

# КАЛІБРОВКА ЗОБРАЖЕНЬ ДЛЯ ПОРЯДКОВИХ МЕТОДІВ РОЗПІЗНАВАННЯ РЕЛЬЄФУ

Д.І. Рябоконт

Міжнародний Науково-Навчальний Центр Інформаційних Технологій та Систем  
 Проспект Академіка Глушкова 40, Київ-03680. Тел 266-62-08

## АНОТАЦІЯ

В роботі розглядаються методи перетворення стереопари зображень до такого вигляду, щоб пари рядків розгортки могли бути використані як вихідні дані для порядкових алгоритмів розпізнавання рельєфу об'єкта. Описується комплекс, що дозволяє створювати ідеальні зображення для стереоскопа та розпізнавати рельєф на цих зображеннях.

## ВСТУП

Досить легко створити стереопару для побутових потреб. Для цього треба лише фотографувати об'єкт із двох різних позицій і поглянути на пару знімків через стереоскоп. Так можна визначити, які точки знаходяться ближче, а які далі. Для машинної обробки стереопара повинна бути виконана значно ретельніше. Підвищені вимоги до стереопари зумовлені тим, що більшість методів розпізнавання рельєфу [1, 2] оперують із парами рядків розгортки на зображеннях незалежно. Весь рельєф потім складається зі шматочків, що були відновлені на кожному рядку.

Ідеальною стереопарою будемо називати два таких зображення, що для кожної точки на рядку  $j$  першого зображення відповідна точка на другому зображенні знаходиться також у рядку  $j$ . Саме для порядкових методів розпізнавання рельєфу і потрібне перетворення двох зображень до ідеальної стереопари (калібровка зображень).

## ОБРОБКА НЕКАЛІБРОВАНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

### 1. Епіполярні лінії

Розглянемо випадок, коли при обробці рядку  $j$  лівого та правого зображення взагалі неможливо знайти правильну відповідність між точками, бо, скажімо, на одному із зображень використовується інший масштаб. Для застосування порядкових алгоритмів необхідно спочатку знайти сімейства ліній на обох зображеннях, котрі будуть використані в процесі розпізнавання.



Рис. 1. Епіполярні лінії

Кожній точці на лівому зображенні ставиться у відповідність лінія на правому зображенні та навпаки. Епіполярна лінія на лівому зображенні – це проекція променя, що прямує від точки поверхні об'єкта до фокуса правої камери на проекційну площину лівої камери (Рис. 1). Точки на зображенні – це перетин променів із проекційною площиною камери. Оскільки промені, що утворюють точки зображення, проходять через фокус камери, всі епіполярні лінії на кожному із зображень перетинаються в одній точці (ця точка може знаходитись і на безмежності).

Епіполярні лінії на парі зображень зручно подати в однорідних координатах, де кожний елемент зображення індексується трьохвимірним вектором  $U=(i,j,1)^T$ . Сімейства епіполярних ліній можна тоді записати у вигляді

$$(U_L)^T F U_R = 0,$$

де  $F$  – матриця  $3 \times 3$ , що має назву *фундаментальна матриця*.

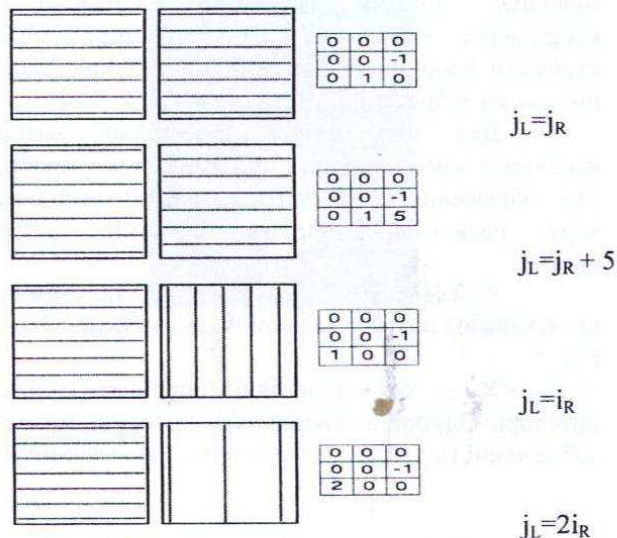


Рис. 2. Сімейства епіполярних ліній

Оскільки всі епіполлярні лінії перетинаються в одній точці, ранг матриці  $F$  повинен дорівнювати двом.

Якщо знайти епіполлярні лінії на зображеннях, перетворити їх так, щоб матриця  $F$  мала вигляд  $\{(0,0,0), (0,0,-1), (0,1,0)\}$ , то можна буде застосувати порядкові методи розпізнавання рельєфу, обробляючи на стереозображеннях рядки розгортки з однаковими індексами.

## 2. 8-точковий алгоритм

Якщо на зображеннях можна вказати відповідність між якимись точками, то фундаментальна матриця знаходиться за допомогою 8-точкового алгоритму [3]. Оскільки для кожної пари відповідних точок виконується

$$(U_L)^T F U_R = 0,$$

то можна записати наступну рівність.

$$\begin{aligned} & i_L i_R F_{11} + i_L j_R F_{12} + i_L F_{13} + \\ & + j_L i_R F_{21} + j_L j_R F_{22} + j_L F_{23} + \\ & + i_R F_{31} + j_R F_{32} + F_{33} = 0, \\ & \text{rank}(F) = 2. \end{aligned} \quad (1)$$

Якщо маємо сукупність пар відповідних точок, то можна скласти однорідну систему рівнянь для коефіцієнтів матриці  $F$ . Для знаходження всіх коефіцієнтів матриці  $F$  необхідно 8 рівнянь, оскільки матриця знаходиться з точністю до постійного множника.

## 3. Проекційні матриці

Нехай  $X=(x,y,z,1)^T$  однорідні координати точки у просторі,  $U=(i,j,1)^T$  однорідні координати проекції точки на зображенні. Тоді  $X$  та  $U$  пов'язані відношенням

$$(i,j,1)^T = P(x,y,z,1)^T / (xP_{31} + yP_{32} + zP_{33} + P_{34}), \quad (2)$$

де  $P$  – матриця  $3 \times 4$ , що має назву *проекційна матриця*. Знаючи проекційну матрицю та координати якоїсь точки в просторі, можна отримати координати проекції цієї точки (індекси пікселя на зображенні).

Для знаходження проекційної матриці необхідно знати координати шести точок у просторі і на зображенні. Коефіцієнти матриці  $P$  знаходяться через розв'язок однорідної системи лінійних рівнянь.

Розглянемо приклад знаходження проекційних матриць для об'єкта, зображеного на Рис. 3.

$X_0 \dots X_8$  – однорідні координати точок у просторі. Однорідні координати проекцій точок на зображенні  $U_0 \dots U_8$ .

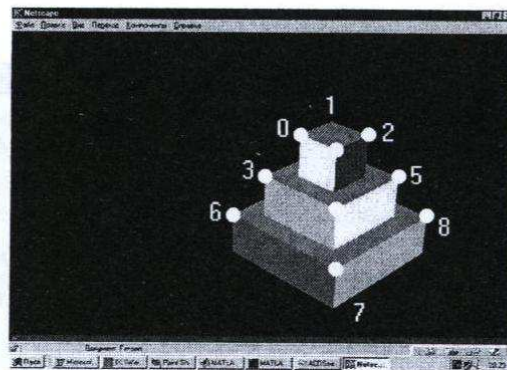


Рис. 3. Об'єкт з відомими просторовими координатами

$$\begin{aligned} U_0 &= (461, 207, 1) & X_0 &= (-1, 1, 6, 1), \\ U_1 &= (520, 233, 1) & X_1 &= (-1, -1, 6, 1), \\ U_2 &= (569, 209, 1) & X_2 &= (1, -1, 6, 1), \\ U_3 &= (406, 276, 1) & X_3 &= (-2, 2, 4, 1), \\ U_4 &= (521, 331, 1) & X_4 &= (-2, -2, 4, 1), \\ U_5 &= (618, 276, 1) & X_5 &= (2, -2, 4, 1), \\ U_6 &= (355, 340, 1) & X_6 &= (-3, 3, 2, 1), \\ U_7 &= (521, 430, 1) & X_7 &= (-3, -3, 2, 1), \\ U_8 &= (664, 342, 1) & X_8 &= (3, -3, 2, 1). \end{aligned}$$

Для точки 0 рівняння (2) дає наступні два рівняння:

$$\begin{aligned} 461(-P_{31} + P_{32} + 6P_{33} + P_{34}) &= (-P_{11} + P_{12} + 6P_{13} + P_{14}), \\ 207(-P_{31} + P_{32} + 6P_{33} + P_{34}) &= (-P_{21} + P_{22} + 6P_{23} + P_{24}). \end{aligned}$$

Для точки 1:

$$\begin{aligned} 520(-P_{31} - P_{32} + 6P_{33} + P_{34}) &= (-P_{11} - P_{12} + 6P_{13} + P_{14}), \\ 233(-P_{31} - P_{32} + 6P_{33} + P_{34}) &= (-P_{21} - P_{22} + 6P_{23} + P_{24}). \end{aligned}$$

І, нарешті, для точки 8:

$$\begin{aligned} 664(3P_{31} - 3P_{32} + 2P_{33} + P_{34}) &= (3P_{11} - 3P_{12} + 2P_{13} + P_{14}), \\ 342(3P_{31} - 3P_{32} + 2P_{33} + P_{34}) &= (3P_{21} - 3P_{22} + 2P_{23} + P_{24}). \end{aligned}$$

Матриця системи однорідних лінійних рівнянь для 12 невідомих  $P_{11}, P_{12}, P_{13}, P_{21}, \dots, P_{34}$  буде:

$$A = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 6 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 461 & -461 & -2766 & -461 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 6 & 1 & 207 & -207 & -1242 & -207 \\ -1 & -1 & 6 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 520 & 520 & -3120 & -520 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 6 & 1 & 233 & 233 & -1398 & -233 \\ 1 & -1 & 6 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -569 & 569 & -3414 & -569 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 6 & 1 & -209 & 209 & -1254 & -209 \\ -2 & 2 & 4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 812 & -812 & -1624 & -406 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 2 & 4 & 1 & 552 & -552 & -1104 & -276 \\ -2 & -2 & 4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1042 & 1042 & -2084 & -521 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & -2 & 4 & 1 & 662 & 662 & -1324 & -331 \\ 2 & -2 & 4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1236 & 1236 & -2472 & -618 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & -2 & 4 & 1 & -552 & 552 & -1104 & -276 \\ -3 & 3 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1065 & -1065 & -710 & -355 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -3 & 3 & 2 & 1 & 1020 & -1020 & -680 & -340 \\ -3 & -3 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1563 & 1563 & -1042 & -521 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -3 & -3 & 2 & 1 & 1290 & 1290 & -860 & -430 \\ 3 & -3 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1992 & 1992 & -1328 & -664 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & -3 & 2 & 1 & -1026 & 1026 & -684 & -342. \end{pmatrix}$$

Для існування розв'язку такої системи однорідних лінійних рівнянь, ранг матриці  $A$  повинен бути нижчим за 12. Якщо це не так, то його необхідно понизити. Для цього в сингулярному розкладі матриці  $A$  найменшому власному значенню приписується 0.

#### 4. Знаходження епіполярних ліній за проекційними матрицями

Якщо  $P_L$  – проекційна матриця для першої камери,  $P_R$  – проекційна матриця для другої камери, то сімейства епіполярних ліній можна записати у вигляді

$$(U_L)^T F U_R = X^T (P_L)^T F P_R X = 0, \quad (3)$$

причому добуток  $(P_L)^T F P_R$  має бути антисиметричною матрицею.

При знаходженні  $F$  за проекційними матрицями  $P_L, P_R$  можна перетворити їх так, що

$$P_L := P_L H \quad P_R := P_R H, \quad (4)$$

де матрицю  $H$  необхідно вибрати таким чином, щоб  $P_L$  стала

$$P_L = \{(1 \ 0 \ 0 \ 0), (0 \ 1 \ 0 \ 0), (0 \ 0 \ 1 \ 0), (0 \ 0 \ 0 \ 0)\}.$$

Використовуючи (3) та (4), маємо:

$$(U_L)^T F U_R = X^T (P_L H)^T F P_R H X = \\ = X^T H^T (P_L)^T F P_R H X,$$

внаслідок чого

$$F = \{p_1, p_2, p_3, p_4\}^T \{[p_4, p_1], [p_4, p_2], [p_4, p_3], [p_4, p_4]\}^T$$

де  $p_i$  – вектори-стовпці матриці  $P_R$ .

Можна переконатися, що добуток  $P_L F P_R$  буде антисиметричною матрицею [4].

Знаючи сімейства епіполярних ліній, нескладно перетворити зображення так, щоб фундаментальна матриця мала вигляд

$$F = \{(0,0,0), (0,0,-1), (0,1,0)\}.$$

#### 5. Результати обробки стереозображень

Для двох закріплених одна відносно одної фотокамер досить один раз розрахувати проекційні матриці. Всі знімки, що будуть надалі зроблені такою системою, калібруватимуться одним і тим самим перетворенням. Калібровані зображення будуть придатними для обробки порядковими методами розпізнавання рельєфу.

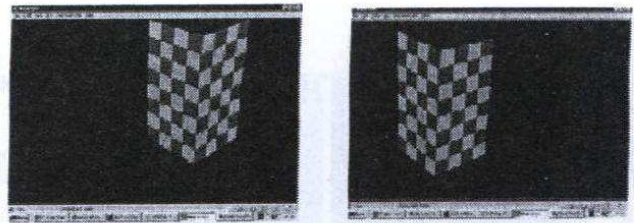


Рис. 4. Об'єкт для калібрування

На Рис. 4 зображена стереопара об'єкта з відомими просторовими координатами. На основі цих зображень знаходяться проекційні матриці та епіполярні лінії для всіх знімків, що будуть зроблені цими ж камерами.

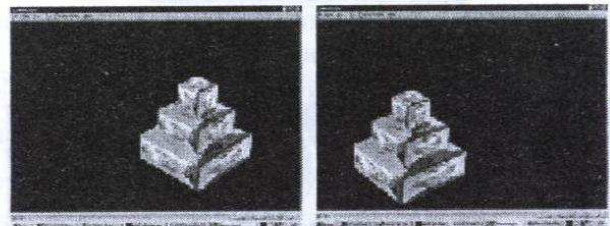


Рис. 5. Об'єкт для розпізнавання

На Рис. 5 зображення стереопара об'єкта, просторову конфігурацію якого необхідно розпізнати. Рядки розгортки на цій стереопарі не відповідають епіполярним лініям. Зображення слід калібрувати перед розпізнаванням.

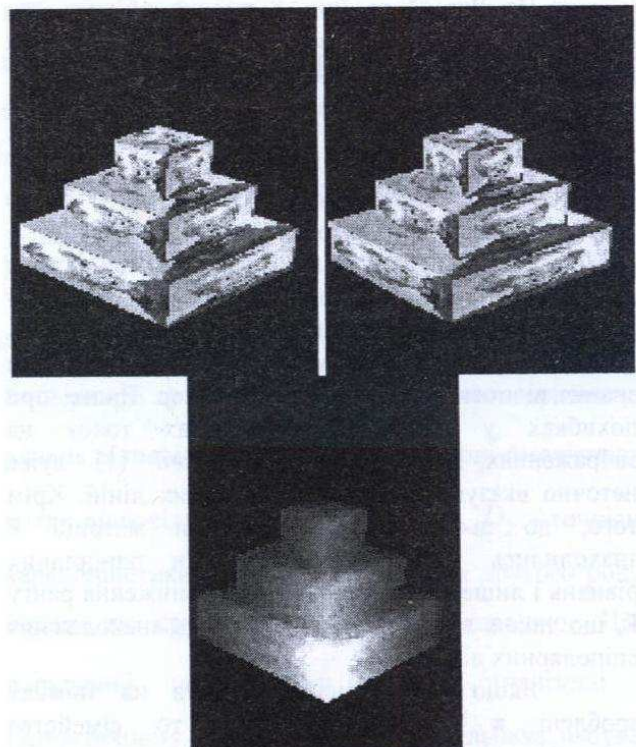


Рис. 6. Калібровані знімки та висотне зображення

На Рис. 6 подані калібровані стереозображення об'єкта та його відновлена просторова конфігурація.

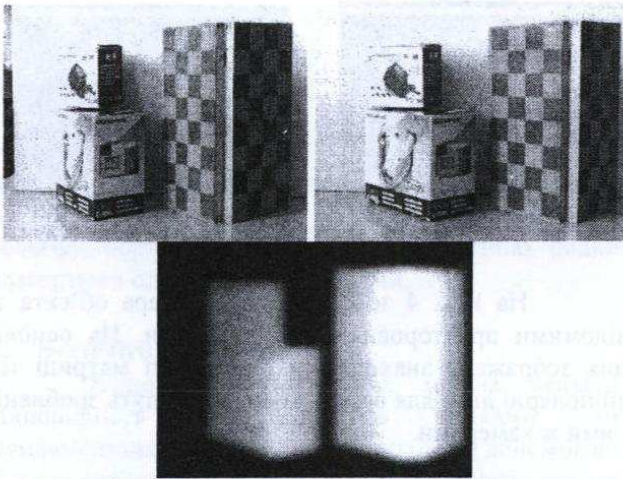


Рис. 7. Об'єкти, сфотографовані цифровою камерою, та відновлений рельєф

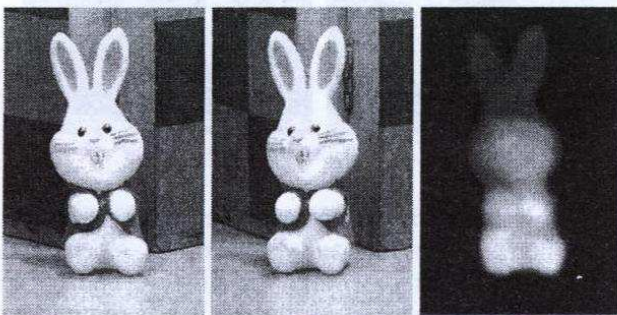


Рис. 8. Об'єкт та його відновлений рельєф

На Рис. 7 та Рис. 8 подано об'єкти, що сфотографовані цифровою камерою, та їх відновлена просторова конфігурація.

## ВИСНОВКИ

Для калібровки зображень було запропоновано два методи. Суть першого – у знаходженні епіполлярних ліній за вказаними парами відповідних точок на зображеннях, другого – у знаходженні проєкційних матриць.

Перший метод можна застосовувати без знання відносного розташування камер. Проте, при похибках у вказаних координатах точок на зображеннях, псевдорозв'язок задачі (1) дуже неточно вказує сімейство епіполлярних ліній. Крім того, до цього часу коефіцієнти матриці  $F$  знаходились як розв'язок системи однорідних рівнянь і лише потім проводилось пониження рангу  $F$ , що також зумовлювало неточність знаходження епіполярних ліній [4].

Якщо всі елементи об'єкта на знімках зроблені в одному масштабі, то сімейства епіполярних ліній можна було б шукати у вигляді паралельних прямих на кожному із знімків. Задача (1) в цьому випадку значно спрощується. Матриця  $F$  буде автоматично мати ранг 2 та шукатися у вигляді

$$F = \begin{pmatrix} 0 & 0 & F_{13} \\ 0 & 0 & F_{23} \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} \end{pmatrix}$$

Матрицю  $F$ , що отримали таким чином можна використовувати як перше наближення і для загального випадку калібровки зображень. Елементи матриці  $F$  слід знаходити ітеративно, на кожному кроці уточнюючи якийсь стовпець чи рядок матриці при фіксованих інших елементах. Обмеження на ранг в такому випадку буде лінійне по елементам  $F_{ij}$  рівняння. Таким чином, на кожному кроці ітерації фундаментальна матриця буде мати ранг 2, а точність знаходження її елементів не погіршуватись.

Калібровка другим способом дозволяє створювати ідеальні стереопари двома фотоапаратами. Для двох камер слід зафіксувати взаємне положення і один раз провести вимір проєкційних матриць, сфотографував об'єкт з відомими просторовими координатами. Всі знімки, що будуть отримані надалі, можна буде перетворювати в ідеальні стереопари.

Автором було створено програмно-апаратний комплекс, що дозволяє розпізнавати рельєф на зображеннях з використанням попередньої калібровки. Знімки робились цифровою камерою, що могла переміщатися по спеціальному штативу. Калібровані зображення оброблялись порядковим алгоритмом розпізнавання рельєфу.

## ЛІТЕРАТУРА

- [1] Г.Л. Гимельфарб. "Симметризованное би- и тринокулярное стереозрение: взаимосвязь между теоретическими основами и эвристическими решениями." Теоретические и прикладные вопросы распознавания изображений. Киев 1995.
- [2] R. Sara. "The Class of Stable Matching for Computation Stereo."
- [3] R. Hartley. "In defence of the 8-point algorithm." In International Conference on Computer Vision, pages 1064–1070, 1995.
- [4] T. Werner. "Practice of 3D Reconstruction from Multiple Uncalibrated Unorganized Images. Czech Pattern Recognition Workshop 2000."
- [5] Г.Л. Гимельфарб. "Симметричный подход к задаче автоматических стереоскопических измерений в фотометрии." Кибернетика 1979.