лівого та правого зображень та визначає відповідність між епіполярними лініями l та l' .

Можна помітити, що в незалежності від вибраної точки X , епіполярна площина буде проходити через епіполі. Звідси і епіполярні лінії завжди будуть перетинати епіполі. Адже епіполь — це проекція центра камери на зображення. Таким чином всі епіполярні лінії перетинаються в епіполі. Кажуть, що епіполярні лінії збігаються до епіполі. Оскільки чим ближче точка сцени до центра камери, тим ближче проекція даної точки до епіполярної точки.

1.4 Матриця гомографії та фундаментальна матриця

Завдяки лінійності проектування в камері-обскурі, відношення між точкою x на лівому зображенні та відповідною епіполярною лінією l' теж лінійне. Фундаментальна матриця $F \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ описує це відношення з точністю до константи формулою

$$l' = F \cdot x. \quad (1.1)$$

Звідси дуже легко знаходимо наступне епіполярне обмеження. Оскільки точка x' , яка відповідає x , лежить на прямій l' , то

$$x'^T \cdot F \cdot x = 0. \quad (1.2)$$

Епіполі e та e' утворюють праве та ліве нульові ядра фундаментальної матриці F . Маємо

$$F \cdot e = 0 \quad (1.3)$$

$$F^T \cdot e' = 0. \quad (1.4)$$

Введемо поняття матриці гомографії. Матриця гомографії — це матриця

$H \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$, яка пов'язує проекцію певної точки сцени на ліве зображення, з її проекцією на праве зображення. Її зв'язок з фундаментальною матрицею F визначається наступним співвідношенням [1]

$$F = [e']_{\times} \cdot H, \quad (1.5)$$

де кососиметрична матриця векторного добутку

$$[e']_{\times} = \begin{bmatrix} 0 & -e'_z & e'_y \\ e'_z & 0 & -e'_x \\ -e'_y & e'_x & 0 \end{bmatrix}. \quad (1.6)$$

З нерівності (1.5) нескладно показати, що $\text{rank}(F) = 2$. Оскільки $\text{rank}([e']_{\times}) = 2$, а $\text{rank}(H) = 3$,

//Чи розписувати, чому це правда?

Введемо іншу властивість фундаментальної матриці

$$F = C \cdot [e']_{\times} \cdot [e']_{\times} \cdot F, \quad (1.7)$$

де C — деяка константа, а $[e']_{\times}$ — матриця векторного добутку.

З формул (1.5) та (1.7) маємо, що існує деяка матриця

$$S = C \cdot [e']_{\times} \cdot F, \quad (1.8)$$

що має схожі властивості з матрицею гомографії H . А саме — вона пов'язує проекцію певної точки сцени на ліве зображення, з деякою точкою, яка лежить на одній епіполярній прямій з проекцією на праве зображення. Це найважли-

віша властивість матриці S для подальшої роботи.

//Розписати, що за схожі властивості, відмінність S і H !!

1.5 Ректифікація зображень

Процесом ректифікації називається проектування зображень стереопари на одну спільну площину (копланарні площини). Ректифікація трансформує вхідні зображення так, наче вони були зроблені тільки з горизонтальним зміщенням. Як наслідок: всі епіполярні лінії — горизонтальні. Таким чином, щоб ректифікувати зображення треба зробити епіполярні лінії паралельними осі X , що означає — винести епіполь зображення на нескінченність.

$$R_r \cdot e' = [f_r \ 0 \ 0]^T, \quad (1.9)$$

де R_r — матриця ректифікації правого зображення, e' — права епіполь, а f_r — деяка константа.

Аналогічно і для лівого зображення

$$R_l \cdot e = [f_l \ 0 \ 0]^T, \quad (1.10)$$

де R_l — матриця ректифікації лівого зображення, e — ліва епіполь, а f_l — деяка константа.

Задача ректифікації і полягає в пошуку таких R_r та R_l , щоб виконувалися умови (1.9) та (1.10).

Але виникає нюанс: Як оцінювати якість ректифікації? Певної відповіді не існує. Оскільки зазвичай після завдання ректифікації стереопари, пару зображень зміщують, то оцінка відбувається по точності зміщення двох зобра-

жень. Під зміщенням мається на увазі різниця в місцезнаходженні відповідних пікселів стереопари при поєднанні двох ректифікованих зображень.

2 АЛГОРИТМ РЕКТИФІКАЦІЇ СТЕРЕОПАРИ

2.1 Постановка задачі

Задача ректифікації стереопари полягає у горизонтальному вирівнюванні епіпольярних ліній зображень стереопари.

Метод полягає у ретифікації спочатку правого зображення, а потім лівого. Ліве зображення ретифікується за допомогою матриці ректифікації правого зображення R_r та матриці S , яка містить фундаментальну матрицю. Задля оцінки ректифікації, вирішується одна оптимізаційна задача для знаходження фінальної матриці R_l .

Головна відмінність данної роботи від попередніх — у матриці S . Метод Hartley[2] використовував замість неї матрицю гомографії H та вирішував декілька оптимізаційних задач. Метод Малона[3] аналогічно Hartley знаходить трохи іншу матрицю перетворення, але так само вирішує декілька оптимізаційних задач. Наш запропонований метод шукає матрицю ректифікації правого зображення за допомогою фундаментальної матриці F . А використовуючи властивість матриці S , метод вирішує тільки одну оптимізаційну задачу вздовж X координати зображень.

2.2 Пошук фундаментальної матриці

2.2.1 Знаходження ключових точок

Ключові точки — це характерні координати зображення разом з їх дескрипторами. Дескриптори — це вектори певної довжини, які максимально точно описують деяку точку зображення. По суті, ключові точки є ознакою зображення.

Є різні методи вилучення ключових точок із зображення SIFT[4], SURF[5], ORB[6] та інші. Ми використовуємо традиційний SIFT алгоритм. Завдяки ньому отримаємо перелік координат та відповідний перелік векторів з закодованими ознаками певної координати зображення. Тепер переліки двох зображень стереопари треба співставити.

2.2.2 Співставлення ключових точок

Ми знайшли ключові точки окремо для кожного зображення. Співставимо їх. Тим самим дізнаємось, які з них присутні на обох зображеннях. Та дізнаємось різницю в росташуванні відповідних точок на різних зображеннях. Це потрібно для подальшого знаходження фундаментальної матриці стереопари.

Ми використовуємо метод співставлення FLANN[7]. Він сортує найкращі потенційні співставлення дескрипторів відповідних точок. Як результат отримуємо відфільтрований перелік координат ключових точок лівого зображення та відповідний їм перелік координат ключових точок правого зображення.

2.2.3 Знаходження фундаментальної матриці

Фундаментальна матриця F показує лінійне відношення між точкою на лівому зображенні та відповідною епіполярною лінією на правому зображенні. Тому маючи перелік відповідних ключових точок стереопари можна знайти матрицю F .

Існують різні методи для знаходження фундаментальної матриці за допомогою відповідних точок стереопари: Seven-Point[8], Eight-Point[9], RANSAC[10] та інші. Ми вибрали стандартний RANSAC. На виході маємо фундаментальну

матрицю F з лівого у праве зображення нашої стереопари.

2.2.4 Знаходження правої епіполі

Знайдемо праву епіполярну точку. За (1.4) — це праве ядро фундаментальної матриці F . Транспонуємо матрицю. Далі використовуємо SVD[11], де знаходимо ортонормований базис нульового простору отриманної матриці.

$$e' = [e'_{nx} \ e'_{ny} \ e'_{nz}]^T. \quad (2.1)$$

//Чому не втратимо загальності? Чи треба це пояснити?

Не втрачаючи загальності, можемо спростити розрахунки та пронормувати епіполі. Зробимо нормування по Z координаті (також реалізований варіант нормування по нормі епіполі). Тоді права епіполь матиме вигляд

$$e' = \begin{bmatrix} \frac{e'_{nx}}{e'_{nz}} & \frac{e'_{ny}}{e'_{nz}} & \frac{e'_{nz}}{e'_{nz}} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} e'_x & e'_y & 1 \end{bmatrix}^T. \quad (2.2)$$

Аналогічно ліва епіполь матиме вигляд

$$e = [e_x \ e_y \ 1]^T. \quad (2.3)$$

У вигляді кососиметричної матриці для векторного добутку

$$[e']_{\times} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & e'_y \\ 1 & 0 & -e'_x \\ -e'_y & e'_x & 0 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

та

$$[e]_{\times} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & e_y \\ 1 & 0 & -e_x \\ -e_y & e_x & 0 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

2.3 Матриця ректифікації правого зображення

2.3.1 Зміщення центру правого зображення

Введемо розміщення правої камери у просторі. Її зображення нехай лежить на площині $z = 1$, а центр камери — в нулі координат. Відразу помітимо, що вектор правої епіполі, який ми знайшли раніше, може дивитися в сторону протилежну площині $z = 1$ (Це не вплине на якість результуючих зображень, а лише зеркально переверне їх).

//Чи буде місцезнаходження центру зображення впливати на результат, чи тільки на зміщення результату?

Центр правого зображення має бути перпендикулярний до площини $z = 1$ і знаходиться в $[0, 0, 1]$. Але за замовчуванням центр зображення розташований у лівому верхньому кутку зображення. Саме тому введемо матрицю зміщення $T \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$. Вона буде зміщувати лівий верхній куток правого зображення з точки $[0, 0, 1]$, так щоб в $[0, 0, 1]$ опинився центр правого зображення.

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -c_x \\ 0 & 1 & -c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.6)$$

де $c_x = \frac{w}{2}$; $c_y = \frac{h}{2}$, а w і h — розміри правого зображення.

Також знайдемо обернену до T , вона нам знадобиться для фінального зміщення отриманого результату назад.

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & c_x \\ 0 & 1 & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.7)$$

де $c_x = \frac{w}{2}$; $c_y = \frac{h}{2}$, а w і h — розміри правого зображення.

Права епіполь теж лежить на правому зображенні, тож її теж треба змістити. Перевіримо куди напрямлена знайдена права епіполь. Якщо її Z координата від'ємна, то домножимо матрицю зміщення на мінус: $T = -T$. Цим ми дзеркально трансформуємо результат. Подіємо $T \cdot e'$. Надалі при використанні e' , ми будемо мати на увазі праву епіполь зі зміщенням $T \cdot e'$:

$$e' = T \cdot e' = \begin{bmatrix} e'_x - c_x & e'_y - c_y & 1 \end{bmatrix}^T. \quad (2.8)$$

2.3.2 Занулення Y координати правої епіполі

Тепер, коли ми розуміємо розміщення правого зображення у просторі, можна ректифікувати зображення. Винесемо праву епіполь на нескінченність — $[f_r 00]^T$, де f_r — деяка константа. Почнемо з занулення Y координати. Для цього введемо ортонормовану праву матрицю повороту R , таку, що

$$R \cdot e' = \begin{bmatrix} (R \cdot e')_x & 0 & 1 \end{bmatrix}^T. \quad (2.9)$$

Введемо вектор $k = [001]^T$ — один з базисних векторів простору. Побу-

дуємо R таким чином

$$R = \begin{bmatrix} \frac{(k \times (e' \times k))^T}{\|(k \times (e' \times k))\|} \\ \frac{(k \times e')^T}{\|(k \times e')\|} \\ k^T \end{bmatrix}. \quad (2.10)$$

Де R не чіпає Z координату; зануляє Y координату: $(k \times e')^T \cdot e' = 0$; а X координата — векторний добуток двох інших, таким чином, щоб матриця залишалася правосторонньою.

Введемо константу $d = \sqrt{e_x'^2 + e_y'^2}$. Спростимо матрицю повороту R

$$R = \begin{bmatrix} \frac{1}{d} \cdot (k \times (e' \times k))^T \\ \frac{1}{d} \cdot (k \times e')^T \\ k^T \end{bmatrix}. \quad (2.11)$$

У схожій статті [1] будували аналогічну матрицю повороту, але лівосторонню. Ця різниця спричинила появу крайових випадків, коли даний метод ректифікації не спрацював. В цій роботі цих недоліків нема і метод працює у всіх випадках.

2.3.3 Занулення Z координати правої епіполі

Тепер, коли права епіполь має вигляд $[(R \cdot e')_x 0 1]^T$ занулемо її Z координату. Введемо матрицю трансекції G , таку, що

$$G \cdot \begin{bmatrix} (R \cdot e')_x & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R \cdot e')_x & 0 & 0 \end{bmatrix}^T. \quad (2.12)$$

Побудуємо G , таким чином

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \frac{-1}{(R \cdot e')_x} & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.13)$$

Можемо спростити скаляр $(R \cdot e')_x = d$. Тоді маємо

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \frac{-1}{d} & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.14)$$

Підсумовуючи, отримали праву епіполь у вигляді $[d00]^T$. Саме такий вигляд і приймає права епіполь після дії на неї правої матриці ректифікації за (1.5). Звідси $[f_r 00]^T = [d00]^T$, де $f_r = d$.

2.3.4 Об'єднаємо всі перетворення у праву матрицю ректифікації

Завдання було знайти таку матрицю ректифікації правого зображення, що виносить на некінченність праву епіполь.

$$R_r \cdot e' = [f_r \ 0 \ 0]^T, \quad (2.15)$$

де R_r — матриця ректифікації правого зображення, e' — права епіполь, а f_r — деяка константа.

Об'єднавши всі попередні перетворення отримаємо праву матрицю ре-

ктифікації яка задовольняє умову (1.5)

$$R_r = T^{-1} \cdot G \cdot R \cdot T, \quad (2.16)$$

де T — матриця зміщення центру зображення, R — права ортонормована матриця повороту, G — матриця трансекції.

$$\begin{aligned}
 R_r &= \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & cx \\ 0 & 1 & cy \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \frac{-1}{d} & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{d} \cdot (k \times (e' \times k))^T \\ \frac{1}{d} \cdot (k \times e')^T \\ k^T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & -cx \\ 0 & 1 & -cy \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & cx \\ 0 & 1 & cy \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{d} \cdot (k \times (e' \times k))^T \\ \frac{1}{d} \cdot (k \times e')^T \\ k^T - \frac{1}{d^2} \cdot (k \times (e' \times k))^T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & -cx \\ 0 & 1 & -cy \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.
 \end{aligned} \quad (2.17)$$

Таким чином ми знайшли R_r , що задовольняє (1.5).

2.4 Матриця ректифікації лівого зображення

2.4.1 Проміжна матриця ректифікації

2.4.1.1 Перетворення лівого зображення

Знайдемо таку R_l , що переносить ліву епіполярну точку на нескінченність. Нехай $R_l = A \cdot M'$, де A — матриця з параметрами, а M' — має ранг 3.

Візьмемо фундаментальну матрицю F і з її допомогою зіставимо епіполярні лінії лівого зображення до епіполярних ліній правого $[e'_t]_{\times} \cdot F$. Далі застосуємо на них знайомий алгоритм для перетворення правого зображення. Результат назвемо матрицею $M = R_r \cdot [e'_t]_{\times} \cdot F$. Отримаємо

$$M = R_r \cdot [e'_t]_{\times} \cdot F = \begin{bmatrix} \frac{(e'_t \times k)^T}{\|(e'_t \times k)\|} \\ \frac{(k \times (e'_t \times k))^T}{\|(k \times (e'_t \times k))\|} - \|(k \times (e'_t \times k))\| \cdot k^T \\ (1 + \frac{1}{\|(k \times (e'_t \times k))\|^2}) \cdot (k \times e'_t)^T \end{bmatrix} \cdot F. \quad (2.18)$$

Бачимо, що $\text{rank}(M) = 2$. M_x та M_z колінеарні, коли M_x та M_z отрогональні.

Створимо нову матрицю M' на основі матриці M , щоб $\text{rank}(M) = 3$. Другу та третю координати залишимо без змін, першу? ж координату змінимо

на векторний добуток двох інших. Отримаємо

$$M' = \begin{bmatrix} M_y \times M_z \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix}. \quad (2.19)$$

Ми збільшили ранг, але втратили властивість ректифікації (переносу лівої епіполі на нескінченність).???

Введемо матрицю

$$A = \begin{bmatrix} a & b & c \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.20)$$

щоб знайти R_l . Залишилося вирішити оптимізаційну задачу та знайти параметри a, b, c методом найменших квадратів.

2.5 Аналіз алгоритму

?

3 ПРАКТИЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ

ВИСНОВКИ

В результаті виконання роботи вдалося.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- 1 Luong, Q.-T. Canonical Representations for the Geometries of Multiple Projective Views / Q.-T. Luong, T. Viéville // *Computer Vision and Image Understanding*. — 1996. — Vol. 64, no. 2. — Pp. 193–229. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1077314296900557>.
- 2 Hartley, Richard I. Theory and Practice of Projective Rectification / Richard I. Hartley // *Int. J. Comput. Vis.* — 1999. — Vol. 35, no. 2. — Pp. 115–127.
- 3 Mallon, John. Projective rectification from the fundamental matrix / John Mallon, Paul F. Whelan // *Image Vis. Comput.* — 2005. — Vol. 23. — Pp. 643–650.
- 4 Lowe, David G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints / David G. Lowe // *Int. J. Comput. Vision*. — 2004. — nov. — Vol. 60, no. 2. — P. 91–110. <https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>.
- 5 Bay, Herbert. SURF: Speeded Up Robust Features / Herbert Bay, Tinne Tuytelaars, Luc Van Gool // *ECCV*. — 2006.
- 6 ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF / Ethan Rublee, Vincent Rabaud, Kurt Konolige, Gary Bradski // *2011 International Conference on Computer Vision*. — 2011. — Nov. — Pp. 2564–2571.
- 7 Muja, Marius. Fast approximate nearest neighbors with automatic algorithm configuration / Marius Muja, David G. Lowe // *In VISAPP International Conference on Computer Vision Theory and Applications*. — 2009. — Pp. 331–340.
- 8 Hartley, Richard I. Projective Reconstruction and Invariants from Multiple Images. — 1994.

- 9 Longuet-Higgins, Hugh Christopher. A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections / Hugh Christopher Longuet-Higgins // *Nature*. — 1981. — Vol. 293. — Pp. 133–135.
- 10 Fischler, Martin A. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography / Martin A. Fischler, Robert C. Bolles // *Commun. ACM*. — 1981. — jun. — Vol. 24, no. 6. — P. 381–395. <https://doi.org/10.1145/358669.358692>.
- 11 Klema, V. The singular value decomposition: Its computation and some applications / V. Klema, A. Laub // *IEEE Transactions on Automatic Control*. — 1980. — Vol. 25, no. 2. — Pp. 164–176.