

## РЕКОНСТРУКЦІЯ ФОРМИ ПОВЕРХНІ МАТЕРІАЛІВ ЗА ЇХ ЗОБРАЖЕННЯМИ

© Кожан В.П., Корній В.В., Русин Б.П., 2005

**Розглянуто підходи до реконструкції форми поверхні матеріалів за їх зображеннями, представлено базові моделі розсіювання світла поверхні матеріалів, які лежать в основі систем реконструкції форми поверхні об'єкта. Наведено результати комп'ютерного моделювання з відновлення деяких фрагментів зображень матеріалів.**

**The purpose of the article is to discuss the theory and practical issues behind creation of reflection model which constitute a basis for developing rendering system. Finally we present result of computer simulation for some surfaces of metals.**

Структурні методи дослідження матеріалів, і насамперед методи мікроскопічного аналізу широко використовують для вивчення металів. Перевага цих методів полягає в тому, що між структурою металу і його властивостями існує якісний зв'язок. Це дає змогу методами мікро/макроаналізу досліджувати напрямки змін механічних, фізичних і хімічних властивостей при відповідних змінах у структурах, а також виявляти їх причини. За даними структурних досліджень можливо вказати методи ефективного покращання структури і властивостей металів, а значить, прогнозувати експлуатаційну надійність виробів.

Об'єктом дослідження в структурних методах є графічні дані, отримані мікроскопом, на яких достатньо добре розпізнаються конструктивні елементи матеріалу. Об'єкт аналізу (зріз зразка матеріалу) за допомогою технічних засобів вводять в комп'ютер у вигляді зображення (матриці відліків). Введення графічних даних у комп'ютер – це отримання зображення на фотопластині за допомогою мікроскопа з подальшим використанням пристрою введення (телекамери, сканера) для занесення його у комп'ютер як вихідного для подальшої обробки та аналізу.

Методи мікроструктурних досліджень можна розділити на планіметричні і стереометричні. В основі планіметричних методів лежить вивчення плоских зрізів зразків матеріалів. Характеристики мікроструктури визначаються за допомогою вимірів, які виконують на площині. Потужний розвиток планіметричні методи отримали після втілення в практику мікроструктурних досліджень обчислювальної техніки, що дало змогу швидко і з великою точністю оцінювати за плоскими зображеннями розмір і форму структурних елементів, їх орієнтацію. На жаль, ці методи мають істотний недолік, який полягає у тому, що такі мікроструктурні характеристики, як висота рельєфу, форма і характер поверхні структурних елементів практично неможливо оцінити за плоскими перерізами. Тому розробка методів тривимірної реконструкції мікроструктури за їх зображеннями була б хорошою можливістю розв'язати багато із цих питань. Велику допомогу тут можуть надати стереометричні методи, в основі яких лежить спостереження стереоефекту за стереозображеннями. Стереоскопічні методи відкривають великі перспективи для тривимірної реконструкції і отримання об'ємних показників мікроструктури матеріалів.

Одна з типових проблем комп'ютерного бачення – це реконструкція форми поверхні, основним завданням якої є отримання опису тривимірного зображення (3D) з одного або декількох двовимірних (2D). Відновлену поверхню можна виразити декількома способами: за допомогою глибини  $Z(x, y)$ , яку можна розглядати як відносну віддаль від камери до точки на нормалі до поверхні або як відносну висоту точки щодо площини  $x - y$ ; нормалі до поверхні  $(n_x, n_y, n_z)$ , як орієнтацію вектора,

перпендикулярного до дотичної площини в цій точці об'єкта; градієнтом поверхні  $(p, q) = \left( \frac{\partial x}{\partial y}, \frac{\partial x}{\partial z} \right)$  –

швидкістю зміни глибини в  $x$  та  $y$  напрямках. Залежно від кількості і характеристик зображень, а також умов зйомки для розв'язку застосовують істотно різні методи [1, 2].

### **Основні методи відновлення форми об'єкта за зображеннями**

#### *Стереоконструкція карти глибини (shape from stereo)*

Знаючи координати конкретної точки на двох ( або більше ) зображеннях одного і того самого об'єкта, отриманих під різними кутами зору, можна за відомих параметрів камер обчислити положення точки у тривимірному просторі. Залежно від того, які параметри камер відомі, задачу формулюють по-різному. Одна із основних проблем в стерео-конструкції – знайти точну відповідність точок між зображеннями, які застосовують для реконструкції (задача аналогічна обчисленню числового потоку ).

#### *Реконструкція поля нормалей і карти глибини за градаціями напівтонового зображення (shape from shading – SFS )*

Задача обернена до обчислення яскравості точок сцени під час візуалізації. Яскравість точки поверхні залежить від властивостей джерела світла; характеристик поверхні; орієнтації поверхні щодо світла, що падає; точки зору спостерігача.

Під час візуалізації яскравість точки обчислюють за допомогою математичних моделей освітлення і відбиття світла від поверхні. Теоретично можна розв'язати і обернену задачу – за відомою яскравістю і прийнятою математичною моделлю відбиття і освітлення обчислити орієнтацію поверхні у цій точці. Основна складність тут – некоректність задачі, невідомих набагато більше ніж вихідних даних. Для регуляризації задачі застосовують різні обмеження на можливі розв'язки. Існують інші методи відновлення форми об'єкта за зображеннями, основні з них:

- реконструкція карти глибини за текстурою ( shape from texture );
- визначення форми за переміщенням ( shape from motion );
- визначення форми об'єкта за дефокусуванням ( shape from defocus );
- визначення форми об'єкта за контуром ( shape from contour ).

Щоб розв'язати SFS-проблему, важливо дослідити формування зображення. Однією з простих моделей формування зображення є ламбертівська, в якій інтенсивність сірого кольору кожного пікселя залежить від напрямку джерела світла та нормалі поверхні у цій точці, хоча реальні зображення не завжди відповідають ламбертівській моделі. Навіть якщо припустити, що відомий напрямок джерела світла і яскравість можна подати як функцію форми поверхні та напрямку джерела світла, проблема не така проста, тому що поверхня описується в термінах нормалі до поверхні. Отримуємо лінійне рівняння з трьома невідомими. Ось чому знаходження єдиного розв'язку SFS-проблеми є складним і вимагає додаткових обмежень.

Нижче досліджено можливості застосування методів, аналогічних розв'язанню SFS проблеми, до відновлення мікроструктурної поверхні матеріалів за їх зображеннями, отриманими за допомогою оптичного мікроскопа. Застосування цих методів можливе тільки з урахуванням особливостей зйомки (одержання зображення) в оптичному мікроскопі порівняно із зображеннями, на яких демонструються відомі методи, а саме:

- джерело освітлення не можна вважати точковим, оскільки його розміри, як правило, більші за розміри досліджуваного зразка;
- тінню від нерівностей поверхні можна практично знехтувати.

Отже, основною інформаційною ознакою поверхні є її оптичні властивості, зокрема здатність відбивати світло. Тому зупинимось детально на цій проблемі.

### **Оптичні властивості матеріалів**

Якщо на будь-яке тіло падає потік світла  $F_i$ , то частина його відбивається від поверхні тіла: від гладкої поверхні – дзеркально, від матової – дифузно у всі боки. Частина потоку поглинатиметься і перетворюватиметься на інші форми енергії – переважно на тепло. Оптичні

властивості матеріалів може характеризувати коефіцієнт відбиття  $\rho$ , що дорівнює відношенню світлового потоку  $F_r$ , відбитого тілом, до світлового потоку  $F_i$ , що падає на тіло:

$$\rho = \frac{F_r}{F_i}. \quad (1)$$

Поглинання світлового потоку оцінюють коефіцієнтом поглинання  $a$ , який характеризується відношенням поглинутого світлового потоку  $F_a$  до потоку, що падає  $F_i$ , тобто

$$a = \frac{F_a}{F_i}. \quad (2)$$

Із закону збереження енергії випливає, що  $a + \rho = 1$ .

Більшість твердих тіл є непрозорими навіть за порівняно невеликої глибини. Тому нехтуємо часткою енергії, яка може проходити через тіло. Тут розглядаємо тільки металеві поверхні, які вважають непрозорими.

Фундаментальна властивість відбиття світла від поверхні: частка відбитої від поверхні енергії залежить від кута падіння світла, але при кожному куті сума відбитої та поглинутої енергії дорівнює енергії променя, що падає. Для інженерних потреб можемо ігнорувати поляризацію світла. У такому разі частка відбитої енергії залежить від кута падіння та довжини хвилі  $F_r(\theta, \lambda)$ , а також від оптичних властивостей матеріалу.

Щоб достатньо вичерпно охарактеризувати відбивні властивості конкретного матеріалу, необхідно виконати прямі вимірювання коефіцієнта відбиття під великою кількістю кутів за різних довжин хвиль. Такі вимірювання виконують за допомогою гоніорефлектометра (gonioreflectometr) [3]. Вони складні і вимагають значних зусиль, щоб виготовити та відкалібрувати такий пристрій, а вимірювання є кропітким і вимагає значних затрат.

### Основні моделі відбиття світла поверхнями

Найпростішою моделлю відбиття світла поверхнею є модель поверхні, яка має тільки дифузне розсіювання. Така поверхня розсіює світло рівномірно у всіх напрямках. Її яскравість пропорційна до енергії світла, що падає.

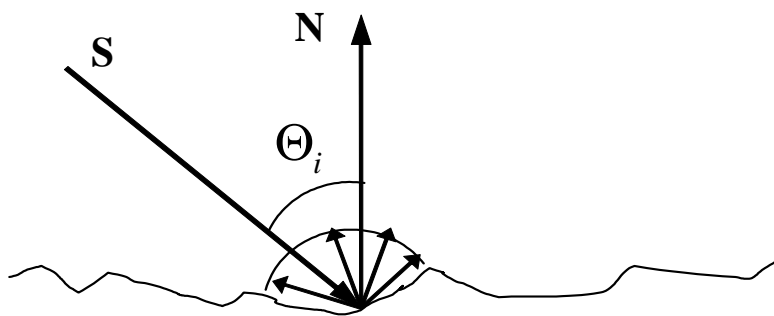


Рис. 1. Дифузне розсіювання світла поверхнею

Світлова енергія, яка падає на деякий елемент поверхні, пропорційна до площі цього елемента, що скерована до джерела світла. Площа елемента пропорційна до косинусу кута між напрямком падіння світла та орієнтацією поверхні відносно напрямку падіння світла (рис. 1). Отже, частку відбитої фрагментом поверхні енергії  $F_L$  з коефіцієнтом відбиття  $\rho$  і силою світла джерела  $A$  можна виразити так:

$$F_L = A\rho \cos \Theta_i. \quad (3)$$

Це співвідношення є базовим для ламбертівської моделі відбиття (Lambertian Reflection Model) – найбільш відомої та зручної для комп'ютерного моделювання. На жаль, ця модель не враховує дзеркальної властивості поверхні, що є характерною для багатьох металевих поверхонь. Дзеркальним відбиття є тільки якщо кут променя, що падає, дорівнює куту зору. Дзеркальне відбиття формує деякий максимум яскравості у дуже вузькому куті навколо напрямку дзеркального відбиття. Модель, яка враховує дзеркальне відбиття, зображена на рис. 2

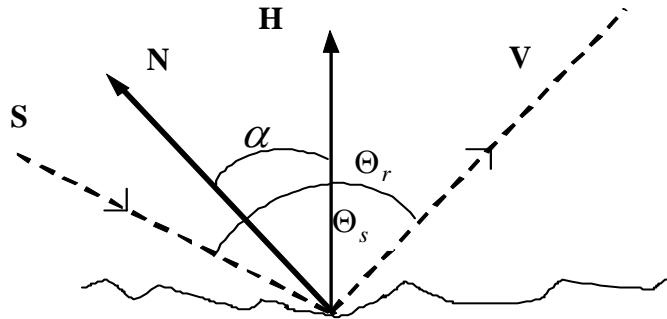


Рис. 2. Дзеркальне відбиття світла поверхнею

Найпростіша модель, яка враховує дзеркальне відбиття, така:

$$F_S = B\delta(\Theta_S - 2\Theta_r), \quad (4)$$

де  $F_S$  – яскравість дзеркального відбиття;  $B$  – яскравість відбитого в дзеркальному напрямку світла;  $\delta$  – дельта-функція;  $\Theta_S$  – кут між напрямком до джерела світла  $S$  та напрямком до спостерігача  $V$ , і  $\Theta_r$  – кут між нормаллю та напрямком до спостерігача. Недоліком цієї моделі є те, що суто дзеркальне відображення є тільки в одній точці, що не відповідає практиці. В літературі відомий цілий ряд підходів для усунення цього недоліку. Однією з них є модель [3], у якій припускається, що поверхня матеріалу складається з малих випадково орієнтованих дзеркальних поверхонь. Вона описує дзеркальну яскравість поверхні як добуток чотирьох компонент: енергія світла, що падає, коефіцієнт відбиття, функції розподілу яскравості для елемента поверхні (грані), а також геометричний фактор, який зумовлений нахилом поверхні відносно реєструвального пристрою. Якщо взяти гауссівський розподіл для функції орієнтації грані, то отримаємо таке

$$F_S = K e^{-\frac{\alpha^2}{m}}, \quad (5)$$

де  $\alpha$  – кут між нормаллю поверхні та напрямком реєстрації, а  $K$  – константа.

Є також цілий ряд моделей у яких намагаються адитивно поєднати різні фізичні властивості поверхонь [3]. Однак не всі із запропонованих підходів є придатними для комп'ютерного моделювання. Робота в цьому напрямку далека від завершення.

### Комп'ютерний аналіз та синтез об'ємної поверхні

Комп'ютерне моделювання об'ємної поверхні включає два основні етапи:

- обчислення третьої координати за відомим 2D зображенням матеріалу (аналіз);
- побудова за відомими координатами об'ємної поверхні матеріалу (синтез).

На першому етапі застосовуємо ламбертівську модель відбиття, припускаючи, що:

- а) спостерігач знаходиться строго над поверхнею. З умов знімання мікроскопом можна вважати, що поверхня зразка завжди перпендикулярна до оптичної осі мікроскопа;
- б) джерело світла знаходиться в нескінченності, промені світла падають на поверхню під однаковим кутом.

Застосовуючи (3), отримуємо  $z$ -координату поверхні. На другому етапі використовуємо наявні засоби системи MATLAB для графічного зображення одержаної поверхні. В цій системі

поверхню визначають за допомогою  $z$ -координат точок над  $x - y$  поверхнею. MATLAB дає, передовсім, зручний інструментарій для графічного зображення функцій двох змінних, а також має свій арсенал засобів для реалістичного відтворення структурних особливостей поверхні. Дає змогу задавати текстуру поверхні окремим масивом незалежно від об'ємних координат. Але найбільше значення мають можливості MATLAB, пов'язані з освітленням. Задаючи координати віртуального джерела світла, бачимо реалістичне відтворення ефекту освітлення графічного об'єкта. Можемо також безпосередньо впливати на оптичні властивості створеної віртуальної поверхні, задаючи співвідношення між дзеркальним та дифузним відбиттям поверхні через `SpecularStrength` та `DiffuseStrength` параметри відповідно, а також додаткові параметри (`SpecularExponent`, `SpecularColorReflectance`, `FaceLighting`) для досягнення реалістичного ефекту. MATLAB дає змогу керувати орієнтацією зображеної поверхні відносно осей координат командою `VIEW(AZ, EL)`, а також спостерігати графічний об'єкт з відповідної позиції. Вона забезпечує функціональність, аналогічну до камери із змінною фокусною віддаллю за допомогою параметрів `CameraPosition`, `CameraTarget`, `CameraViewAngle`, `Projection` тощо.

Ці та інші особливості MATLAB використані нами для створення математичного забезпечення для відновлення поверхні матеріалів за їх зображеннями, отриманими за допомогою оптичного мікроскопа.

На рис. 3 наведено результати комп'ютерного моделювання фрагментів зображення, де за основу взята ламбертівська модель відбиття (3), у якій припускали однорідність матеріалу відновлюваної поверхні. Розмір фрагмента зображення, який підлягає відновленню, визначається роздільною здатністю монітора. Зі збільшенням розміру фрагмента кількість точок поверхні зростає експоненційно, що призводить до того, що частина відновленої поверхні втрачається під час відображення. Експериментальні результати подані для монітора з роздільною здатністю 600x800 пікселів.

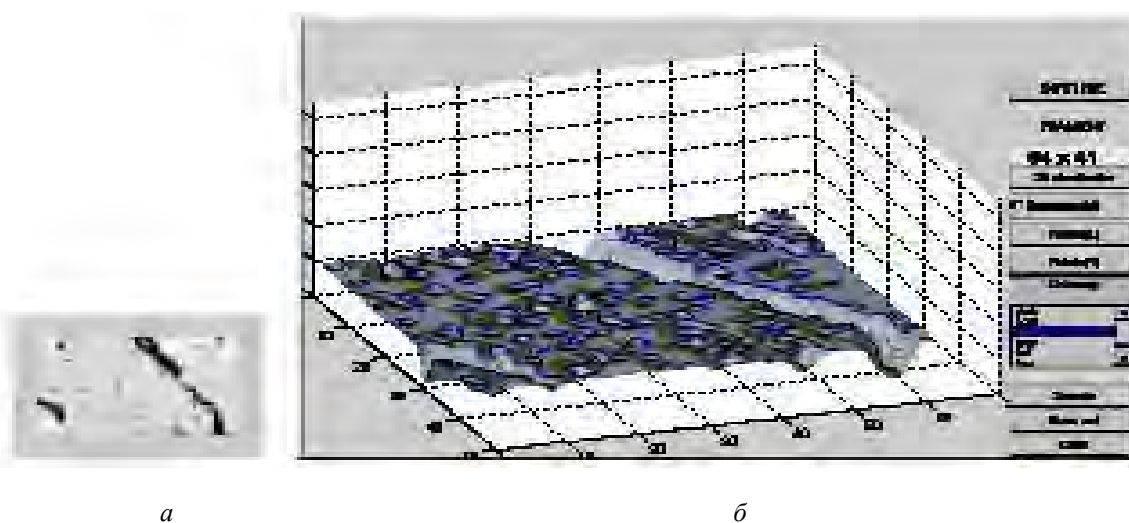


Рис. 3. а – фрагмент зображення, б – відновлена поверхня фрагмента зображення

### Висновок

Отримані результати комп'ютерного моделювання тривимірної реконструкції мікрорельєфу поверхні зразків матеріалів дають можливість подати інформацію в інтуїтивно зрозумілому та легкому для сприйняття вигляді для подальшого аналізу структурних властивостей матеріалів.

1. Horn, B.K.P. and M. Brooks. *The variational approach to shape from shading* // *Comput. Vision, Graph & image Process.* – 1986. – 33. – № 2. – P. 174–208. 2. Olienses J, Dupuis P. *A global algorithm for Shape from shading* // *In Proc. of Int. Conf. On Comp. Vision.* – 1993 – P. 692–701. 3. Petland A. *Linear shape from shading* // *Intl. Comput. Vision* – 1990. – 4. – P. 153–162.