

ния выше критических), то этот процесс может накладывать существенные ограничения на способность TiO_2 -слоев передавать мелкие детали только в области высоких пространственных частот.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколов В. Г., Рахманов А. К., Михайлов В. П. и др. Фотографические свойства пленочных слоев на основе диоксида титана // Предельные свойства фотографических материалов. Тез. докл. — Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1979.
5. Вендровский К. В., Вейцман А. И. Фотографическая структурометрия. — м.: искусство, 1982.
6. Браницкий Г. А., Воробьева Т. Н., Данильченко Е. М. и др. Особенности процессов усиления при получении металлических рисунков на светочувствительных пленках диоксида титана // Всесоюз. конф. по процессам усиления в фотографических системах регистрации информации: Тез. докл. — Минск.: Изд-во Белорус. ун-та, 1984.

Поступило в редакцию 18 апреля 1989 г.

УДК 681.518.3 : 535.317.1

П. А. БАКУТ, М. В. КУЗНЕЦОВ, А. Д. РЯХИН

(Москва)

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТИ ПО ЕЕ ПОЛУТОНОВЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

Задачу определения трехмерной формы поверхности по ее полутоновому изображению, сформированному по рассеянному поверхностью подсвечивающему оптическому излучению, обычно решают в предположении ламбертовского закона рассеяния при постоянном коэффициенте отражения [1—3]. Этот закон справедлив для ограниченного класса поверхностей, например для поверхностей с объемным характером рассеяния [4]. Рассмотрим практически важный случай наблюдения непрозрачной поверхности с неразрешаемыми оптической системой шероховатостями, распределенными по гауссовому закону, размер которых значительно превосходит длины волны подсвечивающего излучения. Распределение интенсивности в изображении такой поверхности определяется распределениями средней высоты поверхности $Z(x)$ над предметной плоскостью x , коэффициента отражения $K(x)$ и среднеквадратичного наклона шероховатостей $\gamma(x)$. Математическое описание закона распределения интенсивности в изображении такой поверхности было получено в [4]. Обобщая этот закон на случай некогерентного подсвета параллельным пучком, получим для распределения интенсивности $I(x)$ некогерентного изображения выражение вида

$$I(x) = K(x) \exp \left\{ - \frac{|g(x) - n/2|^2}{4\gamma^2(x)} \right\}, \quad (1)$$

где $g(x) = \text{grad } Z(x)$, а n — проекция единичного вектора, параллельного направлению подсвета, на предметную плоскость. Очевидно, что существует большое число наборов функций K , γ и g , приводящих к одному и

тому же распределению $I(\mathbf{x})$. Для устранения неоднозначности определения параметров поверхности необходимо использовать несколько изображений поверхности, соответствующих различным условиям подсвета или формирования изображения. В [5] было предложено использовать изображения, полученные при различных разрешающих способностях оптической системы. Этот подход требует достижения очень высокой разрешающей способности, при которой размер элемента разрешения Δ приближается к величине радиуса корреляции шероховатостей, что часто затруднительно на практике. Более перспективным представляется предложение использовать изображения $I_i(\mathbf{x})$, полученные при различных направлениях подсвета \mathbf{n}_i .

Выведем условия на направления подсвета, необходимые для единственности решения задачи нахождения формы поверхности. Логарифмируя правые и левые части возникающих уравнений вида (1) и вычитая из всех уравнений первое, получим линейную систему уравнений, из которых исключено неизвестное $K(\mathbf{x})$, в виде

$$\xi_1(n_{ix} - n_{1x}) + \xi_2(n_{iy} - n_{1y}) + \xi_3(|\mathbf{n}_i|^2 - |\mathbf{n}_1|^2) = \ln [I_1(\mathbf{x})/I_i(\mathbf{x})], \quad (2)$$

где n_{ix} , n_{iy} — компоненты вектора \mathbf{n}_i , $\xi_1 = g_x/4\gamma^2$, $\xi_2 = g_y/4\gamma^2$, $\xi_3 = 1/16\gamma^2$. Система уравнений (2) имеет единственное решение, если ранг матрицы

$$\| (n_{ix} - n_{1x}), (n_{iy} - n_{1y}), (|\mathbf{n}_i|^2 - |\mathbf{n}_1|^2) \|$$

равен 3.

Реально регистрируемые распределения интенсивностей изображений $J_i(\mathbf{x})$ отличаются от $I_i(\mathbf{x})$ наличием шумов различной природы, в первую очередь шумов «пятнистости», возникающих из-за частичной когерентности подсвета, и аддитивных шумов, обусловленных флуктуациями фонового излучения. В этом случае возникает вопрос об оптимальной оценке параметров поверхности. Учитывая случайный характер шумов, определим путь ее построения на основе статистического критерия максимума правдоподобия. Используя общую методику, изложенную в [6], можно показать, что вероятностное распределение интенсивностей J описывается гамма-законом со средним $I + N_{\text{ш}}$, где $N_{\text{ш}}$ — интенсивность аддитивного шума. Тогда логарифм функционала плотности вероятности (ЛФПВ) для одного изображения оказывается пропорциональным величине [7]:

$$\int \{ \ln [I(\mathbf{x}) + N_{\text{ш}}] + [J(\mathbf{x})/(I(\mathbf{x}) + N_{\text{ш}})] \} d\mathbf{x}. \quad (3)$$

Физически различные направления подсвета должны отличаться на угол, больший углового разрешения оптической системы. В этом случае реализации распределений интенсивности изображений оказываются статистически независимыми, а ЛФПВ совокупности изображений равен сумме ЛФПВ отдельных изображений. В результате получаем, что для нахождения максимально правдоподобных оценок параметров поверхности необходимо решить систему уравнений вида

$$\sum_i \frac{\partial I_i}{\partial q_j} [J_i(\mathbf{x}) - I_i(\mathbf{x}) - N_{\text{ш}}] = 0, \quad (4)$$

где под q_j понимается один из параметров g_x , g_y , K или γ ; g_x , g_y — компоненты градиента средней поверхности $Z(\mathbf{x})$. Таким образом, данный алгоритм позволяет, помимо информации о форме поверхности, характеризуемой вектором градиента средней поверхности \mathbf{g} , получить информацию о распределении коэффициента отражения $K(\mathbf{x})$ и среднеквадратичном наклоне шероховатостей $\gamma(\mathbf{x})$.

Полезно отметить, что решение системы уравнений (4) эквивалентно нахождению минимума функционала вида

$$\sum_i [J_i(\mathbf{x}) - I_i(\mathbf{x}) - N_{\text{ш}}]^2.$$

В заключение отметим, что аналогичный алгоритм определения параметров поверхности может быть основан не на изменении направления подсвета \mathbf{n}_i , а на изменении на углы α_i ракурса поверхности относительно оптической оси системы формирования изображения. В этом случае основной сложностью является установление соответствия между точками различных изображений. Однако при небольших углах поворота α_i , удовлетворяющих неравенству

$$\sin \alpha_i \max Z(\mathbf{x}) \ll \Delta,$$

эту операцию можно не осуществлять. Но при этом в (1) необходимо к $\mathbf{n}_i/2$ добавить вектор, равный проекции единичного вектора нормали к предметной плоскости i -го изображения на начальную предметную плоскость, относительно которой отсчитывается высота средней поверхности $Z(\mathbf{x})$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хори Б. Определение формы по данным о полутонах // Психология машинного зрения/Под ред. П. Уипстона.— М.: Мир, 1978.
2. Марр Д. Зрение. Информационный подход к изучению представления и обработки зрительных образов.— М.: Радио и связь, 1987.
3. Петров А. И. Свет, цвет и форма // Интеллектуальные процессы и их моделирование.— М.: Наука, 1987.
4. Бакут П. А., Кузнецов М. В., Мандросов В. И. Статистические характеристики когерентных изображений неплоских объектов // ЖНиПФиК.— 1985.— 30, № 3.
5. Бакут П. А., Кузнецов М. В., Мандросов В. И. Оценка параметров неровностей и формы параболических поверхностей по их когерентным изображениям // Автометрия.— 1985.— № 4.
6. Миддлтон Д. Введение в статистическую теорию связи.— М.: Сов. радио, 1961.
7. Бакут П. А., Мандросов В. И., Матвеев И. Н. и др. Теория когерентных изображений.— М.: Радио и связь, 1987.

Поступило в редакцию 28 февраля 1989 г.

УДК 681.7.014.3

**С. Н. АННИН, Н. Ф. КОВТОНЮК, А. В. КОСТЮК,
С. Б. ОДИНОВ**
(Москва)

МЕТОД СРАВНЕНИЯ СМЕЩЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Обычно выделение движущихся объектов осуществляют путем вычитания изображений [1—3], что требует предварительного совмещения сравниваемых изображений. Рассмотренный в настоящей работе способ сравнения изображений позволяет обнаружить локальные изменения или движущиеся объекты, вектор смещения которых не совпадает с вектором смещения фона, и не требует предварительного совмещения сравниваемых изображений. Для реализации сравнения два последовательных кадра регистрируют на одном пространственном модуляторе света, после чего осуществляют пространственную фильтрацию суммарного изображения. Так как суммарное изображение содержит два одинаковых (но смещенных) фоновых изображения, то его пространственный спектр промодулирован высококонтрастными интерференционными полосами, ориентация и ширина которых определяются вектором смещения Δ . Если выделяемая деталь изображения отсутствует на одном из кадров, то ее пространственный спектр интерференционной модуляции не имеет; если же выделяемая деталь движется относительно фона, причем вектор ее смещения отличен от Δ , то спектр сигнала имеет интерференционную модуляцию, отличную