



СТЕРЕОЗЙОМКА ТА ПОГОДЖЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ, ЩО БАЗУЄТЬСЯ НА PHONG-МОДЕЛІ ВІДБИТТЯ СВІТЛА

РУСИН Б.П., ІВАНЮК В.Г., ЛИСАК Ю.В.,
АНУФРІЄВА Н.П.

Пропонується метод відеозйомки стереозображення в рамках дії Phong-моделі відбиття світла. Отримане стереозображення орієнтоване на використання в алгоритмі погодження тривимірної реконструкції з середньоквадратичною мірою подібності.

1. Вступ

За останні роки область застосування тривимірної реконструкції на основі стереозображення значно збільшилась, бо цьому сприяло виникнення нових пристроїв і програм у системах обробки інформації. Зараз вона впевнено застосовується в таких областях, як управління “зрячих роботів”, картографія, при спостереженні з супутників, розвідка з повітря, фрактографія чи фотограмметрія ближнього радіуса дії, на виробництві, при роботі з персональними комп'ютерами [1-3].

Тривимірна реконструкція є комплексним процесом, що охоплює кілька споріднених задач, до яких належать відеозйомка стереозображення та задача погодження зображень [1-4].

Процес відеозйомки відбувається в приймачі системи тривимірної реконструкції за стереозображенням [1-5]. Тут досліджуваний елемент сцени освітлюється джерелом некогерентного світла. Відбите від досліджуваного елемента сцени світло сприймається двома відеокамерами. Інформація оптичних сенсорів кожної відеокамери поступає в комп'ютер для подальшої обробки зображення. Відеокамери рознесені у просторі та формують зображення одного і того ж елемента сцени.

При відновленні тривимірної структури поверхні елементів, відбите від яких світло потрапило у відеокамеру, розглядають два типи відбиття: дифузне і дзеркальне [6-8]. Елементи з дифузним відбиттям, що відкидають рівну світлову інтенсивність у всіх напрямках спостереження, є простіші для аналізу та відновлення 3D інформації зображень, тому акцент досліджень тривимірної реконструкції за стереозображенням було скеровано на такі елементи [1,3-5].

Але при проведенні металографічних досліджень з застосуванням системи тривимірної реконструкції за

стереозображенням виникають ускладнення, бо при отриманні зображень освітлені металографічні елементи (відкриті та частково закриті пітинги нержавіючих сталей і сплавів), крім дифузного, додатково формують компоненту дзеркального відбиття [6-8]. Дзеркальне відбиття просторово орієнтоване і є максимальним у напрямку відбиття. Елементи з дифузним і дзеркальним відбиттям (Phong-модель [6]) складніші для аналізу та відновлення 3D інформації стереозображень, бо перешкоджають проведенню погодження зображень, що полягає у встановленні відповідності між пікселями зображень, які, за умовами стандартного погодження, повинні мати однакову яскравість. Отже, для стандартного погодження зображень необхідно і достатньо, щоб отримання стереозображення відбувалось в рамках дії Ламбертівської моделі відбиття світла [1,3,5].

Тому коли отримання стереозображення відбувається в рамках дії жорсткішої моделі відбиття світла, Phong-моделі, методика отримання стереозображення необхідно змінити таким чином, щоб забезпечити погодження зображень в нових, жорсткіших умовах.

Для проведення такої модернізації формування інформації стереозображень потенційно можна скористатись результатами теоретичних досліджень реконструкції 3D [9]. З наведених результатів цієї роботи, які описують реконструкцію 3D в рамках дії Phong моделі відбиття світла, видно, що запропонована методика відеозйомки стереозображення має ряд технологічно програмних недоліків: виконується для окремого пікселя зображення, відсутні технічні засоби відеозйомки, а також алгоритм їх взаємодії. З наведених результатів також видно, що, усунувши недоліки, в перспективі розроблену методику відеозйомки стереозображень можна технологічно-алгоритмічно реалізувати в рамках системи тривимірної реконструкції стереозображення.

2. Постановка задачі

Метою даного дослідження є створення комплексної методики відеозйомки стереозображень та їх погодження, розрахованих на спільну роботу в умовах Phong-моделі освітлення, де забезпечується:

- 1) спеціальна кутова обробка інформації стереозображення, яка відбувається на стадії утворення зображень, шляхом кутової зміни положення джерела світла доповненої на стадії прийому зображень узгодженою кутовою зміною положення відеокамери;
- 2) при погодженні зображень виділення мірою подібності корисної інформації, компоненти Ламбертівської моделі відбиття світла та вилучення інформації завади, компоненти дзеркального відбиття світла.

3. Ілюмінаційна модель зображення

Для даної точки зображення проста ілюмінаційна модель для областей з незагородженим світлом може бути представлена як:

$$I = I_a + I_d + I_s, \quad (1)$$

де I_a – інтенсивність дифузного, ненаправленого джерела світла, яке називають амбієнтним або оточуючим світлом (загальне світло сцени, яке надає постійне освітлення всім елементам поверхні незалежно від їх орієнтації); I_d – компонента дифузного відбиття у даній точці сцени; I_s – компонента дзеркального відбиття.

Модель освітлення (1) відома як Phong-модель [6]. А модель освітлення для областей з загородженим світлом може бути представлена як $I = I_a$ (2). Модель, яка виражена так:

$$I_{\lambda d} = I_a + I_d, \quad (2)$$

відома як модель з Ламбертівським відбиттям.

Інтенсивність точки поверхні, яка освітлена деяким джерелом світла, визначається таким рівнянням [6]:

$$I_\lambda = I_a + I_{p\lambda} [k_d(N \cdot L) + k_s(R \cdot V)^m], \quad (3)$$

де I_a – інтенсивність розсіяного світла; $I_{p\lambda}$ – інтенсивність джерела світла; k_d – дифузний коефіцієнт, який відображає рівень дифузного відбивання досліджуваної точки на поверхні (рис. 1); k_s – коефіцієнт дзеркального відбиття, що контролює загальну яскравість дзеркального блика і не залежить від яскравості джерела світла та напрямку спостереження; m – показник дзеркального відбиття, що визначає швидкість, з якою дзеркальне відбиття затухає, коли напрям спостереження рухається геть від напрямку відбиття. Іншими словами, цей показник задає розмір дзеркального блика. Коли значення m мале, розмір дзеркального блика є великий; якщо m збільшується, то розмір дзеркального блика зменшується. Разом з тим, значення m між 0 та 1 понижує степінь дзеркального відбиття.

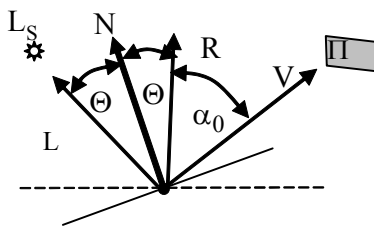


Рис. 1. Вектори рівняння (3): L – вектор напрямку до джерела світла L_s ; N – вектор нормалі до поверхні; R – вектор напрямку відбивання; V – напрям спостереження відеокамерою Π

4. Модель системи стереобачення

Для тривимірної реконструкції за стереозображенням використовується інформація двох зображень I_1, I_2 , яка поступає на екрани двох камер [1-5]. Модель процесу проектування на екрани двох камер (рис. 2) має вигляд

$$s'm' = P'M, \quad (4)$$

$$s''m'' = P''M. \quad (5)$$

Тут

$$P' = [A_1 R_1 | -A_1 R_1 \dot{C}_1] \quad (6)$$

– проекційна матриця камери 1;

$$P'' = [A_2 R_2 | -A_2 R_2 \dot{C}_2] \quad (7)$$

– проекційна матриця камери 2; s', s'' – скалярні коефіцієнти. В (6), (7) A_1 – калібраційна матриця камери 1; A_2 – калібраційна матриця камери 2; R_1 та R_2 – матриця обертання оптичної осі камери 1 та відповідно камери 2 відносно центра координат тривимірного простору; \dot{C}_1 та \dot{C}_2 – координати оптичного центра камери 1 та відповідно камери 2. Зауважимо, що в моделі проектування (4), (5) для представлення 2D-координат точки на площині, на екрані камери, використовуються однорідні координати $m = [x, y, 1]^T$, а для задання положення 3D-точки в світових координатах використовуються однорідні координати точки $M = [X, Y, Z, 1]^T$.

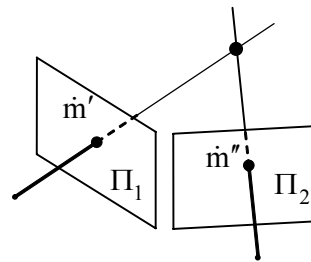


Рис. 2. Схематичне представлення процесу проектування на екрани двох камер

4.1. Погодження зображень

Для тривимірної реконструкції координат точки M (рис. 2) [1-5] необхідно і достатньо визначити проекційні оператори P' (6) та P'' (7), а також встановити відповідність точок m' та m'' на екранах. Точки m' та m'' називаються погодженими. В загальному випадку погодження – це процес знаходження пікселів, елементів та ділянок зображень $I_1(x, y)$ та $I_2(x, y)$, де $(x, y) \in A$ (A – апертура зображення), що відповідають один одному і є результатом проектування певного елемента поверхні на екрани рознесених камер. Під час погодження $h: I_1 \rightarrow I_2$ визначається вектор (функція відмінності)

$$h(x, y) = (u(x, y), v(x, y))^T \quad (8)$$

такий, що:

$$I_1(x, y) = I_2(x + u(x, y), y + v(x, y)). \quad (9)$$

Під час погодження $h: I_1 \rightarrow I_2$ для визначення міри подібності між пікселями зображень використовується критерій погодження (міра подібності) [5, 10-12]:

$$C(h) = C(x, y, h(x, y)). \quad (10)$$

До найбільш вживаних мір подібності відносяться: абсолютна різниця, середньоквадратична міра, нормована взаємкореляція, рангова міра [5, 10-12]. Одна із перелічених мір подібності, середньоквадратична міра [5], має таку форму:

$$C(\mathbf{h}) = \iint_{\Omega_0} [\Delta I(x, y, u, v)]^2 dx dy, \quad (11)$$

де $\Omega_0 \in \mathbf{Z}^2$ – окіл досліджуваної точки (локальна ділянка),

$$\Delta I(x, y, u, v) = I_1(x, y) - I_2(x + u, y + v). \quad (12)$$

Вибравши міру подібності, переходять до встановлення мінімумів функції $C(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{y}))$.

На даний час кращі результати визначення відмінності досягаються шляхом використання глобальних методів погодження [5, 13], які формально можна представити як задачу мінімізації енергетичної функції $E(\mathbf{h})$. Нехай вибрано міру подібності (11). На цій основі один з варіантів функції повної енергії має таку форму:

$$E(\mathbf{h}) = \iint_{\Omega} [\Delta I(\mathbf{h})]^2 dx dy + \kappa \iint_{\Omega} \Phi dx dy, \quad (13)$$

тут Ω – область визначення функції яскравості пікселів на стереозображенні I_1 та I_2 ; κ – коефіцієнт гладкості поверхні, перший доданок визначає ступінь відмінності між зображеннями, записаний через середньоквадратичну міру $C(\mathbf{h})$ (11), а другий доданок визначає вплив регуляризаційних обмежень: Φ – функція, що визначає вплив апріорних даних на шуканий розв'язок. Оскільки рівень гладкості функції відмінності залежить від характеру сцени, а отже від пари стереозображень, необхідно визначити характерну ознаку, яка б дозволила відрізнити окремі об'єкти, що є частиною сцени і знаходяться на різних рівнях дальності [14]. Найпростішою такою ознакою є різниця яскравості сусідніх пікселів на зображенні, оскільки значні перепади яскравості сусідніх пікселів на зображенні, як правило, спостерігаються на границях розділу між різними об'єктами. Саме тому $\Phi = \Phi(\nabla I_1)$. Як модель функції Φ (13) найчастіше використовується модель анізотропної дифузії [15]:

$$\Phi(\nabla I, \nabla \lambda) = (\nabla \lambda)^T \mathbf{T}(\nabla I) \nabla \lambda, \quad (14)$$

де оператор, що характеризує анізотропію,

$$\mathbf{T}(\nabla I) = \frac{1}{|\nabla I|^2 + 2\eta^2} \left\{ \begin{bmatrix} \frac{\partial I}{\partial y} \\ -\frac{\partial I}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial I}{\partial y} \\ -\frac{\partial I}{\partial x} \end{bmatrix}^T + \eta^2 \mathbf{I} \right\}, \quad (15)$$

тут \mathbf{I} – одинична діагональна матриця; η – параметр анізотропії.

Щоб мінімізувати енергетичний функціонал (13), шукані функції $u(x, y)$, $v(x, y)$, які визначають функцію відмінності $\hat{\mathbf{h}}$ (8), представлено у параметричній формі [5]:

$$\begin{cases} u(x, y) = \frac{-\lambda(x, y)a}{\sqrt{a^2 + b^2}} - \frac{ax + by + c}{a^2 + b^2} a; \\ v(x, y) = \frac{\lambda(x, y)b}{\sqrt{a^2 + b^2}} - \frac{ax + by + c}{a^2 + b^2} b, \end{cases} \quad (16)$$

де a, b, c параметри, які визначаються через елементи фундаментальної матриці стереосистеми. З врахуванням (16) приріст ΔI (12) є функцією $\Delta I = \Delta I(u(\lambda), v(\lambda)) = \Delta I(\lambda)$.

Для знаходження екстремуму функціоналу $E(\mathbf{h}(\lambda))$ (13) найбільш доцільним видається використання варіаційного підходу. Суть його полягає у встановленні відповідності між функціоналом, що мінімізується, та деяким рівнянням з частковими похідними таким чином, щоб мінімум функціоналу збігався з розв'язком отриманого рівняння [5]. Так, якщо досліджуваний функціонал ($E(\mathbf{h})$ (13)) представлено у вигляді:

$$J(\lambda) = \iint G(x, y, \lambda, \lambda_x, \lambda_y) dx dy, \quad (17)$$

то локальний екстремум збігається з розв'язком диференціального рівняння Ейлера-Лагранжа:

$$\frac{\partial G}{\partial \lambda} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial G}{\partial \lambda_x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial G}{\partial \lambda_y} \right) = 0. \quad (18)$$

Тоді, з використанням методу спуску, отримане з (18) диференціальне рівняння має вигляд:

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{\Delta I(\lambda)}{\sqrt{a^2 + b^2}} \left[a \frac{\partial I_2}{\partial y} - b \frac{\partial I_2}{\partial x} \right] + \kappa \operatorname{div}(\mathbf{T}(\nabla I_1)) \nabla \lambda. \quad (19)$$

Для числового розв'язку диференціального рівняння (19) в системі обробки інформації зображень використовують кінцево-різницева ітераційну схему [5], де дискретизацію за часом здійснено за кроком Δt , а кожен наступний відлік, що відповідає дискретному значенню часу, позначено k . Використовуючи дискретне представлення функціонального $W(\lambda_{i,j}^k)$ та регуляризуючого $V(\lambda_{i,j}^k)$ оператора з (19), на k -й ітерації отримано лінійне рівняння

$$\lambda_{i,j}^{k+1} = \lambda_{i,j}^k + \Delta t [W(\lambda_{i,j}^k) + V(\lambda_{i,j}^k)]. \quad (20)$$

Наведений алгоритм погодження програмно реалізований [5]. Стосовно умов використання ілюмінаційної моделі зображення додатково до опису представлено алгоритму погодження зауважимо наступне. Вважається, що погодження базується на Ламбертівській моделі розсіювання світла (2):

$$I_l(x, y) = I_{\text{dl}}(x, y), \quad (21)$$

де $l = 1, 2$, що обумовлює однакову яскравість відповідних пікселів зображень [5], а на основі зазначених пікселів через приріст ΔI (12) формується функціональний оператор $W(\lambda_{i,j}^k)$ (20). Тому, при ужорстоженні моделі розсіювання світла (1)

$$I_l(x, y) = I_{\lambda dl}(x, y) + I_{sl}(x, y), \quad l=1, 2, \quad (22)$$

найбільш вразливим параметром (див. (13)), який формує функціональний оператор $W(\lambda_{i,j}^k)$, є приріст ΔI (12). Цей приріст:

$$\Delta I(x, y) = \Delta I_d(x, y) + \Delta I_s(x, y), \quad (23)$$

де корисна інформація

$$\Delta I_d(x, y) = I_{\lambda dl}(x, y) - I_{\lambda d2}(x + u, y + v)$$

– приріст для Ламбертівської моделі розсіювання світла на об'єкті, отримує пошкодження у вигляді доданку приросту компоненти дзеркального відбиття:

$$\Delta I_s(x, y) = I_{sl}(x, y) - I_{s2}(x + u, y + v). \quad (24)$$

Таким чином, в майбутній операції погодження, яка враховує ужорсточення моделі розсіювання світла (22) стереозйомки, з загального приросту ΔI (23) необхідно вилучити шкідливу інформацію ΔI_s .

5. Теоретична модель придушення в прирості стереозображення компоненти дзеркального відбиття

Нехай стереозйомка зображень базується на Phong-моделі відбиття світла (1), (3).

Представимо стислий огляд тих основних результатів роботи [9], які безпосередньо стосуються поставленої цілі: придушення інформації $\Delta I_s(x, y)$ в прирості ΔI (23) або мають до цього відношення.

Параметри приймача вважаються відомими. Це одиничні вектори L та V (3). В приймачі забезпечено прийом зображення, яке можна описати згідно з виразом (3), де вектор $U \in \{L, N, R, V\}$ (див. рис.1) має вигляд

$$U = (U_x, U_y, U_z). \quad (25)$$

Для опису падаючого, дифузного і дзеркально відбитого проміння в площині $[H, Z]$, де $H \in \{X, Y\}$, яка належить тривимірному простору $[X, Y, Z]$, запропоновано застосувати вектор [9]

$$U_{hz} = U_{dh} \exp[i\gamma_{Uh}], \quad h \in \{x, y\}, \quad (26)$$

де

$$U_{dh} = \sqrt{U_h^2 + U_z^2} \quad (27)$$

– відстань;

$$\gamma_{Uh} = \arccos \frac{U_h}{U_{dh}} \quad (28)$$

– кут. Спираючись на (26)-(28) і використовуючи вектори R_{hz} та V_{hz} , а також вектори R_{hz} та V_{hz} , отримуємо інтенсивність відбиття в двох формах:

$$I_h = I_{\lambda dh} + I_{sh}, \quad h \in \{x, y\}, \quad (29)$$

де форма I_x має такі компоненти:

$$I_{\lambda dx} = I_a + I_{p\lambda} k_d [L_{dx} N_{dx} \cos(\gamma_{Lx} - \gamma_{Nx}) + N_y L_y] \quad (30)$$

– модель з Ламбертівським відбиттям та

$$I_{sx} = I_{p\lambda} k_s (R_{dx} V_{dx} \cos\{\gamma_{Rx} - \gamma_{Vx}\} + R_y V_y)^m \quad (31)$$

– дзеркальна компонента, а для форми I_y :

$$I_{\lambda dy} = I_a + I_{p\lambda} k_d [L_{dy} N_{dy} \cos(\gamma_{Ly} - \gamma_{Ny}) + N_x L_x] \quad (32)$$

– модель з Ламбертівським відбиттям,

$$I_{sy} = I_{p\lambda} k_s (R_{dy} V_{dy} \cos\{\gamma_{Ry} - \gamma_{Vy}\} + R_x V_x)^m \quad (33)$$

– дзеркальна компонента. З (29)-(33) видно, що форма I_x зорієнтована на кутову трансформацію інформації в площині $[X, Z]$, а форма I_y – в площині $[Y, Z]$. Для цього на основі інтенсивності відбиття I_h (29) було визначено приріст

$$\Delta I_h = I_{h1} - I_{h2}. \quad (34)$$

При визначенні приросту ΔI_h (34) інтенсивність відбиття I_h де $h \in \{x, y\}$ (29), розглядалась як функція

$$I_h = I_h(\gamma_{Lh}, \gamma_{Vh})$$

кутів γ_{Lh}, γ_{Vh} (28), а інші параметри інтенсивності відбиття I_h вважались фіксованими. Тому приріст ΔI_h (34) представлено так:

$$\Delta I_h = I_h(\gamma_{Lh1}, \gamma_{Vh1}) - I_h(\gamma_{Lh2}, \gamma_{Vh2}), \quad (35)$$

де γ_{Lhi} та γ_{Vhi} – i -те значення кутів відповідно освітлення та спостереження (28), тут $i = 1, 2$. Окрім того

$$\Delta I_h = \Delta I_{\lambda dh} + \Delta I_{sh}, \quad (36)$$

де

$$\Delta I_{dh} = I_{\lambda dh1} - I_{\lambda dh2} \quad (37)$$

– приріст для Ламбертівської моделі розсіювання світла на об'єкті;

$$\Delta I_{sh} = I_{sh1} - I_{sh2} \quad (38)$$

– приріст дзеркальної компоненти.

На основі аналізу приросту ΔI_h (35) було отримано умову вилучення з інформації приросту дзеркальної компоненти (38) [9] у такій формі:

$$\Delta \gamma_{Vh} = -\Delta \gamma_{Lh}, \quad (39)$$

де $h \in \{x, y\}$,

$$\Delta \gamma_{Lh} = \gamma_{Lh1} - \gamma_{Lh2}, \quad (40)$$

$$\Delta\gamma_{Vh} = \gamma_{Vh1} - \gamma_{Vh2}, \quad (41)$$

яка необхідна та достатня для того, щоб визначити приріст $\Delta I_h = \Delta I_{dh}$.

6. Стереозйомка з параметрами, що створюють умови ліквідації компоненти дзеркального відбиття

Для здійснення покрокової технічної реалізації умови (39), яка сформована на основі чотирьох параметрів: $\gamma_{Lh1}, \gamma_{Lh2}, \gamma_{Vh1}, \gamma_{Vh2}$, використаємо декілька варіантів співвідношення напрямків освітлення та спостереження.

З виразів (40) та (41) видно, що якщо

$$\gamma_{Lh1} = \gamma_{Vh1} = a_1, \quad (42)$$

$$\gamma_{Lh2} = \gamma_{Vh2} = a_2, \quad (43)$$

то умова (39) виконується частково:

$$\Delta\gamma_{Vh} = \Delta\gamma_{Lh} \quad (44)$$

з інверсією знаку.

Нехай виконується зйомка засобами, що мають ізопроміневі характеристики (42), (43). Якщо на етапі остаточної реалізації умови (39) реалізувати подвійне підставлення

$$\gamma_{Lh1} = a_2, \quad (45)$$

$$\gamma_{Lh2} = a_1, \quad (46)$$

що фактично означає змінити послідовність освітлення, то умова (39) виконується у такій формі:

$$\gamma_{Lh2} - \gamma_{Lh1} = \gamma_{Vh1} - \gamma_{Vh2}. \quad (47)$$

Якщо на етапі остаточної реалізації умови (39) реалізувати подвійне підставлення

$$\gamma_{Vh1} = a_2, \quad (48)$$

$$\gamma_{Vh2} = a_1, \quad (49)$$

що фактично означає змінити послідовність стереозйомки, то умова (39) виконується у такій формі:

$$\gamma_{Lh1} - \gamma_{Lh2} = \gamma_{Vh2} - \gamma_{Vh1}. \quad (50)$$

Зараз, після такого теоретичного вступного аналізу, ми можемо приступити до реалізації умови (39) на технологічно-алгоритмічному рівні. Наступну реалізацію умови (39) доцільно проводити поетапно. На першому етапі знайдемо узгодження напрямку спостереження та напрямку освітлення в площині $[H, Z]$ за (42), (43). На другому етапі поміняємо порядок освітлення ((45), (46)) або порядок стереозйомки ((48), (49)).

Оскільки наступна реалізація умови (39) на технологічно-алгоритмічному рівні в площині $[X, Z]$ та наступна реалізація умови (39) на технологічно-алгоритмічному рівні в площині $[Y, Z]$ подібні, тому необхід-

но та достатньо провести аналіз такої реалізації в площині $[Y, Z]$.

6.1. Зйомка засобами, що мають ізопроміневі характеристики

При використанні камери відбувається процес проектування: світло з тривимірної сцени, розташованої в тривимірному просторі $[X, Y, Z]$, представлено довільною точкою

$$\dot{M} = [X_M, Y_M, Z_M] \in [X, Y, Z], \quad (51)$$

фокусується і захоплюється, перетворюється у двовимірне зображення $[x, y]$, де кожний піксель зображення

$$\dot{m} = [x_M, y_M] \in [x, y] \quad (52)$$

відповідає променю світла вихідної сцени. Фокусування променів світла вихідної сцени відповідає фокусу, оптичному центру камери

$$C = [X_C, Y_C, Z_C] \in [X, Y, Z], \quad (53)$$

а освітлення тривимірної сцени, що знімається, забезпечується точковим джерелом світла

$$L_S = [X_L, Y_L, Z_L] \in [X, Y, Z]. \quad (54)$$

Для проведення наступних операцій з кутовою інформацією (42)-(44), де $H = Y$, розглянемо необхідну інформацію в площині $[Y, Z] \in [X, Y, Z]$. З виразів (51), (53)-(55) видно, що в площині $[Y, Z]$ точці C відповідає точка $C_p = [Y_C, Z_C]$, точці L_S відповідає точка $L_{Sp} = [Y_L, Z_L]$, а точці \dot{M} відповідає точка

$$\dot{M}_p = [Y_M, Z_M]. \quad (55)$$

Нехай точка $A \in [Y, Z]$ і відрізняється від точок C_p та L_{Sp} . Для збігання кутів $\angle AM_p C_p$ та $\angle AM_p L_{Sp}$ необхідно і достатньо, щоб точки

$$C_p = L_{Sp}, \quad (56)$$

або

$$Y_C = Y_L, \quad (57)$$

$$Z_C = Z_L. \quad (58)$$

Нехай оптичний центр камери розміщено в початку системи координат

$$C = O = [0, 0, 0], \quad (59)$$

а площина зображення збігається з площиною $Z = f$, де f – фокусна віддаль камери.

Нехай джерело світла є точковим. Нехай при дислокації джерела світла виконуються умови (57), (58), внаслідок чого (54) набуває вигляду

$$L_S = [X_L, 0, 0]. \quad (60)$$

Нехай також виконується умова відсутності затінення джерела світла для точок об'єкта дослідження

$$|X_L| > X_{\Pi}, \quad (61)$$

тут X_{Π} – горизонтальний розмір камери Π .

Нехай додатково забезпечено орієнтацію камери таку, що вісь $[x] \in [x, y]$ екрана камери Π і вісь $[X] \in [X, Y, Z]$ по напрямку збігаються. Зауважимо, що така умова забезпечує колінеарність вектора $\overline{CL_S}$, який характеризує просторове зміщення джерела світла відносно фокуса та осі $[x] \in [x, y]$.

Таким чином, для відеозйомки буде використовуватись специфічний комплект джерела світла та камери, що має такі ознаки: дислокацію джерела світла L_S (60), фокуса камери C (59), дислокацію екрана камери $Z = f$ з виконанням умови колінеарності вектора $\overline{CL_S}$ та осі екрана $[x]$. Для зручності такий комплект джерела світла та камери скорочено позначимо КДСК.

Ілюстрація процесу освітлення та процесу проектування точки \dot{M} (51) на екран камери Π (точка \dot{m} (52)) КДСК наведена на рис. 3.

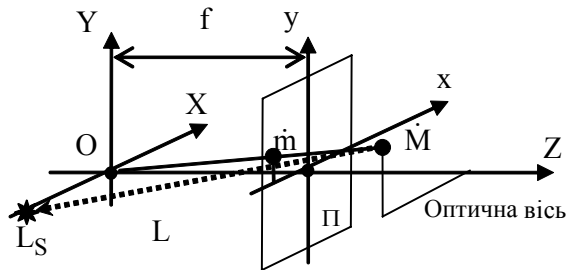


Рис. 3. Схематичне представлення процесів освітлення та проектування на екран камери

Перспективна проекція в цьому випадку описується такими рівняннями:

$$\frac{x_M}{f} = \frac{X_M}{Z_M}, \quad (62)$$

$$\frac{y_M}{f} = \frac{Y_M}{Z_M}, \quad (63)$$

де x_M, y_M – проекційні координати точки \dot{M} (51) на екрані камери Π .

Для використання в проведенні наступних операцій з кутовою інформацією (42), (43), (45), (46), (48), (49) проекції в площині $[Y, Z]$ напрямку освітлення L і напрямку спостереження V (див. рис. 3) окремо подано на рис. 4, де для покращення візуалізації масштаб рис. 3 по осі Y збільшено.

З рис. 4 видно, що на відрізок $[\dot{M}_p O]$ одночасно проектується напрям спостереження V і напрям до джерела світла L , тому тут точка

$$A = [Y_M, 0]. \quad (64)$$

З виразів (63), (64) маємо, що

$$\gamma_{LY1} = \text{Arctg} \frac{Y_M}{f}. \quad (65)$$

Як видно з (64), при застосуванні для зйомки КДСК виконання кутової умови (42) досягнуто.

Щоб реалізувати кутову умову (43), доцільно розглянути застосування для зйомки додаткового КДСК.

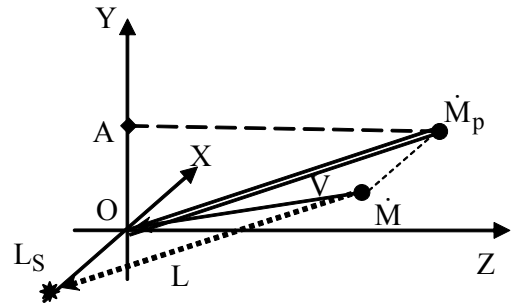


Рис. 4. Векторна інформація засобів зйомки в тривимірному просторі $[X, Y, Z]$ (рис. 3) та її проекція на площину $[Y, Z]$

6.2. Стереозйомка двома КДСК

Нехай маємо КДСК, який при зйомці забезпечує виконання кутової умови (42) в формі (64).

Для створення умов застосування додаткового КДСК докажемо наступне: при переносі КДСК відносно сцени з вектором переносу $t = [t_1 \ t_2 \ t_3]^T$ в площині $[Y, Z]$ проекції кута спостереження і кута напрямку на джерело світла однакові.

Нехай виконано перенос КДСК відносно сцени з вектором переносу $t = [t_1 \ t_2 \ t_3]^T$. Перенос КДСК відносно сцени еквівалентний зворотньому руху точок сцени відносно КДСК, тому точка \dot{M} зміщується:

$$\dot{M}_1 = [X_M - t_1, Y_M - t_2, Z_M - t_3]. \quad (66)$$

Для точки \dot{M}_1 в площині $[Y, Z]$ проекція кута спостереження змінюється $\gamma_{VY1} \rightarrow \gamma_{VY2}$ і також змінюється проекція кута напрямку на джерело світла $\gamma_{LY1} \rightarrow \gamma_{LY2}$, але, як видно з наведеного в п. 6.1. аналізу, вони залишаються однакові:

$$\gamma_{LY2} = \gamma_{VY2}, \quad (67)$$

Зараз, як видно з (64), (67), при застосуванні для стереозйомки двох КДСК виконання кутових умов (42), (43) досягнуто, внаслідок чого умова (39) виконується частково (44).

6.3. Динамічна модернізація стереозйомки двома КДСК для створення умов ліквідації інформації дзеркального відбиття

Нехай маємо два, ідентичні за технічними характеристиками, КДСК: КДСК 1, КДСК 2, де КДСК i ($i = 1, 2$) містить джерело світла L_{Si} та камеру Π_i . Нехай для КДСК-1 оптичний центр камери Π_1 розміщено

$$C_1 = [0, 0, 0] = O, \quad (68)$$

а джерело світла L_{S1} дислоковано

$$L_{S1} = [X_L, 0, 0]. \quad (69)$$

Нехай виконано перенос КДСК-2 відносно сцени з вектором переносу $t = [0 \ Y_{C2} \ 0]^T$, тоді

$$C_2 = [0, Y_{C2}, 0], \quad (70)$$

а джерело світла L_{S2} дислоковано

$$L_{S2} = [X_L, Y_{C2}, 0]. \quad (71)$$

Зауважимо, що значення Y_{C2} невідоме.

Таку дислокацію фокусів відеокамер і джерел світла в площині $[X, Y]$ можна проілюструвати, використовуючи прямокутник C_2, L_{S2}, L_{S1}, C_1 . На рис. 5 цей прямокутник зафарбовано. А екрани обох камер розміщено в площині $Z = f$. На рис. 5 така дислокація екранів камер схематично представлена двома прямокутниками, які окреслені пунктирною лінією.

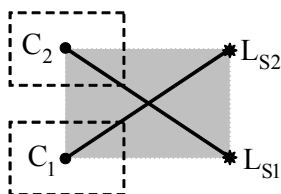


Рис. 5. Схематична дислокація засобів стереозйомки та їх елементів на площинах: в площині $[X, Y]$ розташовано джерела світла та фокуси камер, а в площині $Z = f$ – екрани камер

Зауважимо, що додатково забезпечено спільну орієнтацію камер Π_1, Π_2 : вісь $[x]$ екрана камери Π_1 і вісь $[x]$ екрана камери Π_2 , а також вісь $[X] \in [X, Y, Z]$ по напрямку збігаються. Таким чином, матриця обертання оптичної осі камери 1 (6) та камери 2 (7) відносно центра координат тривимірного простору $R_1 = R_2$.

В алгоритмі відеозйомки стереозображення КДСК функціонують по черзі (рядковий алгоритм): спочатку працює КДСК 1 і функціонують елементи, розміщені на стороні прямокутника L_{S1}, C_1 (див.рис. 5).

1. Вмикається джерело світла L_{S2} .
2. Вмикається джерело світла L_{S1} .
3. Відеозйомка зображення камерою Π_1 :

$$I_1 = I_1(L_1, V_1), \quad (72)$$

де L_1 і V_1 відповідно одиничні вектори, що вказують напрямком на джерело світла L_{S1} і камеру Π_1 (рис. 6, пунктирна лінія).

4. Вмикається джерело світла L_2 , а потім працює КДСК 2, функціонують елементи, розміщені на стороні прямокутника C_2, L_{S2} (див. рис. 5).

5. Вмикається джерело світла L_{S2} .

6. Відеозйомка зображення камерою Π_2 :

$$I_2 = I_2(L_2, V_2), \quad (73)$$

де L_2 і V_2 відповідно одиничні вектори, що вказують напрямком на джерело світла L_{S2} і камеру Π_2 (див. рис. 6, пунктирна лінія).

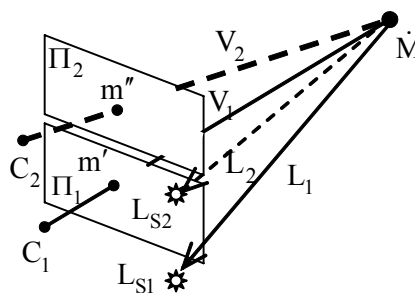


Рис. 6. Векторна інформація засобів стереозйомки ($i = 1, 2$) та їхня дислокація в тривимірному просторі $[X, Y, Z]$: L_i – вектор напрямку до джерела світла L_{Si} ; V_i – напрям спостереження відеокамерою Π_i

Щоб проаналізувати динамічну кутову інформацію стереозйомки в площині $[Y, Z]$, скористаємось рис. 7, де інформація векторів: напрямку освітлення L_i і напрямку спостереження V_i індексованого $i = 1 (2)$ представлена лінією — (---).

Нехай $i = 1, 2$. З рис. 7 видно, що на відрізок $[C_i, \dot{M}_p]$ проектується напрям спостереження V_i і напрям освітлення L_i , тому

$$\angle C_i \dot{M}_p A = \gamma_{LYi} = \gamma_{VYi}. \quad (74)$$

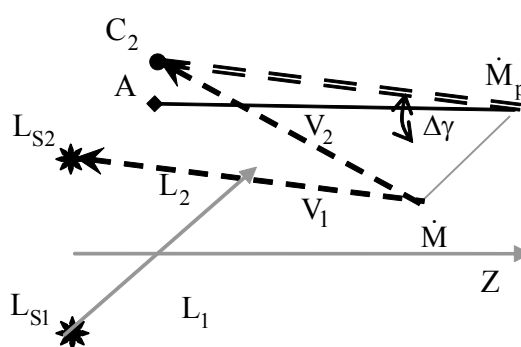


Рис. 7. Векторна інформація засобів стереозйомки в тривимірному просторі $[X, Y, Z]$ (рис. 6) та її проекція на площину $[Y, Z]$

З рис. 7 також видно, що

$$\angle C_1 \dot{M}_p C_2 = \angle C_1 \dot{M}_p A - \angle C_2 \dot{M}_p A = \Delta\gamma. \quad (75)$$

Співставляючи вирази (42), (43) та (74), а також вирази (44) та (75), отримуємо

$$\Delta\gamma_{LY} = \Delta\gamma_{VY} = \Delta\gamma, \quad (76)$$

що є додатковим доказом часткового виконання умови (39), отриманим шляхом графічного аналізу.

Нехай просторове розміщення елементів КДСК 1, КДСК2 залишається інваріантним ((69)-(71), рис. 5)). Внаслідок цього залишається інваріантною векторна інформація засобів стереозйомки (див. рис 7): вектора напрямку до джерела світла L_i ; вектора напрямку спостереження V_i відеокамерою Π_i ($i = 1, 2$). А внаслідок цього залишаються інваріантними кутові співвідношення в площині $[Y, Z]$ (74).

Щоб досягнути виконання умови (39) в повному обсязі, поміняємо порядок освітлення ((45), (46)). Розглянемо алгоритм стереозйомки з діагональним використанням елементів двох КДСК (див. рис. 5): спочатку функціонують елементи, розміщені на діагоналі прямокутника L_{S2}, C_1 .

1. Вмикається джерело світла L_1 .
2. Вмикається джерело світла L_2 .
3. Відеозйомка зображення камерою Π_1 :

$$I_1 = I_1(L_2, V_1). \quad (78)$$

4. Вмикається джерело світла L_2 , а потім функціонують елементи, розміщені на діагоналі прямокутника C_2, L_{S1} .

5. Вмикається джерело світла L_1 .
6. Відеозйомка зображення камерою Π_2 :

$$I_2 = I_2(L_1, V_2). \quad (78)$$

Оскільки кутові співвідношення в площині $[Y, Z]$ залишилися інваріантними по відношенню до попереднього етапу відеозйомки стереозображення за рядковим алгоритмом і визначені виразом (75), тому за діагональним алгоритмом при використанні джерела L_{S2} (L_{S1}), яке належить діагоналі L_{S2}, C_1 (C_2, L_{S1}) прямокутника на рис. 5, формується кут γ_{LY2} (γ_{LY1}), на основі чого розрахуємо приріст:

$$\Delta\gamma_{LY} = \gamma_{LY2} - \gamma_{LY1} = -\Delta\gamma, \quad (79)$$

а при використанні камери Π_1 (Π_2), яка належить діагоналі L_{S2}, C_1 (C_2, L_{S1}), формується кут γ_{VY1} (γ_{VY2}), на основі чого розрахуємо приріст:

$$\Delta\gamma_{VY} = \gamma_{VY1} - \gamma_{VY2} = \Delta\gamma. \quad (80)$$

З виразів (79) і (80) видно, що реалізацію умови (39) на технологічно-алгоритмічному рівні, яка створює необхідні умови для ліквідації компоненти дзеркального відбиття, завершено.

Зараз, після такої реалізації умови (39), ми можемо приступити до завершального етапу реалізації ліквідації інформації компоненти дзеркального відбиття, проведення погодження (19), (20), де з загального приросту ΔI (23) потрібно вилучити шкідливу інформацію ΔI_s .

6.4. Погодження обробленого напрямком освітлення стереозображення

Нехай за діагональним алгоритмом отримано стереозображення I_1 (77) та I_2 (78).

Зауважимо, що умова (39) сформульована для довільної точки M (51), яка на зображеннях представлена точками m' та m'' (див. рис. 6). Тому для остаточного виконання умови (39) необхідно та достатньо встановити відповідність точок m' та m'' на зображеннях I_1 (77) та I_2 (78). Така операція є погодженням зображень. Оскільки для формування зображення I_2 застосовано вертикальний, відносно сцени, перенос КДСК-2, тому під час погодження $h: I_1 \rightarrow I_2$ визначається вектор (8):

$$h(x, y) = (0, v(x, y))^T, \quad (81)$$

такий, що:

$$I_1(x, y) = I_2(x, y + v(x, y)). \quad (82)$$

На основі енергетичного функціоналу (13), який, з врахуванням (81), набуває вигляду

$$E(v) = \iint_{\Omega} \Delta I^2(x, y, v) dx dy + \kappa \iint_{\Omega} \Phi dx dy, \quad (83)$$

де

$$\Delta I(x, y, v) = I_1(x, y) - I_2(x, y + v) \quad (85)$$

– приріст, в якому мінімізується концентрація інформації дзеркальної компоненти та досягається збігання компоненти, що базується на Ламбертівській моделі розсіювання світла, диференціального рівняння Ейлера-Лагранжа:

$$\frac{\partial G}{\partial v} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial G}{\partial v_x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial G}{\partial v_y} \right) = 0 \quad (85)$$

та методу спуску, отримуємо

$$\frac{dv}{dt} = \Delta I \frac{\partial I_2}{\partial y} + \kappa \operatorname{div}(\mathbf{T}(\nabla I_1)) \nabla v, \quad (86)$$

де оператор \mathbf{T} представлено виразом (15).

Для числового розв'язку диференціального рівняння (86) в системі обробки інформації зображень використовують, з застосуванням підставлення $v = \lambda$, кінцево-різницеву ітераційну схему (20), де $W(v_{i,j}^k)$ – дискретне представлення функціонального оператора з (86), $V(v_{i,j}^k)$ – дискретне представлення регуляризуючого оператора з (86).

8. Висновки

Розроблено новий метод стереозйомки, що базується на Phong-моделі відбиття світла. Отримане стереозображення орієнтоване на використання в алгоритмі погодження тривимірної реконструкції.

Науковою новизною роботи є запропонована методика стереозйомки, що базується на спеціальній кутовій обробці інформації стереозображення шляхом детермінованих кутових змін положення джерела світла узгоджених з детермінованою кутовою зміною положення відеокамери. Для реалізації такої обробки інформації стереозображення запропоновано застосувати дві, ідентичні по параметрам зйомки, відеокамери та два, ідентичні по параметрам освітлення, точкові джерела світла. При проведенні стереозйомки джерела світла і фокуси відеокамер розташовані у вершинах прямокутника, відеокамери мають вертикальне зміщення, а екрани камер розташовано в площині, яка паралельна прямокутнику, так, що горизонтальні осі екранів колінеарні горизонтальним сторонам прямокутника. Для отримання одного зображення стереопари необхідно використовувати засоби зйомки однієї діагоналі прямокутника, а для отримання іншого зображення необхідно використовувати засоби зйомки другої діагоналі прямокутника. Отримане стереозображення має спеціальну концентрацію інформації дзеркальної компоненти, сформовану кутом освітлення. Для її ліквідації та детектування корисної інформації, яка отримується в рамках Ламбертівської моделі відбиття світла, запропоновано застосувати операцію погодження з середньоквадратичною мірою подібності. Мінімум такої міри подібності одночасно відповідає ліквідації інформації компоненти дзеркального відбиття і визначенню функції відмінності.

Практична цінність. Розроблений метод стереозйомки можна технологічно-програмно реалізувати в рамках стандартної системи тривимірної реконструкції на основі стереозображення, що, в перспективі, дозволить отримувати тривимірну інформацію з металографічних стереозображень, які мають значну дзеркальну компоненту.

Література: 1. Ma Y., Soatto S., J Kosecka J., Shankar Sastry S. An Invitation to 3-D Vision. Springer. 2005. 552 p. 2. Gonzalez R. C., Woods R. E., Eddins S. L. Digital Image Processing Using MATLAB. Prentice Hall; 2003. 782 p. 3. Форсайт Д., Понс Ж. М. Компьютерное зрение. Современный поход. Изд-во: Вильямс.; 2004. 928с. 4. Hartley R.I. Theory and Practice of Projective Rectification // International Journal of Computer Vision. 1999. V.35. No. 2. P. 115-127. 5. Синівський А.Т., Русин Б.П. Реалізація методу реконструкції мікроструктури поверхні за її стереозображенням з оптичних камер // Радіоелектроніка і інформатика. 2005.

№2. С.112-118. 6. Basso A., Graf H.P., Gibbon D., Cosatto E., Liu S. Virtual Light: Digitally-Generated Lighting For Video Conferencing Applications / 2001 IEEE P.1085-1088. 7. Watanabe S., Miyajima K. Detecting Building Changes Using Epipolar Constraint From Aerial Images Taken At Different Positions / 2001 IEEE. P. 201-204. 8. Романюк О.Н., Чорний А.В. Високопродуктивні методи та засоби зафарбування тривимірних графічних об'єктів. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. 190с. 9. Русин Б.П., Іванюк В.Г., Лисак Ю.В., Ануфрієва Н.П. Визначення глибини тріщин на серіях зображень // Радіоелектроніка і інформатика. 2008. №3. С. 54-61. 10. Baker H. H. Edge based stereo correlation. // In L. S. Baumann, editor, Science Applications International Corporation: Image Understanding Workshop. 1980. P. 168-175. 11. Marr D. C., Poggio T. A computational theory of human stereo vision // Proceedings of the Royal Society of London, B 204: 1979. P.301-328. 12. Szeliski R., Golland P. Stereo matching with transparency and matting // IJCV. 1999. №32(1). P.45-61. 13. Scharstein D., Szeliski R., Zabih R. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms // In IEEE Workshop on Stereo and Multi-Baseline Vision, 2001. 14. Лисак Ю.В., Русин Б.П., Луцик О.А. Адаптивна регуляризація розв'язку задачі погодження зображень // Сучасні комп'ютерні системи та мережі: розробка та використання: Матеріали 9-ї Міжнародної науково-технічної конференції УКРОБРАЗ 2008. Київ. С.205-208. 15. Nagel, H. H., Enkelmann, W. An investigation of smoothness constraints for the estimation of displacement vector fields from image sequences. IEEE Trans. Pattern Anal. and Mach. Intell. 1986. Vol. 8. P.565-593.

Надійшла до редколегії 10.06.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Лукін В.В.

Русин Богдан Павлович, д-р техн. наук, проф., зав. відділом "Методів та систем обробки, аналізу та ідентифікації зображень" Фізико-механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАНУ. Наукові інтереси: обробка та розпізнавання зображень. Адреса: Україна, 79601, Львів, вул. Наукова, 5а, e-mail: dep32@ipm.lviv.ua.

Іванюк Віталій Григорович, інж. ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАНУ. Наукові інтереси: реконструкція 3D. Адреса: Україна, 79601, Львів, вул. Наукова, 5а, тел:2296-530. e-mail: vivan@imp.lviv.ua.

Лисак Юрій Васильович, м.н.с. ФМІ ім. Г.В.Карпенка НАНУ. Наукові інтереси: обробка та розпізнавання зображень. Адреса: Україна, 79601, Львів, вул. Наукова, 5а. e-mail: ylysak@ipm.lviv.ua

Ануфрієва Наталія Павлівна, аспірантка ФМІ ім. Г.В.Карпенка НАНУ. Наукові інтереси: реконструкція 3D. Адреса: Україна, 79601, Львів, вул. Наукова, 5а.