

Б.П. Русин, В.А. Таянов, О.А. Луцик  
Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України

## КОРЕГУВАННЯ ПРОБЛЕМИ НЕІДЕАЛЬНОСТІ ОСВІТЛЕННЯ ЗА 3D-РЕКОНСТРУКЦІЇ МЕТОДОМ ФОТОМЕТРИЧНОГО СТЕРЕО

© Русин Б.П., Таянов В.А., Луцик О.А., 2009

Розглянуто вплив реального джерела освітлення на одержання зображень для реконструкції методом фотометричного стерео. Запропоновано метод корегування зображень для 3D-реконструкції методом фотометричного стерео, що ґрунтується на врахуванні неідеальності джерела освітлення. Обґрунтовано доцільність використання цього підходу покращання зображень за реконструкції методом фотометричного стерео.

The influence of the real light source to the photometric stereo reconstruction is considered. It is proposed the method of image correction for photometric stereo 3D-reconstruction, which is based on estimation of light source imperfection. The expediency of using reviewed approach for image correction is proved.

### Вступ

Метод фотометричного стерео ґрунтується на ідеї обчислення локальної орієнтації і функції відбивальної здатності у кожній точці зображення та подальшого визначення поля нормалей. Для цього отримують серію зображень, одержаних фіксованою камерою за різних джерел освітлення. Інтенсивність  $I$  в окремій точці визначатиметься інтенсивністю джерела світла, коефіцієнта відбивання і кута освітлення поверхні [1]:

$$I = \rho S \cos \varphi_i, \quad (1)$$

де  $\rho$  – коефіцієнт відбивання світла поверхнею;  $S$  – інтенсивність світла;  $\varphi$  – кут падіння світла.

У класичній літературі метод фотометричного стерео зводиться до визначення функції відбивальної здатності поверхні, яка для реальної поверхні, на відміну від ідеалізованої (Ламбертівської), матиме багато неоднозначностей, таких як суміш дифузного і дзеркального відбивання, затінення областей поверхні. Ця задача є зворотною задачею моделі відбивання світла від поверхні. Тут важливо мати не менше трьох джерел світла, рознесених в певний спосіб у просторі.

Особливістю 3D-реконструкції зображень методом фотометричного стерео є вимоги щодо джерела освітлення і способу освітлення поверхні розглядуваного об'єкта. Теоретично найкраща робота фотометричного стерео є можливою за ідеальних умов освітлення. А саме – розглядається точкове джерело світла, яке знаходиться в нескінченності і має властивості білого світла (покриває весь частотний діапазон денного світла). За практичної реалізації цього методу реконструкції дотримання цих вимог буває неможливим. В результаті цього вхідні зображення, що використовуються для методу фотометричного стерео, є дуже спотвореними і не придатними для подальшої 3D-реконструкції.

**Мета роботи** – усунення впливу спотворення освітлення, яке робить зображення мало придатними для реконструкції.

Спроби розв'язання задачі корегування зображень для фотометричного стерео робилися в [1]. Тут спотворення зображення вносилося у функцію відбивальної здатності, а корегування здійснювалося за рахунок припущення про точкове джерело освітлення. У [2, 4] корегування матриці зображення здійснювалося для випадків, коли відстань від джерела освітлення до об'єкта є значно більша, ніж лінійні розміри області досліджуваної поверхні.

Існуючі підходи до вирішення цієї проблеми надійно працюють в конкретних випадках за чітко виражених умов освітлення поверхні та відомих усім параметрів одержання зображення. Враховуючи це, пропонується підхід для корегування зображень за фотометричного стерео для загального випадку, коли параметри освітлення та лінійні розміри розглядуваної області поверхні невідомі.

### Корегування зображень

Під час реалізації фотометричного стерео робляться припущення, які не завжди збігаються із реальними умовами. Серед спотворювальних чинників, що впливають на процес реконструкції, окрім неідеальності поверхні, також є чинники, пов'язані з освітленням поверхні. Для цього розроблено метод корегування цього явища спотворень. Надалі розглядатиметься випадок джерела світла на невеликій віддалі від області поверхні, що досліджується. Тут робиться припущення, що джерело світла освітлює поверхню так, що для усіх пікселів часткові похідні дорівнюють нулю. Мається на увазі те, що за освітлення, близького до поверхні, дві точки поверхні із однаковими  $p$  і  $q$ ,  $p = \partial z / \partial x$ ,  $q = \partial z / \partial y$  будуть освітленими під різними кутами і цей кут збільшуватиметься під час наближення джерела освітлення до розглядуваної поверхні. Враховуючи (3), ці точки на зображенні поверхні будуть відображені різними рівнями яскравості і утворюватимуть концентричні кола з найвищим рівнем яскравості в центрі, який, своєю чергою, відповідатиме нормалі від джерела освітлення до поверхні.



Рис. 1. Освітлення площини джерелом світла на віддалі, співрозмірній з розмірами області площини

Для поверхні типу площини кут освітлення змінюватиметься у кожній точці неперервно. Тоді завдання корегування можна розв'язати, використовуючи декілька етапів. Для початку здійснюється дослідження поверхні із відомою функцією відбивальної здатності. Для цього найкраще підходить поверхня, близька за своїми властивостями до Ламбертівської. Після цього знаходять значення кута. І останній крок – це побудова матриці корегування конкретного джерела освітлення. Це завдання ще називається калібруванням джерела освітлення.

Розглянемо білу площину, джерело світла та зображення градації сірого. У цьому випадку обмежуємось корегуванням променів і виключаємо випадкові відхилення, що пов'язані із неоднорідностями поверхні. Для такої площини  $p = q = 0$  для усіх елементів поверхні, що можна записати як

$$I_k = \frac{1}{\sqrt{1 + p_s^2 + q_s^2}} = \cos \alpha_k . \quad (2)$$

Оскільки кут у кожній точці змінюватиметься, бо промені, що падають на поверхню, не є паралельними, то для кожного пікселя в матричній формі запишемо:

$$I'_{k,i,j} = \cos \alpha_{k,i,j} . \quad (3)$$

Знаючи нахил  $\alpha$  у кожному пікселі реального зображення, можна оцінити дійсне значення кута нахилу. Цей підхід полягає в розглядуванні  $\alpha$  між променями, які поєднують місце джерела

світла і перетин напрямку точки спостереження із віссю падіння світла на площину. Замість знаходження функції відбиваючої здатності поверхні площини і градієнт поширення, можна оцінити зважену величину  $\alpha$ .

Якщо розглянути матрицю  $R \times H$ , зважене значення  $\alpha$  буде:

$$\alpha_R = \arccos \left( \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^R I_{k,i,j}}{KRH} \right).$$

Оскільки зміна кута залежно від відстані між пікселом і центром зображення не є еквідистантною, то доцільним є додання ваги  $w_{i,j}$  між центром пікселя і центром зображення. Тоді рівняння перепишемо у вигляді

$$\alpha_R = \arccos \left( \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^R w_{i,j} I_{k,i,j}}{K \sum_{i=1}^H \sum_{j=2}^R w_{i,j}} \right), \quad (4)$$

де  $w_{i,j}$  визначається як

$$w_{i,j} = 1 - \left( \frac{\frac{H^2}{4} + \frac{R^2}{4} - Hi - Rj + i^2 + j^2}{\frac{H^2}{4} + \frac{R^2}{4} - H - R + 2} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

Оскільки ми обрахували  $\alpha$ , то будемо матрицю корегування  $G_k$ .

Маючи (4), можна записати для матриці корегування так:

$$I_k = G_k I'_k. \quad (6)$$

Підставивши (3), отримаємо

$$G_{k,i,j} = \frac{\cos \alpha_G}{I'_{k,i,j}}. \quad (7)$$

Отримана рівність (7) є рівністю корегування матриці зображення. Цей підхід корегування матриці є інваріантним до того, чи ми працюємо із площиною Ламбертівського типу, чи з неоднорідною відбивальною здатністю. У цьому випадку корегування впливає лише на рівень градації яскравості зображення. Але підставивши (1) в (6), отримаємо

$$I_{k,i,j} = G_k \rho \cos \alpha_{k,i,j}.$$

Для  $\alpha$  вираз набуде такого вигляду:

$$\alpha_R = \arccos \left( \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^R \frac{1}{\rho} w_{i,j} I_{k,i,j}}{K \sum_{i=1}^H \sum_{j=2}^R w_{i,j}} \right).$$

І кінцеве рівняння корегування матриці перепишемо у вигляді

$$G_{k,i,j} = \rho \frac{\cos \alpha_G}{I'_{k,i,j}}. \quad (8)$$

Використання цього рівняння у матричному вигляді дає можливість здійснювати корегування довільного зображення поверхні, для якої  $p = q = 0$  за будь-якого джерела освітлення. Обмеження підходу проявляється для випадків зображення поверхні, для якої  $p \neq q \neq 0$ .

### Результат реконструкції

Як оцінка якості тривимірної реконструкції того чи іншого методу використовуються ті самі критерії кількісної оцінки, що й для сигналів та зображень. Це може бути максимальне відхилення, середньоквадратичне відхилення, пікове співвідношення сигнал/шум тощо. Для фотометричного стерео похибка реконструкції складається із похибок на етапах одержання зображення, визначення градієнта та інтегрування поверхні. Використання корегування зображення частково зменшує похибку, яка закладена на етапі одержання зображення, що становить близько 20 % від похибки реконструкції. На рис. 2 і 3 зображено результат реконструкції тестової поверхні із використанням корегування зображення.

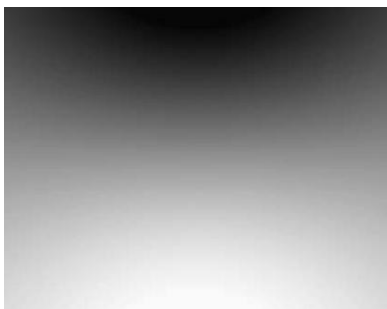


Рис. 2. Зображення тестової поверхні під час освітлення реальним джерелом світла

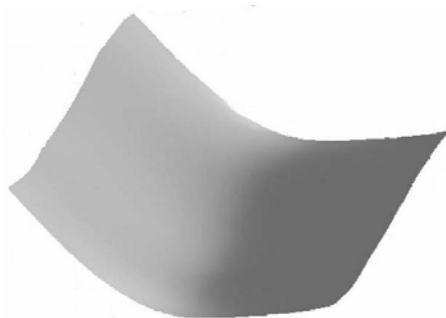


Рис. 3. Реконструйована поверхня

### Висновок

У роботі розглянуто вплив реального джерела освітлення на одержання зображень для реконструкції методом фотометричного стерео. Описано метод корегування зображень, що ґрунтується на врахуванні неідеальності джерела освітлення. Цей метод полягає в знаходженні виразу корегування матриці для зображення площини з відомою функцією відбивальної здатності і застосування до реальних зображень з невідомою функцією відбивальної здатності. Показано результат реконструкції тестової поверхні методом фотометричного стерео із попереднім використанням корегування вхідних зображень на етапі отримання зображення, де зменшення похибки становить 20 %.

1. Woodham R.J. Photometric method for determining surface orientation from multiple images // *Optical Engineering*. 1980. – 19(1). – P.139–144, 1980. 2. Spence A.D. Chantler M.J. Optimal illumination for three-image photometric stereo acquisition of texture // *In Texture 2003: Proceedings of the 3<sup>rd</sup> international workshop on texture analysis and synthesis*. – P.89–94, 2003. 3. Kolagani N., Fox J.S., Blidberg D.R. Photometric stereo using point light sources // *Robotics and Automation, 1992. Proceedings., 1992 IEEE International Conference Volume, Issue, 12–14 May 1992*. – P. 1759–1764. – V.2. 4. Kim B., Burger P. Depth and shape from shading using the photometric stereo method // *Computer Vision Graph Image proceedings 54 (1991)*. – P.416–427. 5. Clark J.J. Photometric stereo with nearby planar distributed illuminants // *Proceedings of the Third Canadian Conference on Computer and Robot Vision, Quebec, June 2006*. – P. 16.